

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения
Российской академии наук

На правах рукописи

Губарев Федор Александрович



**МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И
КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА
ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

**Специальность: 01.04.01 – Приборы и методы
экспериментальной физики**

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Томск – 2021

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Методы и аппаратура для исследования высокотемпературных процессов	20
1.1. Активные среды на парах металлов	20
1.2. Лазерные проекционные системы на основе активных сред на парах металлов	25
1.2.1. Лазерный проекционный микроскоп	25
1.2.2. Формирование изображений в лазерном проекционном микроскопе.....	29
1.2.3. Лазерный проекционный микроскоп с усилителем яркости на парах бромида меди.....	33
1.2.4. Лазерный проекционный микроскоп с двумя активными элементами.....	36
1.2.5. Лазерный монитор для исследования поверхности объектов в условиях интенсивной фоновой засветки	37
1.3. Метод корреляции лазерных спекл-изображений	45
1.4. Методы и оборудование для исследования горения высокоэнергетических материалов	48
1.4.1. Горение высокоэнергетических материалов	48
1.4.2. Методы и оборудование для исследования исходных веществ и продуктов сгорания	52
1.4.3. Методы и оборудование для исследования процесса горения.....	55
1.5. Цель и задачи диссертационного исследования.....	61
Глава 2. Активные элементы усилителей яркости на парах бромида меди и источники накачки	65
2.1. Активные элементы на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров и традиционной накачкой	65

2.2. Активные элементы на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров и емкостной накачкой	72
2.3. Схемы накачки лазеров и усилителей яркости.....	75
2.3.1. Одноканальные схемы накачки активных элементов на парах бромида меди.....	75
2.3.2. Двухканальный источник высоковольтных импульсов	87
2.4. Выводы по главе 2.....	98
Глава 3. Радиальное распределение излучения усилителей яркости на парах бромида меди.....	100
3.1. Радиальное распределение усиления активной среды в системе «задающий генератор – усилитель мощности»	100
3.2. Влияние условий работы усилителя яркости на радиальное распределение двухпроходowego усиления активной среды	103
3.3. Радиальное распределение усиления активной среды в импульсе генерации	109
3.4. Радиальное распределение усиления активной среды в реальных схемах лазерных мониторов	116
3.5. Выводы по главе 3.....	129
Глава 4. Лазерный комплекс для скоростной визуализации и исследования параметров высокотемпературного горения.....	131
4.1. Техника скоростной видеорегистрации	131
4.2. Техника скоростной визуализации с лазерной подсветкой.....	138
4.3. Лазерный монитор с синхронной регистрацией изображений.....	145
4.4. Пространственное разрешение лазерного монитора	151
4.5. Лазерный монитор с увеличенной дальностью наблюдения для исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения	154
4.6. Получение количественных характеристик процесса горения с использованием лазерного монитора	163
4.7. Лазерный монитор с независимой подсветкой	175

4.8. Двухканальный лазерный монитор	191
4.9. Лазерный монитор для исследования поверхности тонких слоев нанопорошков металлов	194
4.10. Характеристики нано- и микропорошков металлов.....	198
4.11. Выводы по главе 4.....	203
Глава 5. Визуализация горения нанопорошков металлов и их смесей с использованием лазерного монитора	206
5.1. Особенности использования лазерного монитора для исследования горения нанопорошков металлов и смесей на их основе.....	206
5.2. Исследование горения нано- и микропорошков металлов и их смесей с использованием традиционного лазерного монитора	214
5.3. Исследование лазерного инициирования с использованием ла- зерного монитора и аппаратный анализ изменения коэффициента отра- жения поверхности в режиме реального времени	230
5.4. Исследование горения тонких слоев нанопорошков.....	241
5.5. Исследование горения энергетических материалов с применением лазерного монитора с увеличенной дальностью наблюдения	247
5.5.1. Исследование нанопорошка алюминия и его смесей с нано- порошком железа и микропорошками алюминия и железа	247
5.5.2. Особенности лазерного инициирования нанопорошков металлов, обнаруженные с использованием лазерного монитора	259
5.5.3. Наблюдение горения модельного высокоэнергетического материала с использованием лазерного монитора	265
5.5.4. Результаты применения лазерного монитора с перемещаемой областью наблюдения.....	268
5.6. Возможности бистатического и двухканального лазерных мониторов при исследовании горения энергетических материалов	274
5.7. Системы визуализации горения энергетических материалов с применением лазерной подсветки	280

5.8. Выводы по главе 5.....	289
Глава 6. Лазерная спекл-диагностика поверхности горения нанопорошков металлов	294
6.1. Схема скоростной видеорегистрации лазерных спекл- изображений.....	294
6.2. Методика обработки спекл-изображений	295
6.3. Динамика лазерных спеклов при горении нанопорошков металлов...	306
6.4. Применение метода лазерной спекл-корреляции для дистанци- онного контроля горения нанопорошков металлов.....	319
6.5. Выводы по главе 6.....	333
Заключение.....	336
Список литературы.....	339
Приложение 1. Акты.....	381

Введение

Актуальность работы. Высокоэнергетические материалы (ВЭМ) на основе порошков металлов получили широкое распространение в связи с их высокой теплотой сгорания. Пассивирующая оксидно-гидроксидная оболочка на поверхности частиц образует барьер между металлической составляющей частицы и окислителем и снижает пирофорные свойства, делая частицы металла стабильными, позволяя работать с ними. Например, для частиц алюминия микронного размера оксидно-гидроксидная оболочка составляет около 1 % от массы частицы, для наноразмерных частиц алюминия пассивирующая оболочка составляет значительную долю частицы (20 % и более), поэтому свойства микронных (крупнодисперсных) порошков металлов значительно отличаются от свойств ультрадисперсных порошков (нанопорошков).

Эффективное использование уникальных свойств ВЭМ на основе нанопорошков металлов возможно только путем всестороннего изучения физико-химических свойств и механизмов межчастичного взаимодействия. Горение ВЭМ, содержащих нанопорошки металлов, является основным процессом, применяемым в современной технологии и научных исследованиях для взрывного получения энергии, синтеза материалов, локального нагрева поверхности, создания световых и звуковых эффектов. Для получения таких знаний необходимо проведение детального исследования с использованием передовых методик и новых подходов, а также разработка новых методов и приборов, в частности для исследования процессов горения *in situ*.

Визуализация является одним из основных способов изучения физических процессов и закономерностей. В ходе взаимодействия с другими веществами нано- и микропорошки металлов изменяют свои физические и химические свойства. Посредством установления закономерностей протекания процесса горения и изменений морфологии поверхности веществ в ходе взаимодействия появляется возможность исследования механизмов протекания реакций.

Горение ВЭМ протекает при высоких температурах и сопровождается интенсивной фоновой засветкой, что делает непосредственное визуальное наблюдение поверхности образца в процессе горения затрудненным. В литературе практически отсутствуют данные об изучении закономерностей изменения поверхности во время горения. Существующие методы исследований позволяют достаточно точно измерять температуру горения и форму плазменного факела, но не позволяют исследовать поверхность образца в режиме реального времени, в частности, изучать с высокой точностью форму и скорость распространения фронта горения, морфологию поверхности, отражательную способность. В связи с этим решение проблемы визуализации поверхности горения нанопорошков металлов, термитных смесей на их основе и модельных ВЭМ во время лазерного инициирования и высокотемпературного горения и создание лабораторных установок для исследования поверхности указанных материалов в режиме реального времени имеют важное научное и практическое значение.

Исследование горения нанопорошков металлов, смесей нано- и микропорошков металлов и термитных смесей, модельных ВЭМ и разработка лабораторных установок выполнены при поддержке ГЗ «Наука», проект № 11.1928.2017/4.6; РФФИ, проекты № 19-03-00160, 15-03-05385; гранта Президента РФ № НШ 2513.2020.8.

Разработка и исследование активных элементов лазеров на парах бромида меди, создание первых лабораторных макетов лазерных мониторов и исследование их оптических характеристик осуществлялось в рамках проектов ГЗ «Наука» № 7.586.2011; АВЦП РНП ВШ, проекты № 2.1.1.5450, 2.1.2/1425, 2.1.2/13145; грант РФФИ № 14-19-00175, гранта Президента РФ № МК-4438.2012.8.

Степень разработанности темы. Лазерный проекционный микроскоп на основе активной среды на парах меди, созданный сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР в 1974 г., является уникальной лазерной системой, позволяющей получать увеличенное в тысячи раз и усиленное по яркости изображение на больших экранах. До появления в 2000-х гг. современных компьютеров и проекторов лазерный проекционный микроскоп оставался

единственной системой, дающей такие возможности. В этот период времени были заложены основы построения таких систем и реализованы различные конфигурации на основе высокотемпературной саморазогревной среды на парах меди. При этом активная среда на парах бромида меди, имеющая ряд преимуществ, на тот период времени практически не использовалась в проекционных системах с усилением яркости.

Идея использования лазерного проекционного микроскопа для решения практических задач визуализации высокотемпературных процессов предложена научным коллективом под руководством В.М. Батенина в Институте высоких температур АН СССР. В 1988 г. ученые обратили внимание на возможность фотоанализа процессов на поверхности, скрытой слоем яркосветящегося газа или плазмы. Название «лазерный монитор» появилось в литературе в 1996 г., когда в схему лазерного проекционного микроскопа добавили видеокамеру. Лазерный монитор применялся для исследования сварки оптических волокон, лазерного упрочнение покрытий из хрома, лазерной обработки материалов, лазерных термохимических процессов, новых закономерностей в горении угольной дуги и процессов на электродах.

Отсутствие скоростной цифровой регистрирующей аппаратуры с высоким качеством изображений сдерживало развитие лазерных мониторов в 1990-е гг. Прогресс в развитии скоростной видеотехники в начале 2000-х гг. позволил внедрить скоростную видеокамеру в лазерный мониторинг и открыть новые возможности таких систем. С использованием скоростной видеокамеры в составе лазерного монитора исследовали гидродинамические неустойчивости и волны, индуцированные импульсно-периодическим лазерным излучением на поверхности вещества, изменение рельефа поверхности углеродных материалов при лазерном воздействии, лазерную сварку металлов, плазмоиндуцированные процессы в капиллярном разряде.

Существенный прогресс в области лазеров на парах галогенидов металлов, достигнутый коллективами Томского политехнического университета (ТПУ) и Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) к 2008 году,

в том числе с участием автора диссертации, создал предпосылки проведения исследований, направленных на создание лазерных мониторов на основе активной среды на парах бромида меди для исследования процессов, экранированных интенсивной фоновой засветкой.

В 2008–2014 гг. при участии автора диссертации была показана возможность применения лазерных мониторов на парах бромида меди для исследования дуги постоянного тока, лазерного воздействия на поверхность стекла, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при горении смесей крупнодисперсных порошков, а также разработан лабораторный макет лазерного монитора. В 2014–2021 гг. коллективом авторов под руководством Г.С. Евтушенко была показана возможность использования лазерного монитора для наблюдения коронного разряда в воздухе, лазерной абляции нанопорошков при воздействии интенсивным лазерным излучением, кристаллов алмаза в процессе химического осаждения, горения проводников в постоянном токе. Кроме того, разработан бистатистический лазерный монитор на основе активных элементов на парах бромида меди и на примере цельнометаллических объектов подтверждено повышение яркости и контраста изображений при использовании лазерной подсветки.

Таким образом, к 2014 г. уровень разработки и потенциальные возможности лазерных мониторов открыли для них новые области использования для визуализации высокотемпературных процессов, в частности, перспективы их использования в области физики горения и взрыва для визуализации поверхности горения нанопорошков металлов, термитных смесей на основе нанопорошков металлов и твердых топлив.

Объекты исследования: нанопорошки металлов, термитные смеси на основе нанопорошков металлов, смеси нано- и микropорошков металлов, модельные высокоэнергетические материалы.

Предметом исследования являются процессы горения нанопорошков металлов и их смесей, морфологические изменения поверхности высокоэнергетических материалов во время горения.

Цель исследования: разработка методик исследования высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей на основе методов скоростной видеосъемки с применением лазерного монитора и лазерной подсветки, а также практическая реализация разработанных методик.

Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы необходимо решить следующие **задачи:**

1. Проанализировать возможности визуализации на основе лазерного монитора с усилителем яркости на парах бромида меди для исследования морфологических изменений поверхности ВЭМ во время горения, в том числе непосредственно в области лазерного инициирования.

2. Исследовать горение нанопорошка алюминия, а также смесей нано- и микропорошков металлов, термитных смесей и модельных ВЭМ с применением лазерных мониторов, в том числе с возможностью перемещения области наблюдения в процессе исследования для изучения однородности горения и характера распространения фронта горения.

3. Разработать методику визуализации лазерного инициирования и горения тонких слоев нанопорошков металлов.

4. Разработать способы качественной и количественной оценки изменения поверхности порошковых материалов (нано- и микропорошки металлов) во время горения на основе цифровой обработки изображений лазерного монитора.

5. Экспериментально проверить возможность увеличения контрастности изображений поверхности нанопорошков металлов при использовании в лазерном мониторе независимой лазерной подсветки.

6. Определить характер влияния температуры контейнеров с рабочим веществом и расстояния до объекта визуализации на характеристики излучения в режимах, необходимых для исследования горения нанопорошков металлов.

7. Разработать методику дистанционного исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения на основе метода лазерной спекл-корреляции.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Впервые продемонстрирована возможность визуализации процессов инициирования и горения нанопорошков металлов, термитных смесей и модельной топливной смеси в воздухе сквозь яркосветящееся пламя с использованием лазерного монитора на парах бромида меди. Показана возможность изучения морфологии поверхности горящих образцов нанопорошков металлов в режиме реального времени с использованием лазерного монитора с временным разрешением до 0,8 мс.

2. С использованием лазерного монитора показано, что при горении нанопорошка алюминия в воздухе во время прохождения первой волны горения морфология поверхности практически не меняется, в то время как на второй стадии образуются агломерированные продукты сгорания алюминия.

3. Реализованы режимы работы усилителей яркости с малой мощностью сверхизлучения, необходимой для исследования легковоспламеняющихся высокоэнергетических материалов, в трубках относительно большого диаметра (1,5–3 см) с использованием газоразрядных трубок на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров.

4. Установлено, что изменение отражательной способности поверхности нанопорошка металла приводит к изменению яркости изображений лазерного монитора в диапазоне до 37 % от среднего значения и дает возможность количественной оценки временных параметров процессов горения в режиме реального времени.

5. Показано, что высокое пространственное разрешение при визуализации лазерного инициирования тонких слоев нанопорошков металлов обеспечивается фокусировкой луча инициирующего лазера и пучка излучения лазерного монитора одним и тем же объективом.

6. Экспериментально показано, что кольцевой профиль параллельного пучка усилителя яркости значительно выравнивается при распространении пучка излучения лазерного монитора, несущего изображение, за счет формирующих оптических элементов при одинаковых условиях работы усилителя яркости.

7. Разработана экспериментальная методика для определения количества и продолжительности стадий горения, а также скорости горения нанопорошков металлов на основе метода лазерной спекл-корреляции.

Теоретическая значимость работы:

1. Показано, что температура металла, нагретого до 3000 К, не влияет на изображения лазерного монитора на основе активной среды на переходах атома меди, при этом расчетная энергия засветки, соответствующая данной температуре, в 10^4 – 10^5 раз меньше собственных шумов усилителя яркости.

2. Показана возможность использования усредненной яркости пикселей и коэффициента корреляции изображений лазерного монитора для получения количественной информации о продолжительности стадий горения, количестве стадий, интервале между стадиями, динамике изменения поверхности.

3. Установлено отличие в радиальном распределении двухпроходowego излучения усилителя яркости на парах бромида меди при распространении параллельного пучка и пучка, сформированного оптическими элементами лазерного монитора, в рабочем диапазоне температур контейнеров с бромидом меди (455–560 °С) при расстояниях до объекта наблюдения до 4 м.

4. Установлена закономерная связь контраста изображений поверхности нанопорошков металлов в бистатическом лазерном мониторе с интенсивностью независимой подсветки до 9,6 мВт/мм².

5. Показано, что дальность наблюдения с использованием лазерного монитора определяется размерами агломератов, образующихся в процессе горения.

6. Установлены закономерности изменения коэффициента отражения поверхности на различных стадиях горения нанопорошка алюминия, смесей порошков наноAl+микроAl и наноAl+Fe₂O₃.

7. Визуализация поверхности с использованием лазерного монитора показала, что горение термитных смесей TiO₂+наноAl+C, ZrO₂+наноAl+C и Nb₂O₅+наноAl+C протекает по механизму «твердое тело → газ», минуя жидкую фазу.

Практическая значимость работы:

1. Лабораторные установки и методики на основе лазерных мониторов позволяют исследовать временные параметры и режимы горения нанопорошков металлов и их смесей с временным разрешением до 0,8 нс и пространственным разрешением до 5 мкм (защищены патентами РФ на изобретение № 2712756 от 31.01.2020, № 2685040 от 16.04.2019, № 2687308 от 13.05.2019).

2. Аппаратная реализация оценки средней яркости изображений лазерного монитора с помощью быстродействующих фотодиодов (защищена патентом РФ на изобретение № 2685072 от 16.04.2019) дает количественную информацию об изменениях поверхности образца во время горения до проведения постобработки изображений, что актуально для оптимизации эксперимента.

3. Визуализация поверхности тонких слоев нанопорошков металлов с использованием лазерного монитора позволяет наблюдать *in situ* неоднородность распространения горения по поверхности образца и образование продуктов горения и участков с частичным прогоранием.

4. Показана возможность реализации двухканального источника накачки усилителей яркости на парах бромидов меди на основе одного импульсного преобразователя и обеспечения импульсного заряда двух накопительных емкостей величиной до 1000 пФ до напряжения 6,2 кВ при стабильной работе двух газоразрядных трубок малого и среднего активного объема как в составе двухканального, так и бистатического лазерных мониторов.

5. Совместное использование лазерного мониторинга и лазерной подсветки в составе одного диагностического комплекса позволяет исследовать неоднородности процесса горения нанопорошков металлов и ВЭМ на их основе.

6. Двухканальный лазерный монитор дает возможность наблюдения в двух областях образца одновременно или в одной области с различным увеличением и пространственным разрешением.

7. Продемонстрирована эффективность использования метода лазерной спекл-корреляции для дистанционного исследования изменений поверхности объекта, экранированной светящимся слоем.

8. Предложенная аппаратно-программная реализация метода лазерной спекл-корреляции применима для полевых исследований и технологического контроля высокотемпературных процессов.

Методология и методы диссертационного исследования:

Принцип работы лазерного монитора заключается в освещении поверхности объекта исследования усиленным спонтанным излучением активной среды на парах бромида меди, последующем усилении отраженного от поверхности излучения и проецировании усиленного излучения на матрицу скоростной видеокамеры. В связи с этим лазерный мониторинг считается активным методом исследования, сочетающим в себе оптическую микроскопию с лазерной подсветкой, усиление яркости и скоростную видеорегистрацию. Методы, основанные на лазерной подсветке, в том числе метод лазерных спеклов, также являются активными методами исследования, так как скоростной камерой регистрируется не собственное свечение, а отраженное от поверхности излучение внешнего источника. При использовании импульсной подсветки применялся моноимпульсный режим регистрации с экспозицией, равной длительности импульса лазерного излучения. Прямая видеорегистрация горения с применением нейтральных и полосовых светофильтров и регистрация яркости свечения фотодиодами являются пассивными методами исследования. Перечисленные методы являются основными при построении систем визуализации, представленных в диссертационном исследовании.

Основным подходом при исследовании усиления активных сред являлась регистрация профиля двухпроходowego усиления путем использования в качестве объекта исследования зеркального отражателя. Ход лучей в такой системе задается формирующими изображение оптическими элементами.

Исследование электрических параметров схем накачки осуществлялось с использованием стандартных высоковольтных щупов, датчиков тока и цифровых осциллографов. Средняя мощность лазерного излучения измерялась современными полупроводниковыми и тепловыми датчиками. Яркость свечения оценивалась с использованием быстродействующего фотодиода и осциллографа.

Обработка результатов измерений осуществлялась в пакетах программ Matlab, Origin, Microsoft Excel.

Исследования характеристик и свойств исходных порошков металлов и продуктов сгорания выполнены с использованием комплекса современных экспериментальных физико-химических методов анализа, применяемых в материаловедении: лазерный дифракционный анализ распределения частиц по размеру (ЦКП НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ), дифференциальный термический анализ (ЦКП «Физико-химические методы анализа» ТПУ), микроскопия высокого разрешения, рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ (Томский материаловедческий ЦКП ТГУ), дифрактометрия (СЦСТИ Института ядерной физики Г.И. Будкера СО РАН). Для оценки температуры объектов исследования применялась ИК-камера.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методики исследования поверхности горящих нанопорошков металлов на основе лазерных мониторов и аппаратура для их реализации с временным разрешением до 0,83 нс и экспозицией 20–35 нс позволяют оценивать скорость распространения волн горения до 9,6 м/с, стадийность, индукционный период, ширину и форму видимого фронта волны горения, анализировать появление продуктов горения с разным коэффициентом отражения и разным фазовым состоянием.

2. С использованием лазерного монитора на парах бромида меди возможно проводить качественный и количественный (распределение яркости, средняя яркость изображений, коэффициент корреляции изображений) анализ динамики процессов горения высокоэнергетических порошковых материалов (на расстоянии до 0,5 м), в том числе с перемещаемой областью наблюдения.

3. Применение усилителей яркости на парах бромида меди малой мощности, формирующих уровень освещения объекта не более 130 мВт/мм², обеспечивает качество изображений лазерного монитора, достаточное для визуального анализа поверхности легковоспламеняющихся нанопорошков металлов и точность оценки изменения коэффициента отражения поверхности горящего образца нанопорошка

металла в режиме реального времени не хуже 5,3 %.

4. Метод корреляции изображений лазерного монитора в сочетании с анализом средней яркости изображений лазерного монитора и визуальным наблюдением позволяет количественно оценивать продолжительность стадий горения нанопорошка металла и сравнивать характер протекания различных стадий горения, время изменения которых находится в пределах разрешающей способности аппаратуры.

5. Лазерная подсветка на основе двухпроходового усиления при уровне освещения поверхности 5,2–8,5 мВт/мм² на длине волны 510,6 нм в лазерном мониторе на парах бромида меди обеспечивает увеличение контрастности изображений поверхности нанопорошка металла до 50 %.

6. Введение дополнительного канала регистрации изображений отдельной видеокамерой с установленным светофильтром на длину волны излучения лазерного монитора 510,6 нм в бистатический или двухканальный лазерный монитор позволяет одновременно исследовать характер горения как в области лазерного инициирования, так и при распространении волны горения по образцу.

7. Неоднородность усиления в центре газоразрядной трубки до 50–75 % выравнивается в пучке излучения усилителя яркости, несущем изображение, что позволяет эксплуатировать газоразрядную трубку усилителя яркости в лазерном мониторе практически до полной выработки рабочего вещества и наблюдать объекты в моностатическом лазерном мониторе на расстоянии до 2 м.

8. Метод лазерной спекл-корреляции за счет высокой спектральной яркости позволяет дистанционно (не менее 5 м) анализировать характер протекания горения нанопорошков металлов и определять скорость прохождения волн горения и время стадий горения.

Достоверность результатов работы. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, не противоречат основным законам физики и химии, обеспечиваются воспроизводимостью экспериментальных данных, использованием современной регистрирующей аппаратуры и программного

обеспечения, согласием результатов измерений, выполненных различными методами и средствами, и непротиворечивостью опубликованным ранее результатам других авторов. Для верификации разработанных методов применялись следующие общенаучные методы: прямая визуализация, в том числе с использованием скоростной видеорегистрации; тепловидение; термография; элементный анализ; микроскопия; рентгенофазовый анализ; применение стандартных электроизмерительных приборов и методов измерения электрических и оптических величин; применение современных программных средств обработки изображений.

Личный вклад автора. Автором диссертации осуществлялись: постановка задач, разработка методов и методик проведения исследований, анализ полученных расчетных и экспериментальных данных, составивших основу защищаемых положений.

На основном этапе работ по диссертации, в 2014–2021 гг., под руководством автора диссертации или при его непосредственном участии были разработаны оптические схемы экспериментов, электрические схемы накачки, лабораторные макеты оптических систем скоростной визуализации высокотемпературного горения нанопорошков металлов, проведены экспериментальные исследования, обработаны экспериментальные и расчетные данные, подготовлены публикации.

На начальном этапе работ по диссертации, в 2006–2014 гг., постановка задач исследования осуществлялась совместно с заведующим кафедрой промышленной и медицинской электроники ТПУ Г.С. Евтушенко и заведующим лабораторией квантовой электроники ИОА СО РАН В.О. Троицким.

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (г. Москва, 2020 г.), 38th International Symposium on Combustion (Аделаида, Австралия, 2021 г.), The Annual Conference «Saratov Fall Meeting» (г. Саратов, 2018, 2020 гг.), VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием

«Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (г. Красноярск, 2019 г.), Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров – AMPL (г. Томск, 2007–2019 гг.), 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019, г. Севастополь, 2019 г.), International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices – EDM (ЗСОЛ НГТУ «Эрлагол», п. Чемал, 2019 г.), 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019, г. Томск, 2019 г.), VX Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2019» (г. Новосибирск, 2019 г.), Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) in Shanghai (Китай, 2016 г.), St. Petersburg (Россия, 2017 г.), Toyama (Япония, 2018 г.), NDE 2017 Conference & Exhibition of the society for NDT (Ченнаи, Индия, 2017 г.), Международная научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 2016 г.), Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (п. Катунь, 2011, 2015 гг.), Симпозиум “Лазеры на парах металлов” (г. Лоо, 2006–2012 гг.).

Разработанное в ходе выполнения диссертационной работы лабораторное оборудование и методики используются в учебном процессе при подготовке магистрантов и аспирантов ТПУ.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 32 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых Scopus или Web of Science, 18 статьях в рецензируемых российских журналах из списка ВАК, 19 статьях в сборниках трудов конференций. Получены 9 патентов РФ и 2 свидетельства на регистрацию программы для ЭВМ. По теме работы опубликованы 2 монографии. Общее количество публикаций по теме диссертации (не включая тезисы докладов) – 82.

Структура и краткое содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы, приложения. Объем диссертации составляет 383 страницы, включает 222 рисунка, 18 таблиц, 389 библиографических источников.

Благодарности. Автор диссертации выражает благодарность за содействие в проведении исследований и обсуждение экспериментальных результатов сотрудникам ТПУ: д.ф.-м.н., проф. А.П. Ильину, д.т.н., проф. Г.С. Евтушенко, к.т.н. С.А. Янковскому, к.ф.-м.н. М.С. Кленовскому, к.т.н. Е.Ю. Буркину, В.В. Свиридову, к.т.н. А.О. Чулкову, и сотрудникам ИОА СО РАН: к.ф.-м.н. Д.В. Шиянову, д.ф.-м.н. А.И. Федорову, В.Б. Суханову, В.Ф. Федорову, студентам и аспирантам ТПУ: Линь Ли, Ю.Д. Люшневской, А.С. Молдабекову, П.А. Антипову, а также руководству Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий ТПУ за поддержку направления исследований.

Автор глубоко признателен своей семье за понимание и всестороннюю поддержку работы.

Глава 1. Методы и аппаратура для исследования высокотемпературных процессов

1.1. Активные среды на парах металлов

Источник света – лазер или усилитель яркости – является основой оптической системы. Стабильность его мощности генерации, усиления, равномерность профиля излучения, длины волны и других характеристик обеспечивают требуемые функциональные возможности оптической системы и влияют на качество визуализации и точность измерений.

Лазеры на парах металлов и усилители яркости на их основе являются источниками монохроматического света и имеют уникальные преимущества в сфере экспериментальной физики и измерений. Благодаря тому, что активная среда лазеров на парах металлов газовая, они имеют большой коэффициент усиления и хорошее качество пучка, а также присущую газовым лазерам узость ширины линии излучения и высокую стабильность ее положения на шкале частот. Наилучшими энергетическими и эксплуатационными характеристиками среди лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов обладают лазеры на парах меди и ее соединений, генерирующие оптическое излучение в видимой области спектра (510,6 и 578,2 нм) [1–8]. Такие источники когерентного излучения сочетают в себе малую длительность импульса излучения (10–50 нс), высокую частоту следования (до 100 кГц и более), большую среднюю (сотни ватт) и импульсную (10–1000 кВт) мощности, а также высокий для газовых лазеров КПД ≥ 1 %.

Большая часть проблем, связанных со сроком службы активных элементов традиционных лазеров на парах меди (ЛПМ), обусловлена высокими рабочими температурами ~ 1800 К. Идея о возможности снижения рабочей температуры ЛПМ была впервые высказана Уолтером и др. [9]. Она заключалась в использовании медьсодержащих быстро испаряющихся соединений в качестве доноров рабочего вещества. Наиболее подходящими соединениями являются галогениды. Давление паров бромида, хлорида и йодида меди, достаточное для генерации, достигается

при температурах 720, 670 и 870 К, соответственно. Это позволяет использовать при изготовлении активных элементов более дешевые материалы, такие как кварц. В ходе практической реализации среди лазеров на парах галогенидов металлов лучше всего зарекомендовали себя лазеры на парах бромида меди. Монографии [10, 11] посвящены обзору работ в области лазеров на парах галогенидов металлов, в том числе с высокими частотами следования.

Характеристики лазеров на парах меди и бромида меди во многом зависят от конструкции активных элементов, состава газовой смеси и условий возбуждения. При изготовлении газоразрядных трубок (ГРТ) необходимо уделять особое внимание чистоте используемых материалов. Это определяется агрессивным характером газовой среды (особенно при наличии добавок) и высокой рабочей температурой, необходимой для создания требуемой концентрации паров рабочего вещества. Другой важной задачей является оптимизация условий возбуждения, которая во многом определяется типом и параметрами применяемой схемы накачки. Для получения эффективной генерации необходимо формировать импульс напряжения с крутым передним фронтом, а импульс тока должен обрываться после окончания импульса генерации [12, 13]. При этом чем выше напряжение «пробоя» активной среды, тем выше эффективность генерации.

За время развития лазеров на парах металлов, с момента получения генерации на самоограниченных переходах в 1965 г. [14, 15], произошел значительный прогресс как в направлении совершенствования конструкций ГРТ, так и в схемотехнике источников накачки активных сред. В то же время задача разработки надежного, долговечного и стабильного лазера (усилителя яркости) на парах металла является актуальной до настоящего времени.

Основным недостатком ЛПМ, снижающим эксплуатационные характеристики, является высокая рабочая температура, которую необходимо поддерживать в активном объеме для обеспечения существования паров металлов. Важно отметить, что решающую роль в этой связи играют не очевидные дополнительные энергозатраты, приводящие к снижению полного КПД лазера, а способ поддержания

требуемого теплового режима.

Одной из наиболее распространенных в настоящее время конструкций ЛПМ является «саморазогревная». Суть саморазогрева состоит в том, что энергия, вкладываемая в разряд, используется и для создания рабочей температуры (для создания необходимого давления паров металла) в активном объеме, и для возбуждения лазерных уровней рабочих атомов. Разработанный сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР в 1972 г. ЛПМ [16], работающий в саморазогревном режиме, стал существенным прорывом в направлении создания ЛПМ для практических применений и получил внедрение в промышленность [6]. В конструкции такого лазера нагревательная печь отсутствует, а рабочая температура ГРТ достигается за счёт энергии импульсного разряда, который одновременно возбуждает лазерные уровни. Для высокотемпературных лазеров на парах металлов это техническое решение позволило обеспечить устойчивый режим генерации (усиления) и повысить ресурс активных элементов. Саморазогревный режим работы успешно применялся и для лазеров на парах бромида меди (ЛПБМ) [17]. В то же время этот режим имеет следующие недостатки.

Концентрация рабочих атомов, а значит, и мощность генерации, зависит от средней мощности, вкладываемой в разряд, поэтому сравнительно небольшое изменение последней за счет изменения импульсного энерговклада или частоты следования импульсов (ЧСИ) будет приводить к значительному изменению мощности генерации, обусловленному перегревом либо недогревом рабочего объема. Это означает, что оперативное управление режимом генерации в саморазогревных лазерах практически невозможно.

Поскольку значительная энергия накачки расходуется на поддержание рабочей температуры ГРТ, требуется достаточно мощный источник высоковольтных импульсов, что ограничивает практическое использование саморазогревных ЛПМ. Дорогостоящим и недолговечным элементом современных источников накачки ЛПМ являются мощные газоразрядные коммутаторы, среди которых в России практически единственными подходящими были и остаются тиратроны ТГИ1 (или 2)

1000/25 или аналогичные [18, 19]. К сожалению, средняя мощность, которую эти тиратроны способны надежно коммутировать, ограничена ~ 2 кВт. Это значение определяет максимальную мощность (10–15 Вт при КПД 0,5–0,7 %) лазеров на парах меди российского производства. Ученые, разработчики и производители лазеров на парах меди, стремясь увеличить мощность прибора, эксплуатируют коммутаторы в режимах, близких к максимальным, что является основной причиной ненадежности и нестабильности современных лазеров на парах меди.

Одним из путей увеличения частотно-энергетических характеристик лазеров на парах металлов является модификация кинетики их активной среды за счет использования галогеноводородных примесей [20–24]. В зависимости от типа лазера в рабочую зону подаются молекулы HBr или HCl, либо в чистом виде, либо образуются за счет использования водородсодержащих добавок. Активная добавка приводит к увеличению мощности излучения в 2–3 раза по сравнению с обычным лазером на парах меди. В лазере на парах бромида меди применяют добавки HBr (или H_2 , который реагирует в разряде с бромом и образует молекулы HBr). В этом случае достигается двукратное (и более) увеличение выходной мощности и КПД лазера [25–27]. Тем не менее и сегодня остается актуальной задача поиска новых водородсодержащих примесей, способных эффективно влиять на энергетику лазеров на парах металлов. В работе [28] нами исследовалась возможность использования метана в качестве добавки в ЛПБМ. На основании экспериментальных исследований частотно-энергетических характеристик CuBr+Ne+CH₄-лазера в сравнении с CuBr+Ne+H₂- и CuBr+Ne+HBr-лазерами сделан вывод о схожести механизма влияния добавки метана с влиянием водорода или бромоводорода.

Параметры источника накачки активного элемента на парах металла, в частности на парах бромида меди, определяются назначением активного элемента и требованиями к его энергетическим характеристикам. При работе активного элемента в составе технологического лазера (микрообработка материалов, лазерная резка, лазерное инициирование горения) режим работы, как правило, определяется максимальной мощностью генерации и минимальной расходимостью лазерного

пучка. В этом случае схема накачки оптимизируется с целью получения максимальной мощности генерации. При работе в составе лазера подсветки в диагностических задачах максимальная мощность генерации не является целевым параметром и режим работы может быть оптимизирован с целью увеличения срока службы активного элемента или источника накачки. При работе активного элемента в составе лазерного монитора вопрос оптимальной мощности генерации и мощности накачки на данный момент остается открытым и требует уточнения для каждого конкретного применения. Основными критериями выбора режима работы усилителя яркости являются: средняя мощность сверхизлучения, диаметр пучка и радиальное распределение усиления, которые определяют воздействие на объект наблюдения, с одной стороны, область наблюдения и качество изображений, с другой стороны.

Наиболее простой и широко применяемой схемой накачки активной среды на парах металлов является схема прямого разряда накопительного конденсатора и её модификации [1–8]. Для повышения энергетических характеристик лазеров на парах металлов применяются схемы удвоения напряжения, схемы с импульсным трансформатором, схемы с магнитным сжатием импульса [5, 6, 29–46]. Линии магнитного сжатия позволяют применять также полупроводниковые коммутаторы [42–46]. Функцией коммутатора является передача энергии от источника питания в формирующую линию, а формирование требуемых временных характеристик импульса накачки осуществляется звеньями магнитного сжатия импульса.

В последнее время в блоки накачки лазеров на парах металлов внедряются схемы с импульсным зарядом накопительной емкости, обеспечивающие благоприятный режим работы коммутатора, повышающие его стабильность и надежность работы и увеличивающие срок службы [47–51]. В таких схемах заряд накопительной емкости начинается не сразу после разряда, как в традиционной резонансной схеме, а спустя некоторое время, что обеспечивает более полное восстановление электрической прочности тиратрона и снижает вероятность его неконтролируемого пробоя.

1.2. Лазерные проекционные системы на основе активных сред на парах металлов

1.2.1. Лазерный проекционный микроскоп

Саморазогревный лазер на парах меди, разработанный в 1972 г. сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР [16], послужил основой еще одного знакового изобретения – лазерного проекционного микроскопа [52]. Учитывая, что генерация в парах галогенидов меди была получена только в 1973–1976 гг. [53–56], саморазогревная активная среда на парах меди на тот момент являлась фактически единственной усиливающей средой, подходящей для практического применения в активных оптических системах с усилением яркости. Обзор работ по усилителям яркости и лазерным проекционным микроскопам достаточно полно представлен в монографиях [57, 58].

На рисунке 1.1 приведена схема первого лазерного проекционного микроскопа и изображение, полученное с его использованием. Работа [52] показала не только принципиальную возможность реализации лазерного проекционного микроскопа на основе активной среды на самоограниченных переходах в парах металлов, но и возможность получения высокого пространственного разрешения.

В работах [59–61] рассматриваются основные принципы построения оптических систем с усилителями яркости и отмечаются перспективы использования таких систем для диагностики поверхности, в дефектоскопии и микроэлектронике, микробиологии и других приложениях. К активным средам, применяемым в качестве усилителей яркости в активных оптических системах, предъявляется ряд требований [59–62]:

- оптическая среда квантового усилителя должна быть оптически однородной для того, чтобы усилитель не вносил искажений в передаваемую информацию;
- один проход излучения должен обеспечивать высокое усиление, достаточное для обеспечения высокой яркости изображения при большом увеличении;
- геометрические размеры и угловая апертура усилителя должны обеспечивать

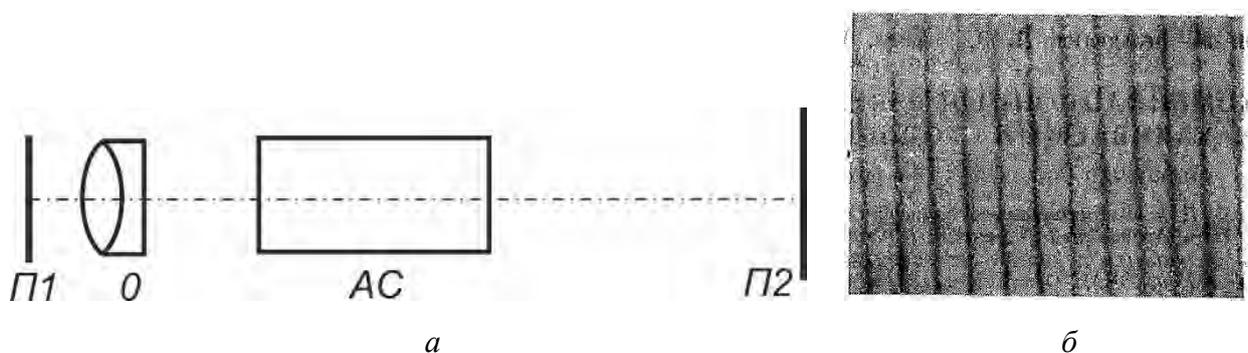
прохождение световых пучков без потерь оптической информации;

- усилитель должен работать в импульсном режиме с высокой частотой следования импульсов;

- выходная мощность усилителя должна быть достаточной для практического использования;

- длины волн усиления должны находиться в видимом диапазоне спектра для непосредственного визуального наблюдения;

- активная среда должна обладать высокой эффективностью и работать в режиме, близком к режиму насыщения.



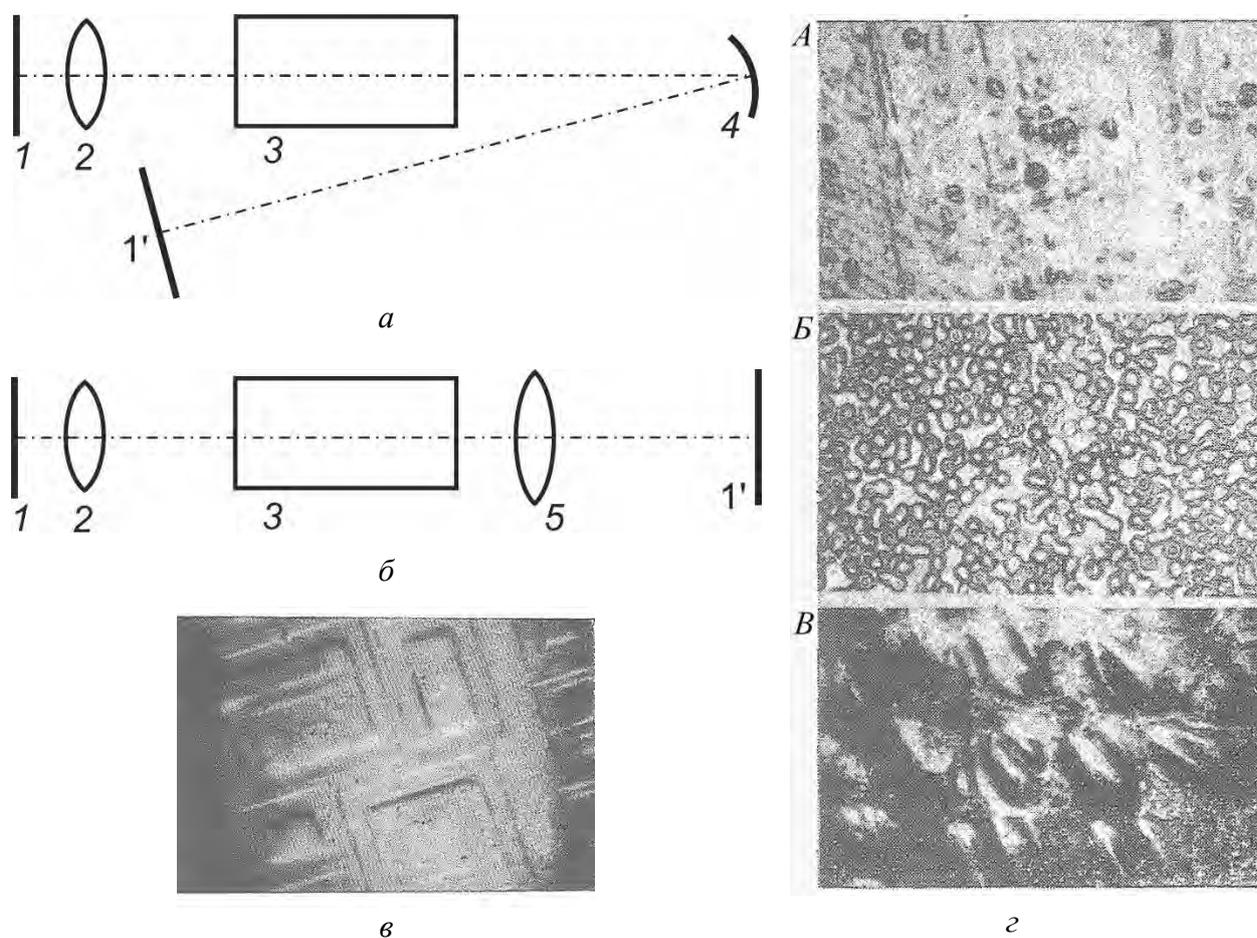
П1 – плоскость предмета; *П2* – плоскость изображения; *АС* – активная среда; *O* – объектив

Рисунок 1.1 – Схема лазерного проекционного микроскопа (*a*) и изображение объекта – микрометра с расстоянием между штрихами 10 мкм (*б*) [52]

Наиболее полно этим требованиям соответствуют активные среды на самоограниченных переходах в парах меди, свинца, марганца, бария, золота [62–66]. В качестве активных сред могут использоваться как чистые металлы, так и их галогениды, в частности галогениды меди [67, 68].

В работе [62], кроме схемы на рисунке 1.1, содержащей один формирующий изображение элемент (объектив *O*), предлагаются еще две схемы, которые содержат оптические элементы, проецирующие изображение на экран: вогнутое зеркало 4 для увеличения изображения и проецирования его в нужном направлении (рисунок 1.2, *a*), линза 5 для получения прямого увеличенного изображения (рисунок 1.2, *б*). В работе показана возможность получения визуально четких изображений

различных поверхностей микрообъектов с пространственным разрешением до 1,3 мкм, а также приводятся результаты оценки коэффициента усиления. Продемонстрировано, что для усилителей яркости на основе активных элементов на парах меди характерна высокая спектральная яркость и высокий коэффициент усиления активной среды (до 16000), что дает возможность использовать их в проекционных системах для формирования увеличенного по размерам и усиленного по яркости изображения на большом экране.



A – поверхность ниобия; *B* – мазок крови; *B* – клетки водоросли; 1 – плоскость предмета; 1' – плоскость изображения; 2 – объектив; 3 – активная среда; 4 – зеркало; 5 – линза

Рисунок 1.2 – Схемы лазерного проекционного микроскопа (*a*, *б*), изображение участка поверхности интегральной микросхемы (*в*), изображения поверхностей объектов (*г*) [62]

Лазерный проекционный микроскоп является достаточно гибкой системой для построения систем оптической визуализации. Схемы, представленные на рисунках 1.1 и 1.2, по сути, являются базовыми, или традиционными, схемами, на основе

которых возможна разработка более специфичных оптических систем с усилением яркости для решения конкретных задач визуализации. Для исследования непрозрачных объектов, таких как поверхности цельных или порошковых металлов, может использоваться лазерный проекционный микроскоп с традиционной схемой. Для исследования объектов с прозрачностью (коэффициентом пропускания) более 60 % в работе [69] был разработан лазерный проекционный микроскоп, дающий изображение в проходящем свете.

Возможность использования лазерных проекционных систем в качестве микроскопов для задач медицинской визуализации исследовалась в работах [70–72]. Живые клетки, насколько нам известно, являлись первым и единственным объектом, чувствительным к свету, который исследовался с использованием лазерных проекционных систем с усилением яркости на этапе их стремительного развития. В работе [70] отмечаются перспективы использования уникального свойства лазерных сред усиливать световые волны, что открывает широкие возможности для исследователей, такие как возможность изучать живые микроскопические объекты при больших увеличениях, не внося при этом никаких заметных изменений; при непосредственном контроле на большом экране возможность проводить локальные воздействия лазерного излучения. Работы [71, 72] являются первыми работами по применению усилителя яркости на парах меди в составе систем скоростной визуализации для исследования процессов в режиме реального времени. В работе [71] с использованием высокоскоростной фотографической установки ВФУ-1 получены последовательные изображения через 800 мкс, при этом время экспозиции, т.е. длительность импульса излучения усилителя яркости, составляло 10–15 нс. В работе [72] получены последовательные изображения биообъекта с интервалом 100 мкс с использованием кинокамеры СФР-3, что эквивалентно скорости съемки 10 тыс. кадров в секунду при использовании современных скоростных видеокамер. Последовательные изображения позволили различить изменения биообъекта за время между импульсами, формирующими изображения. Поскольку усилитель яркости работал с частотой повторения импульсов 10 кГц, работа [72] фактически показала возможность покадровой

видеорегистрации, т.е. возможность реализации режима работы лазерного проекционного микроскопа, в котором изображение формируется одним импульсом усиленного спонтанного излучения продолжительностью 10–15 нс (для активной среды на парах меди).

1.2.2. Формирование изображений в лазерном проекционном микроскопе

Формирование изображений в лазерном проекционном микроскопе подробно рассмотрено в работах [59–61]. Роль элементов, ограничивающих поле наблюдения лазерного проекционного микроскопа пояснена диаграммой хода лучей, представленной на рисунке 1.3.

Активная среда, во-первых, обеспечивает освещение объекта через объектив. Во-вторых, усиливает пучки света, несущие изображение объекта, сформированное объективом. Согласно схеме (рисунок 1.1), положение апертурной диафрагмы зависит от соотношения диаметров объектива и активной среды усилителя яркости. При выполнении условия

$$\frac{d_0}{d_{AC}} \leq \left(1 + \frac{z}{l}\right) \quad (1.1)$$

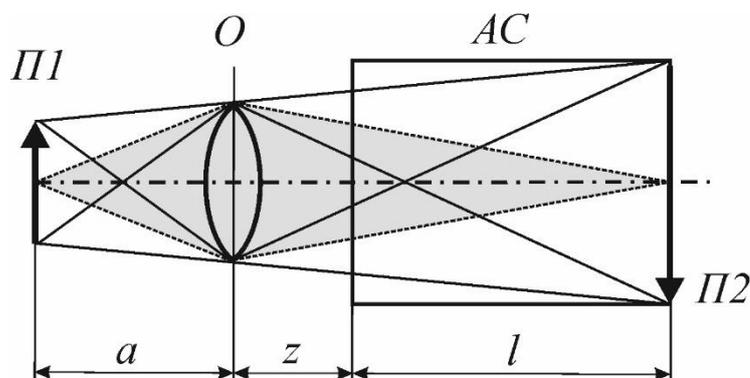
ширина световых пучков ограничивается апертурой объектива, в противоположном случае – диаметром активной среды усилителя яркости; d_0 – диаметр объектива, d_{AC} – диаметр активной среды, z – расстояние от активной среды до объектива, l – длина активной среды. Как показано в [61], в зависимости от применяемого объектива может быть получена различная область зрения лазерного проекционного микроскопа. Согласно представленным в таблице 1.1 данным, разрешающая способность системы определяется объективом. При этом усиливающая среда и другие элементы схемы не ухудшают разрешающую способность системы.

Принципиальным отличием лазерного проекционного микроскопа от обычного проекционного микроскопа является наличие усилителя яркости, установленного на пути пучков, несущих изображение объекта. Усилитель яркости увеличивает интенсивность пучков на выходе системы. При этом усиливающая

среда работает в режиме насыщения [73, 74]. В работе [73] проведено экспериментальное исследование усиления активных сред на переходах атома меди. Зависимости коэффициента усиления от плотности мощности входных сигналов, определенные в этой работе, представлены на рисунке 1.4. Максимальное значение коэффициента усиления на длине волны 510,6 нм в начале диапазона линейного усиления достигает величины порядка 10^{13} – 10^{14} . При тех же условиях переходу к режиму насыщения соответствуют изменения коэффициентов усиления в диапазоне 10^2 – 10^4 , реализующиеся при плотностях мощности внешних сигналов в интервале 1–10 мВт/см². При больших плотностях мощности реализуется режим насыщенного усиления, который является рабочим режимом для лазерного проекционного микроскопа.

Таблица 1.1 – Параметры лазерных проекционных микроскопов [61]

Объектив		Фокусное расстояние, см	Поле зрения, мм	Увеличение	Предел разрешения, мкм
Кратность	Числовая апертура				
1 ^X	0,05	10	2,05	570	5,21
2 ^X	0,07	6,3	1,3	890	3,72
4 ^X	0,1	3,4	0,75	1400	2,61
8 ^X	0,2	1,8	0,55	2100	1,33



AC – активная среда; *O* – объектив; *П1* – область объекта, освещаемая сверхизлучением активной среды; *П2* – изображение объекта на выходе из активной среды

Рисунок 1.3 – Ход пучков света от осевой (затемнена) и крайних точек поля зрения

Насыщение активной среды может приводить к искажению пространственных характеристик сигнала как вследствие различной степени насыщения пучков разной начальной интенсивности, идущих от разных точек усиливаемого изображения, так и из-за взаимодействия этих пучков в нелинейной среде. В работах [75–77] проведены модельные расчеты для различных условий усиления. Для системы с усилителем яркости малой длины ($l \ll \delta^2/\lambda$, где l – длина активной среды, δ – характерный размер поперечной структуры, λ – длина волны усиления) «короткий» усилитель, различные части пучка, несущего изображение, не перемешиваются в усиливающей среде и насыщаются независимо друг от друга [75]. В этом случае насыщение среды приводит к резким изменениям в выходном распределении интенсивности. Для длинной системы ($l > \delta^2/\lambda$) в результате взаимодействия различных частей пучка, которые в этом случае сильно перемешиваются по мере распространения в активной среде, усиленное изображение нарушается в значительно меньшей степени [76]. В работе [77] также теоретически показано, что фоновая засветка на входе усилителя может заметно уменьшать контраст усиленного по яркости изображения.

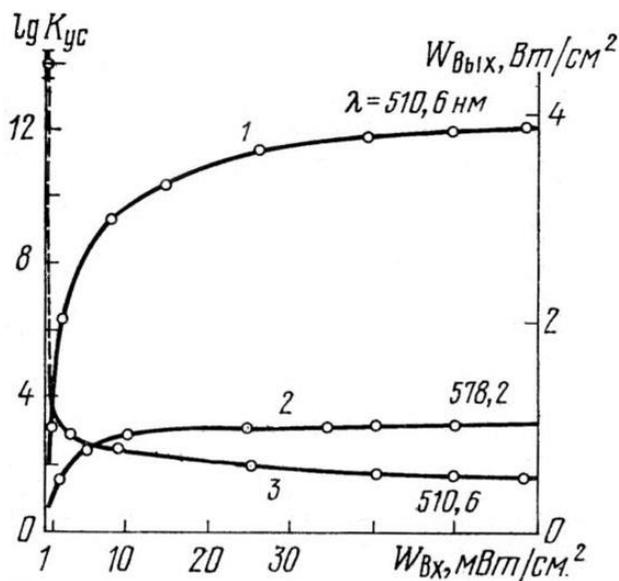
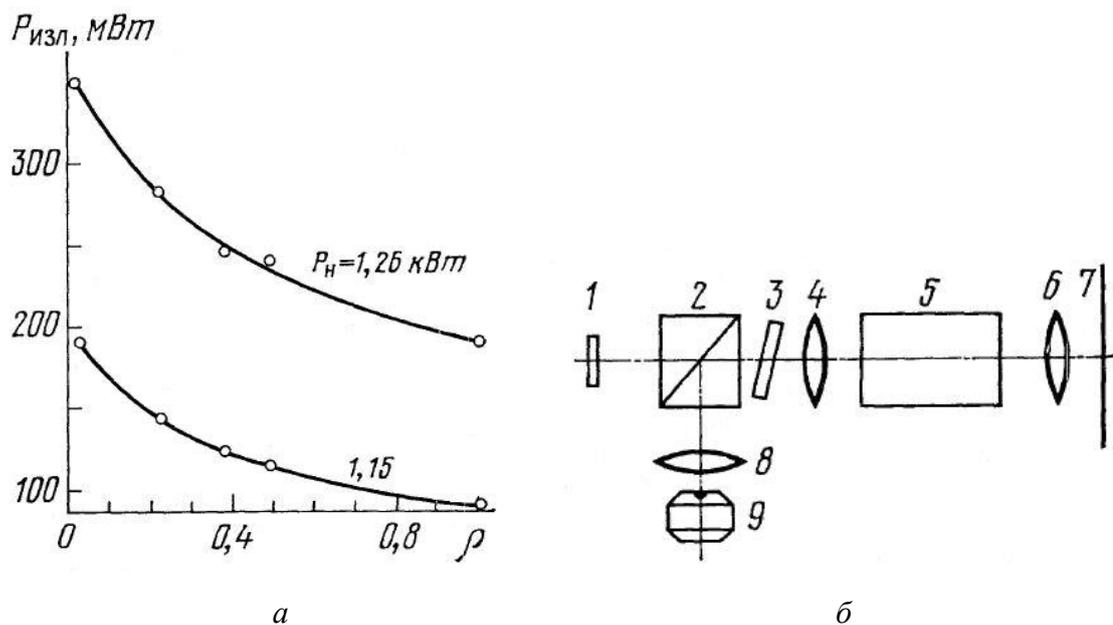


Рисунок 1.4 – Зависимости средней мощности излучения на выходе (1, 2) и коэффициента усиления (3) от плотности мощности сигнала на входе усилителя [73]

Вопрос искажений изображений в системах с усилением яркости экспериментально изучался в работе [74]. Авторами обнаружено, что при увеличении средней мощности входного сигнала выходной сигнал заметно насыщается, при этом контраст усиленного изображения растет с ростом входного сигнала, а максимальный контраст близок к контрасту не усиленного изображения. При малых входных сигналах контраст усиленного изображения намного ниже исходного, что объясняется наличием фона, обусловленного паразитными отражениями от элементов схемы, который больше фона спонтанного излучения. Важным выводом с точки зрения эксплуатации усилителей яркости является необходимость минимизации паразитных отражений и рассеяния в оптических элементах схемы и, по возможности, уменьшения дополнительных элементов, таких как светоделительные пластинки, поворотные зеркала, фильтры.



1 – объект (полированный металлический образец); 2 – светоделитель; 3 – нейтральные светофильтры; 4, 6, 8 – линзы; 7 – экран; 9 – измеритель мощности излучения

Рисунок 1.5 – Зависимости мощности излучения «к объекту» от коэффициента отражения объекта (а) и схема определения этой зависимости (б) [78]

Работа усилителя в режиме насыщения приводит к еще одной особенности, не присущей традиционным оптическим системам – зависимости мощности, освещающей объект, от коэффициента отражения объекта [78]. Представленная на

рисунке 1.5 зависимость мощности излучения «к объекту» от коэффициента отражения объекта показывает, что с увеличением отражения объекта наблюдается увеличение средней мощности излучения, освещающего объект. С одной стороны, этот факт является фактором, усложняющим анализ изображений усилителя яркости. С другой стороны, «саморегуляция» мощности излучения, может быть полезна при исследовании динамики объектов, когда в процессе наблюдения значительно изменяется коэффициент отражения поверхности, например, в ходе химических превращений или модификации поверхности.

1.2.3. Лазерный проекционный микроскоп с усилителем яркости на парах бромида меди

Достоинствами усиливающих сред на парах галогенидов металлов являются низкая рабочая температура и более высокие частоты следования импульсов. При этом их характеристики в качестве усилителей яркости не уступают аналогам на парах чистых металлов. В работе [67] исследованы характеристики усиления активной среды на парах хлорида меди, которые продемонстрировали возможность применения усилителей яркости на парах галогенидов металлов в лазерных проекционных микроскопах. Недавние работы [79, 80] показывают сохранившийся интерес к этой среде для использования в активных оптических системах с усилителями яркости. Активные среды на парах галогенидов марганца, железа и других металлов представляют интерес с точки зрения создания многоцветного лазерного монитора [81–84]. Тем не менее надежные, удобные в эксплуатации и менее критичные к условиям накачки активные среды на парах бромида меди являются на сегодня наиболее привлекательными для практического использования в задачах визуализации.

Впервые активная среда на парах бромида меди применялась в качестве усилителя яркости в лазерной проекционной системе в работе [68]. В работе [68] также впервые исследовалось влияние активной добавки H_2 на радиальное распределение излучения. Ранее положительное влияние добавки H_2 на энергию

генерации и КПД CuBr-лазера было показано в работе [26]. На рисунке 1.6 показаны радиальные распределения интенсивности в пучках сверхсветимости активной среды на парах бромида меди с добавками и без добавок водорода и распределение эффективного усиления по поперечному сечению активного элемента. Как следует из представленных на рисунке 1.6 данных, добавка H_2 позволяет выровнять радиальное распределение излучения в пучке усилителя яркости (исчезает провал усиления в осевой области), что представляет интерес с точки зрения получения изображения с более равномерным распределением интенсивности. Результаты визуализации микрообъектов с использованием разработанного авторами [68] усилителя яркости, которые демонстрируют визуальную высокую четкость изображений лазерного проекционного микроскопа на основе активной среды на парах бромида меди, показаны на рисунке 1.7.

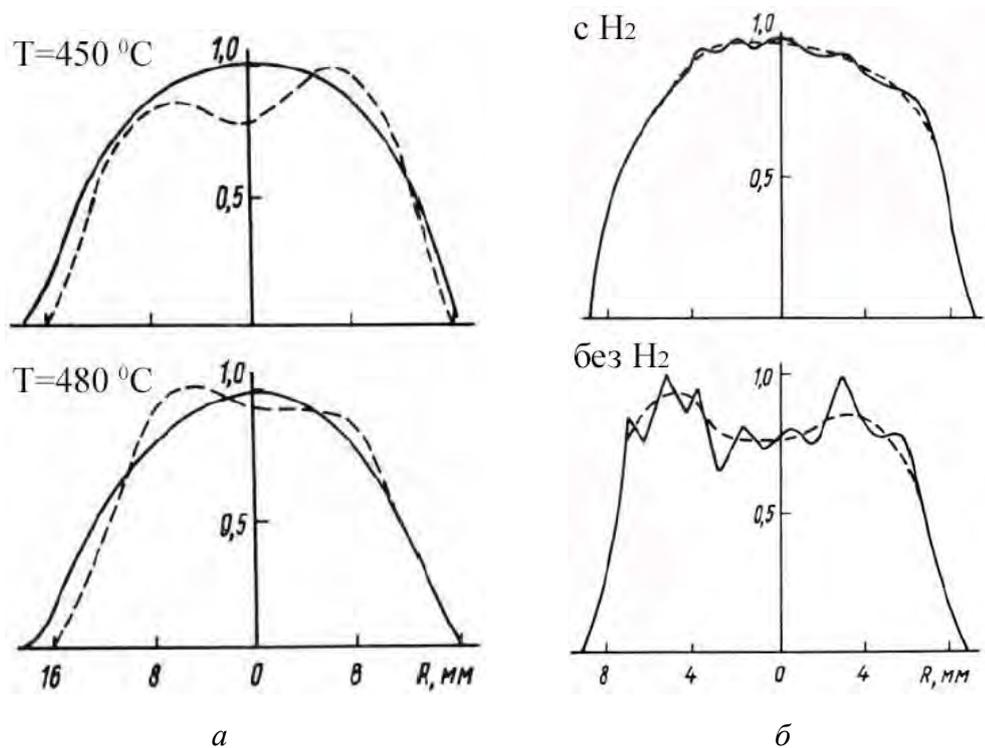


Рисунок 1.6 – Распределение интенсивности в пучках сверхсветимости для различных температур печей нагревателей CuBr (а) с добавками (сплошная линия) и без добавок водорода (пунктир); распределение эффективного усиления (б) при температуре печей 450 °С (сплошная линия – сигнал с самописца, пунктир – усреднённое значение) [68]

В работе [68] отмечается актуальность применения дистанционных схем визуализации для решения задач науки и техники. В этой связи активная среда на парах бромида меди имеет преимущество по отношению к активной среде на парах меди, которое заключается в большей длительности существования инверсии, что дает возможность реализации схем наблюдения объектов, удаленных от усилителя на несколько метров. Авторы предлагают использовать для наблюдения удаленных объектов схемы, представленные на рисунке 1.8, на основе одной длиннофокусной линзы (а) и телескопических систем линз (б, в).

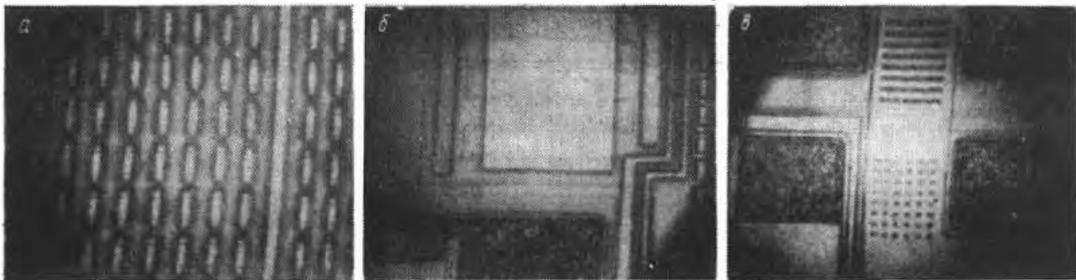
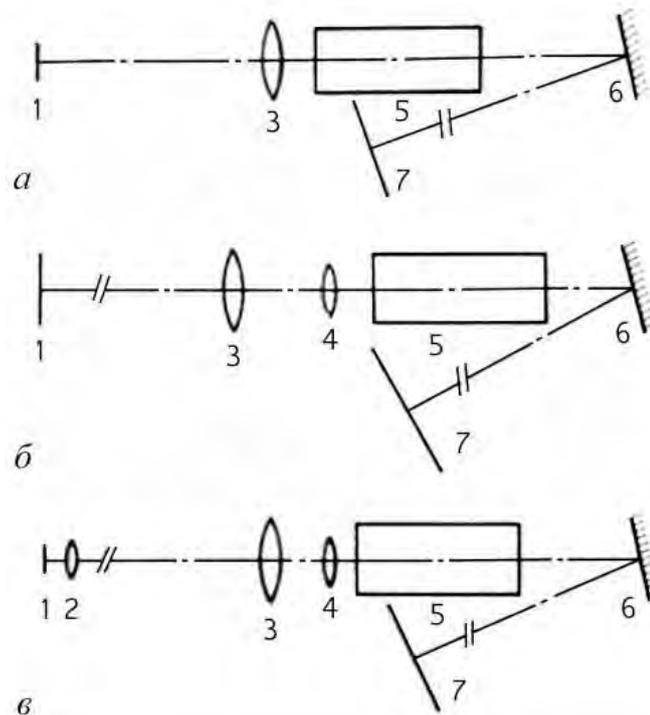


Рисунок 1.7 – Изображения участков интегральной микросхемы [68]



1 – объект; 2–4 – линзы; 5 – усиливающая среда; 6 – зеркало; 7 – экран

Рисунок 1.8 – Оптические схемы с усилителем яркости для наблюдения удаленных объектов [68]

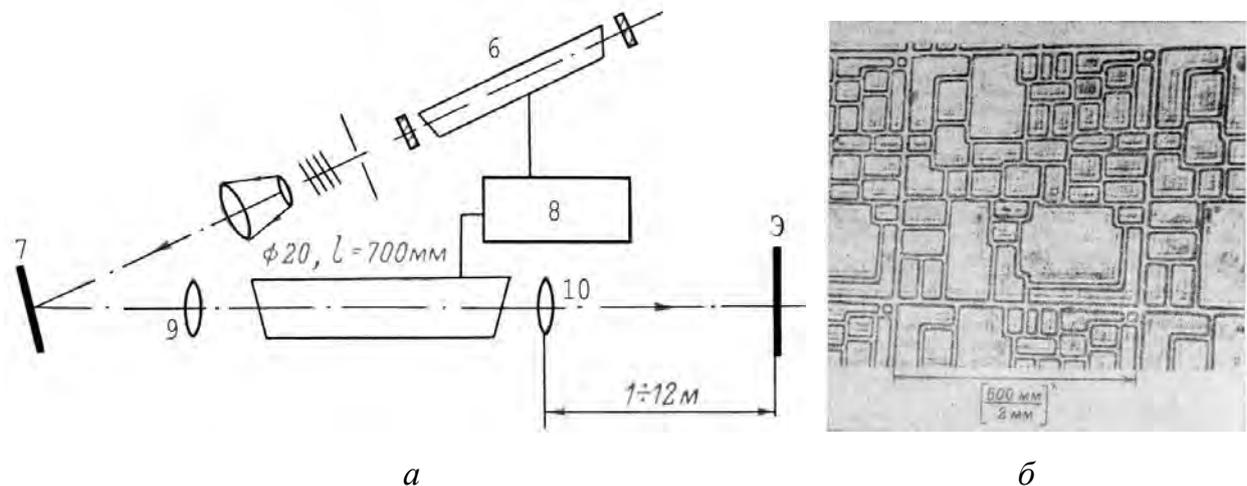
1.2.4. Лазерный проекционный микроскоп с двумя активными элементами

Лазерный проекционный микроскоп на основе одного усилителя яркости является самосопряжённой системой, в которой объект освещается излучением той же усиливающей среды. В работе [85] для исследования характеристик лазерного проекционного микроскопа использовалась система «задающий генератор – усилитель мощности» (ЗГ-УМ). Систему ЗГ-УМ часто называют МОПА-системой от английской аббревиатуры МОРА (Master Oscillator – Power Amplifier). Такая система позволяет реализовать режимы с независимой подсветкой, позволяющие изменять параметры входного сигнала исследуемого усилителя яркости независимо от его режимов работы. В работе [86] система ЗГ-УМ использовалась для исследования характеристик негативных изображений в схеме лазерного проекционного микроскопа.

В работе [86] рассмотрено практическое использование лазерного проекционного микроскопа с системой ЗГ-УМ. Схема эксперимента и полученное изображение микрообъекта приведены на рисунке 1.9. Авторы этой работы отмечают преимущества лазерного проекционного микроскопа с независимой подсветкой (бистатического) по сравнению с традиционным лазерным проекционным микроскопом, заключающиеся в отсутствии ограничений, которые накладывает сопряженность подсветки и усиления. Независимая подсветка дает возможность реализации дистанционных схем наблюдения и позволяет варьировать освещенность в зависимости от объекта исследования. Последняя особенность является доминирующим фактором при наблюдении объектов, на которые нежелательно воздействовать интенсивным излучением. Применительно к теме диссертационного исследования объектами исследования с использованием бистатической системы могут стать легковоспламеняющиеся нанопорошки металлов и их смеси.

Системы ЗГ-УМ получили серьезное развитие благодаря перспективам достижения высоких мощностей генерации с малой расходимостью излучения для использования в задачах микрообработки материалов и лазерного разделения

изотопов [5, 6, 87–92]. В настоящее время системы ЗГ-УМ продолжают совершенствоваться и исследоваться, находя применение для решения научных и практических задач [51, 93–99].



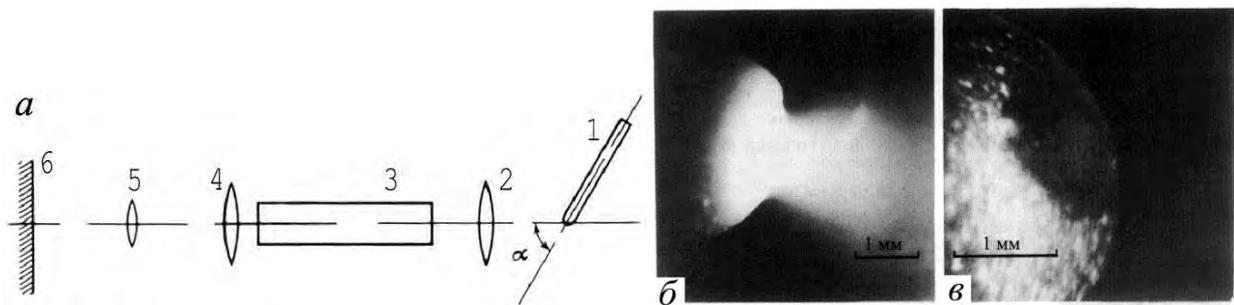
6 – лазер-осветитель; 7 – объект; 8 – блок синхронизации; 9, 10 – линзы; Э – экран
Рисунок 1.9 – Схема лазерного проекционного микроскопа с независимой подсветкой (а) и изображение участка поверхности блока микросхемы (б) [86]

1.2.5. Лазерный монитор для исследования поверхности объектов в условиях интенсивной фоновой засветки

Возможность использования системы генератор–усилитель для микрообработки объектов с одновременным визуальным контролем впервые была показана в работе [100]. Особенностью системы являлось совместное использование усилителя яркости для усиления излучения задающего генератора, освещения обрабатываемого объекта и усиления яркости изображения. Фактически излучение усилителя яркости использовалось и для обработки поверхности, и для ее визуализации. Такая конфигурация давала появление яркого пятна, засвечивающего фотоприемник, в области лазерного воздействия. Полученные результаты показали перспективность использования проекционных систем с усилением яркости для визуализации технологических процессов в целом. Для наблюдения области лазерного воздействия пучки излучения, несущего изображение поверхности и осуществляющего воздействие, должны быть

разнесены во времени, или излучение должно иметь различные длины волн.

Работы [101, 102] фактически являются первыми работами, посвященными проблеме, которая может быть успешно решена с использованием лазерного проекционного микроскопа – это проблема визуализации объектов, экранированных интенсивной фоновой засветкой. На примере дуги постоянного тока показано, что интенсивная фоновая засветка, создаваемая дугой, не является препятствием для визуализации поверхности объекта исследования с использованием лазерного проекционного микроскопа, а «оптические системы с усилителями яркости могут эффективно использоваться для качественного и, по-видимому, количественного анализа оптических характеристик поверхностей, подвергающихся воздействию мощных энергетических потоков и отделенных от наблюдателя слоем ярко светящейся плазмы» [101]. На рисунке 1.10 приведена схема эксперимента и результаты визуализации, полученные в работе [101]. С применением лазерного проекционного микроскопа в работе [102] визуализировалась зона взаимодействия излучения CO_2 -лазера с поверхностью кварцевого образца.

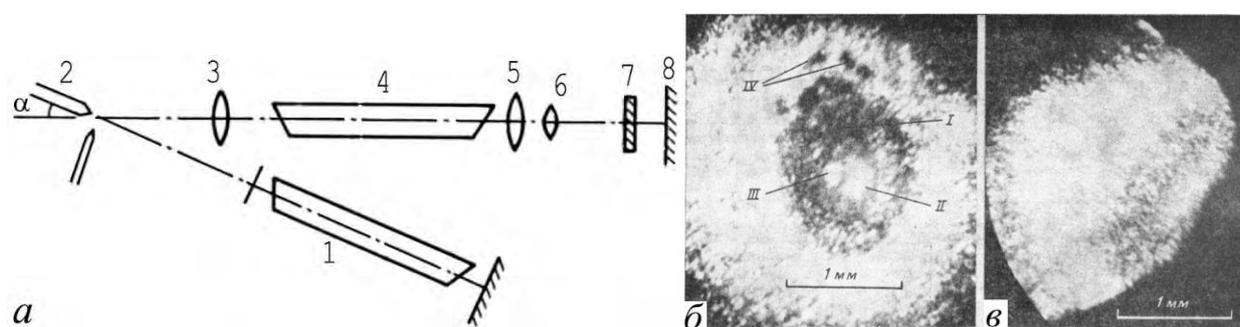


1 – наблюдаемый электрод; 2, 4, 5 – линзы; 3 – усилитель яркости; 6 – экран

Рисунок 1.10 – Схема экспериментальной установки (а) и изображение катода угольной дуги, полученные с помощью обычного (б), и лазерного проекционного микроскопа (в) [101]

В работе [103] научной группой под руководством В.М. Батенина (ИВТАН) применялась система ЗГ-УМ для визуализации графитового катода дуги. На рисунке 1.11 приведены схема эксперимента и результаты визуализации. Из представленных изображений следует, что лазерный проекционный микроскоп с

лазерным осветителем и усилителем яркости, как и лазерный проекционный микроскоп без осветителя, может применяться для визуализации объектов сквозь ярко светящуюся плазму. Применение лазерного осветителя дает значительное повышение контраста изображений. Несмотря на то, что изображения, представленные на рисунке 1.11, не позволяют сделать вывод о преимуществах схемы с лазерным осветителем для наблюдения поверхности углеродных электродов, бистатическая схема может быть полезна для исследования других поверхностей.



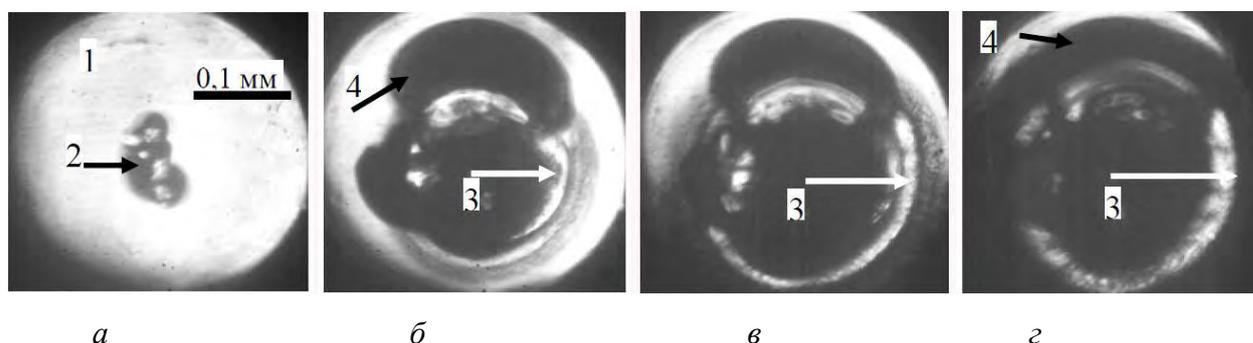
1 – лазер-осветитель; 2 – наблюдаемый электрод; 3, 5, 6 – линзы; 4 – усилитель яркости;
7 – фильтр; 8 – экран

Рисунок 1.11 – Схема экспериментальной установки (а) и изображения катода угольной дуги, полученные под углом $\alpha=0^\circ$ (б) и $\alpha=90^\circ$ (в) [103]

В работе [104] авторы реализуют визуализацию процесса сварки оптоволокон. Ключевой модификацией схемы лазерного проекционного микроскопа является внедрение цифровой камеры и персонального компьютера, которые позволили анализировать не фотографические изображение, а цифровой видеоряд. Можно сказать, что применение цифровых камер для регистрации изображений лазерного проекционного микроскопа стало новым этапом в развитии систем визуализации на основе усилителей яркости на парах металлов. Продолжалось расширение области использования лазерных проекционных систем на основе активной среды на парах меди. В частности, лазерный проекционный микроскоп с телевизионной системой регистрации и компьютерной обработкой изображений получил практическое использование для исследования лазерной обработки металлов и обрел новое название – лазерный монитор [105–108]. Компьютерный анализ

последовательности кадров видеосъемки дал возможность ученым исследовать динамику процессов путем сравнения различных кадров между собой, в частности анализировать яркость изображений [106–108].

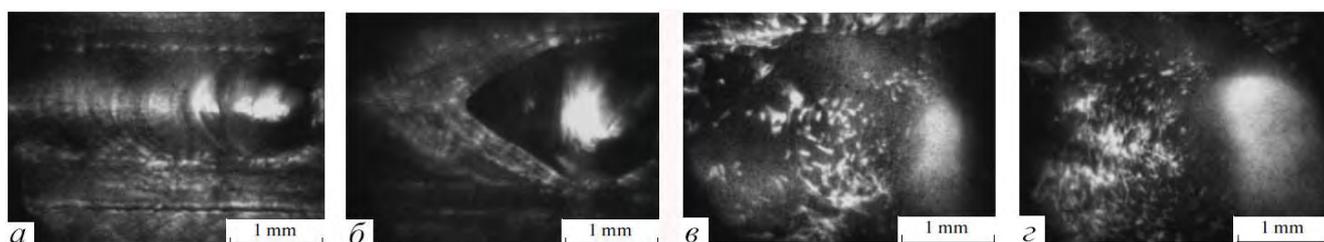
В работах [109–113] лазерный монитор использовался для исследования взаимодействия лазерного излучения с поверхностью углеродных материалов. Температура в области лазерного воздействия достигала 4000 К. Для анализа процессов, происходящих при лазерном воздействии, использовалось компьютерное восстановление трехмерных рельефов поверхности графита, соответствующих двумерным изображениям. Высокое качество изображений, полученное в работе [113] за счет применения скоростной камеры высокого разрешения (1,3 мегапиксельный CMOS-сенсор), позволило детально исследовать особенности изображений и обнаружить новые закономерности. На рисунке 1.12 приведены кадры скоростной видеозаписи из работы [113]. В работе [114] с использованием лазерного монитора и теневого фотографирования исследовалась область лазерного воздействия при лазерной сварке. С использованием цифровой камеры с разрешением 1388×1038 пиксел были получены изображения высокой четкости (рисунок 1.13), которые позволили исследовать динамику процесса плавления и формирования плазмы в области лазерного воздействия и выявить специфические особенности этих процессов.



a – начало воздействия; *б* – время воздействия 2 с; *в* – время воздействия 4 с; *г* – после окончания воздействия

Рисунок 1.12 – Изображения поверхности стеклоуглерода при воздействии излучением с $\lambda=1,06$ мкм и средней мощностью 44 Вт [113]

Анализ графического материала, представленного в работах [104–114], показывает, что существенным фактором, ограничивающим применение лазерных мониторов, является быстрое действие (частота кадров) и разрешение используемой цифровой камеры. Применение современных скоростных цифровых камер и соответствующих систем синхронизации позволит существенно расширить область использования лазерных мониторов, особенно в областях науки, где требуется визуальный или автоматизированный анализ изображений с высоким пространственным разрешением.



Мощность лазера (Вт): *a* – 500; *б* – 1000; *в* – 2000; *г* – 4000

Рисунок 1.13 – Фотографии поверхности металла во время лазерной сварки [114]

Газовые разряды являются подходящими объектами для наблюдения с использованием лазерных мониторов. В работах [115, 116] продолжено исследование электродов угольной дуги с использованием оптических систем с усилением яркости и регистрации изображений цифровыми камерами. Дуговой разряд в работе [117] использовался для моделирования внешней фоновой засветки с целью демонстрации еще одной особенности использования лазерного монитора – возможности наблюдения объектов, которые не являются источником излучения, а экранированы от наблюдателя источником фонового излучения. Авторы [117] визуализировали тестовый объект – металлическую сетку, размещенную на расстоянии 5 мм за дугой разряда. В работе [118] путем просвечивания излучением лазера на парах меди наблюдалось изменение морфологии плёнки и динамика состояния поверхности подложки в течение процесса газоразрядного напыления сегнетоэлектрических плёнок.

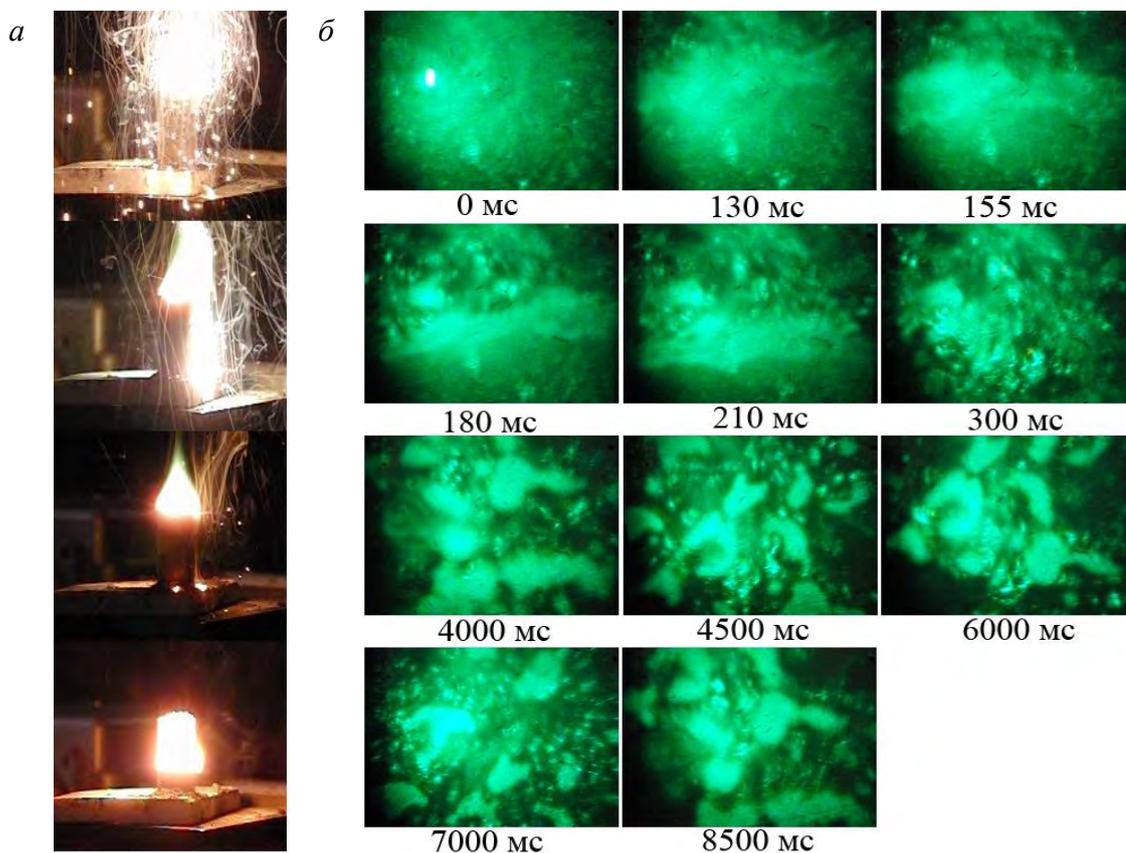
Наиболее ярким объектом исследования с использованием лазерного

монитора на сегодня является эрозионный капиллярный разряд [119]. В дополнение к лазерному мониторингу применялись также шлирен-метод с лазером на парах меди в качестве лазера-осветителя и внутрилазерный метод, дающий изображение в проходящем свете. Согласно выводам работы [119], «лазерный мониторинг может быть использован для контроля состояния внутренних поверхностей плазменных камер непосредственно в течение всего рабочего цикла установки. В частности, с его помощью можно проводить наблюдения модификации поверхности материалов при электронно-ионной бомбардировке, изучать воздействие плазменных потоков в режиме on-line на поверхность конструкционных материалов, электродов в пинчевых разрядах, диверторных пластин в разрядной камере токамака [120, 121]».

В рассмотренных выше работах [100–121] в лазерных мониторах использовалась высокотемпературная саморазогревающая активная среда на парах меди. Принимая во внимание преимущества активной среды на парах бромида меди и значительный опыт разработки активных элементов на парах бромида меди [10, 11, 28, 47, 51, 122–124], в 2009 г. в Томском политехническом университете научная группа под руководством профессора Г.С. Евтушенко совместно с Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, при участии автора диссертации, начала активную разработку лазерных мониторов на ее основе [125].

В первых работах изображение проецировалось на экран и записывалось на бытовую камеру Casio EX-FH20 с автоматическим режимом съемки. В качестве первых объектов, которые визуализировались в условиях внешней фоновой засветки, применялись стальная сетка и кожица лука. Объектами, излучающими яркое свечение в результате горения, служили бенгальская свеча и смесь крупнодисперсных порошков $\text{FeTiO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Si} + \text{Al} + \text{C}$. На рисунке 1.14 приведены кадры видеосъемки процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в собственном свете и изображения поверхности структуры во время горения при визуализации с помощью лазерного монитора. Работа [125] показала возможность использования активной среды на парах бромида меди в качестве усиливающей в лазерных мониторах и послужила заделом для совершенствования систем визуализации. В последующих работах [126–131] для регистрации

изображений лазерного монитора применялись профессиональные скоростные камеры MotionPro X3 и HiSpec1, открывшие возможность реализации режима моноимпульсной визуализации, при котором изображение на матрице скоростной камеры формируется одним импульсом излучения усилителя яркости [132, 133].



a – кадры из съемки процесса горения; *б* – визуализация с помощью лазерного монитора

Рисунок 1.14 – Горение смеси $\text{FeTiO}_3+\text{SiO}_2+\text{Si}+\text{Al}+\text{C}$ [125]

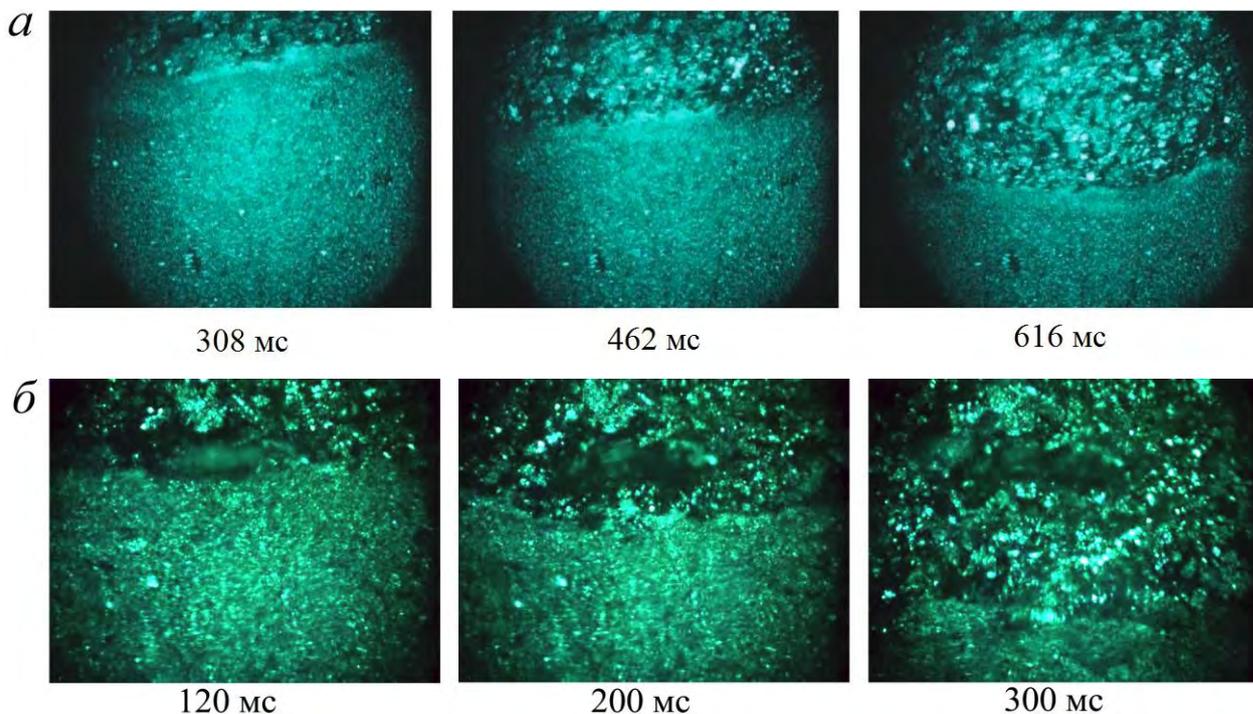
В работах [126–131] область применения лазерных мониторов на парах бромида меди была расширена, и в качестве объектов исследования использовались смеси крупнодисперсных порошков металлов $\text{FeTiO}_3+\text{SiO}_2+\text{Si}+\text{Al}+\text{C}$, Ti-B-Cu, Ni-Al, Ni-Al- CaCO_3 , область лазерного воздействия на поверхность стекла, дуговой и коронный разряды, биообъекты. В работе [134] рассмотрен базовый подход к расчету оптической схемы лазерного монитора. В числе последних работ по применению лазерных мониторов с моностатической схемой построения и метода теневого фотографирования с использованием излучения лазера на парах бромида меди, не связанных с исследованием нанопорошков металлов, следует отметить

работы [135–139]. В этих работах авторами продолжают использоваться разработанные подходы в построении моностатических лазерных мониторов (на основе одной активной среды) с соответствующей модификацией под объект исследования: коронный разряд в воздухе [135, 136], поверхность мишени при воздействии интенсивным лазерным излучением [137, 138], кристаллы алмаза в процессе химического осаждения [139].

Перспективность применения бистатических схем (лазер подсветки – усилитель яркости) в исследованиях высокотемпературных процессов на значительном расстоянии обсуждалась в работе [121] для дистанционной диагностики внутренних компонентов термоядерного реактора. Для таких систем имеет смысл применение задающего генератора с минимальной расходимостью излучения, которую дает неустойчивый резонатор [140], и высокой выходной мощностью. Бистатическая проекционная система на основе активных элементов на парах бромида меди, в котором лазер-осветитель имел неустойчивый резонатор, реализована в работах [141–143], в которых использовались цельнометаллические тестовые объекты (монета, щель монохроматора) для демонстрации и исследования работы системы. В работе [144] авторы наблюдали с использованием бистатического лазерного монитора горение той же смеси, что исследовалась ранее в работе [131] с использованием моностатического лазерного монитора. Сравнительные результаты, приведенные на рисунке 1.15, не позволяют сделать однозначный вывод о перспективности использования бистатического лазерного монитора для исследования объектов, имеющих относительно хорошее отражение и расположенных на небольшом расстоянии от усилителя яркости.

Таким образом, несмотря на уникальные возможности бистатического лазерного монитора, отмеченные авторами [86, 103, 144], целесообразность использования системы ЗГ-УМ (бистатического лазерного монитора), более сложной по сравнению с моностатическим лазерным монитором, определяется объектом исследования. Мы полагаем, что такими объектами исследования могут стать нанопорошки металлов, поверхность которых имеет малое отражение света и высокую чувствительность к лазерному воздействию по сравнению с

поверхностью монолитных материалов и крупнодисперсных порошков металлов. Идея повышения контраста изображений неконтрастной поверхности цельнометаллического материала была реализована в работе [145] на примере горения Ni-Al проволоки в дуге постоянного тока.



a – бистатический лазерный монитор [144]; *б* – моностатический лазерный монитор [131]

Рисунок 1.15 – Изображения поверхности горячей смеси микронных порошков $\text{FeTiO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Si} + \text{Al} + \text{C}$ во время горения

1.3. Метод корреляции лазерных спекл-изображений

Технологии, основанные на анализе лазерных спекл-изображений, относительно новом методе оптических исследований, успешно применяются в промышленности, медицине и научных исследованиях [146–150]. Изменения объекта во время технологического процесса или процесса в тканях можно охарактеризовать, анализируя изменения в спекл-структурах. В большинстве исследований случайные яркие и темные спекл-изображения преобразуются в цифровые изображения для обработки с помощью оборудования для захвата – цифровой камеры. Одиночный спекл или несколько спеклов являются минимальной единицей информации, их движение, деформация или другие

изменения используются для характеристики изменений объекта. Спекл-изображения могут создаваться путем искусственного напыления [151] или в результате интерференции лазерного излучения [152]. Искусственные спеклы, полученные в результате распыления рисунка на поверхности объекта [151], часто используются в области измерения микроперемещений и деформаций. Случайное распределение пятен представляет собой механические изменения покрытой поверхности. Метод искусственных спеклов требует физического покрытия поверхности объекта и не подходит для исследования поверхности горящих образцов нанопорошков.

Лазерный спекл – это особенное интерференционное явление. Случайное распределение лазерных спеклов находится в корреляции со свойствами объекта. Использование лазерных спеклов позволяет проводить количественный мониторинг поверхностных процессов дистанционными оптическими методами [152]. Цифровой анализ спекл-изображений позволяет получать информацию о движении поверхности объекта даже без фокусирования камеры на объекте исследования [153]. Пониженная мощность лазера не повреждает объект и дает возможность исследовать чувствительные к лазерному излучению объекты, такие как биологические ткани [154]. В медицине метод лазерных спеклов может использоваться для оценки частоты сердцебиения [153], измерения скорости кровотока в сосудах *in vivo* [155], исследования особенностей почерка [156] и др. Методы на основе анализа спеклов широко применяются в медицинской визуализации [157–159].

В промышленном контроле с помощью анализа спекл-изображений можно получать информацию об упругих деформациях [160–167], в том числе при повышенных температурах [165–167]. При изучении объектов, нагретых до высоких температур, светящийся слой плазмы затрудняет исследование поверхности. Лазерные методы контроля позволяют бесконтактно и дистанционно наблюдать поверхность образца во время горения. При соответствующей энергии лазера подсветки лазерное излучение, пройдя сквозь слой плазмы и отразившись от поверхности, будет иметь яркость, выше яркости свечения, создаваемого слоем

плазмы. Применительно к исследованию высокотемпературных объектов следует отметить работу [167], в которой авторы демонстрируют применение метода корреляции цифровых спекл-изображений для определения полей смещения поверхности и оценки деформации цельного металлического образца при температуре 1100 °С.

В отличие от распространённого в промышленном контроле метода цифровых корреляции изображений (DIC), при котором определяются векторы микроперемещений поверхности, метод лазерной спекл-корреляции (LSC) характеризует изменения объекта исследования в области наблюдения путем прямого определения изменений всего спекл-паттерна. В случае порошкового материала поверхность изменяется в большей степени в результате изменения состава и структуры компонентов, чем в результате механических деформаций. Поверхность трансформируется в результате физических и химических процессов, таких как десорбция абсорбированных и адсорбированных газов, появление открытых пор на поверхности, частичный переход в жидкое состояние, расширение и сжатие газов внутри образца, изменение состава, агломерация частиц, цвета и коэффициента отражения. Мы полагаем, что DIC-метод в случае контроля нанопорошков металлов может применяться при незначительных деформациях образцов, в то время как LSC-метод обеспечивает анализ всего процесса горения нанопорошков металлов и оценку временных параметров процессов как при монотонном деформировании образцов, так и при растрескивании или разрушении.

Благодаря относительно простым условиям получения лазерных спеклов схемы для регистрации спекл-изображений также относительно простые. Схема для спекл-визуализации имеет три основных компонента: источник света, объект исследования и оптический приемник. Для получения лазерных спекл-изображений в качестве источника света используется лазер. С помощью оптической системы для коллимации излучения или без нее свет направляется на рассеивающий объект. Рассеивающий объект формирует лазерные спеклы в пространстве за счет отражения или рассеяния падающего света, которые регистрируются цифровой камерой с объективом.

Работы по применению метода лазерной спекл-корреляции, представленные в диссертации, получили начало с регистрации движения поверхности [168–171] и исследования изменения биологических жидкостей [172–175]. Предшествующие работы позволили нам отработать методику регистрации и обработки лазерных спекл-изображений, в том числе разработать программу для ЭВМ для расчета коэффициента корреляции [176], которая является универсальной для анализа спекл-изображений, формируемых различными объектами исследования. Малая мощность лазера подсветки (единицы–десятки милливатт), излучение которого формирует спекл-изображения, дало основание полагать, что разработанная нами техника на основе метода лазерной спекл-корреляции может применяться для дистанционного контроля горения нанопорошков металлов в воздухе.

1.4. Методы и оборудование для исследования горения высокоэнергетических материалов

1.4.1. Горение высокоэнергетических материалов

В настоящее время ряд методов, используемых для получения новых материалов, связан с взаимодействием вещества с интенсивными потоками энергии [177–188] или процессами высокотемпературного горения [189–193]. Обширной научной и технологической областью, в которой нанопорошки металлов стали важнейшим компонентом, являются ВЭМ, их синтез и использование [194–211]. В работах [212–217] дается обзор современного состояния исследований в области ВЭМ на основе нанопорошков металлов. Такие металлы, как магний и бор, используются в пиротехнических смесях для обеспечения яркости, красочного светового излучения; алюминиевые порошки добавляются в топливо и взрывчатые вещества для ускорения их сгорания. Бериллий, цирконий, титан и гафний с высокой энтальпией сгорания полезны в качестве энергетических добавок в топливо, взрывчатые и зажигательные вещества. Информация о воспламеняемости в различных условиях и горении таких металлов, как железа, меди, вольфрама, молибдена, никеля и других, также важна, так как они широко используются в

электронных компонентах и конструкционных материалах. Наибольшее распространение в синтезе ВЭМ получил нанопорошок алюминия, так как, имея относительно высокую удельную энергию сгорания, он не является летучим или токсичным, как литий и бериллий, и легче воспламеняется, чем бор. Области применения нанопорошка алюминия представлены в виде схемы на рисунке 1.16 [215]. В исследовании всех отмеченных направлений методы на основе скоростной визуализации являются важными инструментами исследований.

Высокие температуры (~ 2500 °С), достигаемые при горении ВЭМ, и высокие скорости реакции усложняют исследование динамики процессов *in situ*, в частности, исследование поверхности горящих веществ в режиме реального времени. Следовательно, существует потребность в разработке новых методов и исследовательского оборудования, в частности, методов визуализации поверхности сквозь экранирующую засветку, создаваемую пламенем и продуктами сгорания.



Рисунок 1.16 – Применения наноAl в энергетических системах: зеленый цвет (темно серый в печатной версии книги) – разработанные области; желтый (светло серый) – развивающиеся области; красный (черный) – ограниченные применения [215]

Исследование процессов *in situ* востребовано также в задачах синтеза керамических материалов для выявления закономерностей горения и поиска способов управления процессами. Один из таких процессов – производство нитрида алюминия (AlN) сжиганием нанопорошка алюминия в воздухе [194–203].

Нитрид алюминия и керамические материалы на его основе являются одними из наиболее перспективных материалов, используемых в качестве теплопроводящих диэлектрических подложек в микроэлектронике и оптоэлектронике [204–211]. Получение керамических материалов на основе AlN с заданными свойствами требует детального изучения механизма образования AlN при горении нанопорошка алюминия и морфологии синтезированных продуктов, понимания природы процессов.

В процессах воспламенения и горения порошков металлов наиболее негативное влияние оказывает оксидная оболочка, которая образуется из-за стабилизации частиц и предпламенного окисления [216]. В то же время оксидная оболочка является защитной и обеспечивает устойчивость частиц к самовозгоранию при контакте с воздухом [217–220]. В связи с наличием оксидной оболочки кинетика воспламенения и горения металлов отличается от других веществ. Условия предпламенного окисления зависят от состояния оксидной пленки на частицах металла, которая определяет время задержки воспламенения, температуру воспламенения, а также характер горения металла. Двойной электрический слой, формируемый на поверхности частиц защитной оболочки обладает избыточной «запасенной энергией», что объясняет высокую реакционную способность нанопорошков, полученных методом электрического взрыва проводников [221–224]. Помимо запасённой энергии в процессе получения нанопорошков металлов в них может быть дополнительно запасена энергия с помощью внешних высокоэнергетических воздействий, таких как короткоимпульсное СВЧ-излучение, электронные пучки, нейтронное облучение, гамма-облучение [225].

Для инициирования горения реагенты должны обладать энергией выше определенного порога, называемого энергией активации. Инициирование горения обычно ассоциируется с воспламенением. Энергия, необходимая для активирования, может быть сообщена реагентам посредством следующих способов: нагрев, механическое воздействие, акустический эффект, электрическое воздействие, облучение, в том числе лазерным излучением. Способ инициирования

во многом определяет дальнейшее протекание процесса горения. Горение по своей природе является экзотермическим процессом. После инициирования химические реакции выделяют энергию, которая нагревает окружающие реагенты и осуществляет их активацию и воспламенение. Цикл инициирования и передачи энергии последовательно повторяется по мере распространения горения и физически проявляется как пламя [215].

Горение нанопорошка алюминия в воздухе протекает в две стадии, отличающиеся друг от друга температурой и яркостью свечения. После инициирования тепловая волна с относительно низкой температурой (600–800 °С) распространяется по образцу. На этой стадии происходит выгорание водорода, абсорбированного при пассивации [226]. По мере распространения процесс горения ускоряется, переходя в режим теплового взрыва, при котором температура может достигать 2000–2400 °С. На второй, высокотемпературной, стадии горения нанопорошка происходит реакция с кислородом и азотом в воздухе оксидов и нитрида алюминия:



На второй стадии горения колебания температуры могут составлять 200–400 °С за счет экзо- и эндотермических процессов [212]. Кроме указанных в формулах промежуточных продуктов горения, в процессе горения также присутствует оксинитрид алюминия $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$:



Сжигание смесей с частичной заменой нанопорошков металлов микронными порошками представляет интерес, так как снижает стоимость керамических порошков. Кроме того, горение смесей металлов является одним из методов получения новых материалов [227]. Исследование смесей порошков алюминия и железа также представляет практический интерес, поскольку железо оказывает каталитическое действие на горение алюминия и горение смесей нанопорошков

алюминия и железа протекает с большей скоростью [215]. Реакция горения термитов выглядит следующим образом:



Высокая интенсивность горения нанопорошка термита и участие воздуха в окислении приводят к образованию оксидных систем в виде полых сфер [228].

1.4.2. Методы и оборудование для исследования исходных веществ и продуктов сгорания

Определение наноматериалов несколько произвольно и может основываться на разных критериях. Прежде всего, критерии включают в себя масштабную меру и обычно соответствуют субмикронным размерам. Обычно 100 нм принимают в качестве границы между микронными и наночастицами [229]. Однако можно определить эту границу как соответствующую резкому изменению физических свойств, например, температуры плавления. Такая граница зависит от природы вещества, и для алюминия (Al) она составляет около 15 нм, для золота (Au) – около 50 нм и т.д. [215]. Другой подход основывается на изменении реактивных свойств; для энергетических материалов наномасштаб, при котором реализуется заметное ускорение реакций воспламенения и горения, обычно начинается с 100 нм [230].

Наноструктурированные ВЭМ имеют наноразмерные структуры по крайней мере в одном измерении. Малый критический диаметр, высокая скорость реакции и большое количество выделяемого тепла делают наноматериалы уникальным источником энергии. Технологии производства и методы работы с ВЭМ постоянно совершенствуются, как и совершенствуются методы и оборудование для определения их характеристик. Особенности механизмов воспламенения и горения как отдельных металлических частиц, так и композитных наносистем вызывают большой интерес с точки зрения разработки материалов с уникальными свойствами. Таким образом, исследования электрических, магнитных, тепловых, оптических и механических свойств наноструктур, а также методы исследования и инструменты для наблюдения пространственного состава атомов и молекул составляют

основные направления развития современных технологий наноматериалов.

В данном разделе перечислены основные методы и оборудование для исследования характеристик нанопорошков металлов.

Металлографические микроскопы используются для наблюдения за поверхностью непрозрачных объектов, к которым относятся нанопорошки металлов. Микроскоп построен по схеме отражённого света, в которой со стороны объектива установлен специальный осветитель. Система призм и зеркал направляет свет на непрозрачный объект, отраженный свет направляется обратно в объектив. Современные металлургические микроскопы характеризуются большим расстоянием между поверхностью столика и объективами, и большим вертикальным ходом столика, что позволяет работать с крупными образцами [231]. Часто в материаловедении используются инвертированные микроскопы как не имеющие ограничения на размер образца (только на вес) и не требующие параллельности опорной и рабочей граней образца (в этом случае они совпадают).

В простейшем случае металлографический микроскоп может быть построен на основе цифровой камеры с макрообъективом и широкополосного осветителя (например, галогеновой лампы).

Электронная микроскопия. Сканирующий электронный микроскоп (SEM – scanning electron microscope) представляет собой тип электронного микроскопа, который создает изображения образца путем сканирования поверхности сфокусированным пучком электронов. Электроны взаимодействуют с атомами в образце, производя сигналы, содержащие информацию о топографии поверхности и составе образца. Электронный луч сканируется в растровом шаблоне сканирования, поэтому его также называют растровым электронным микроскопом [232]. Некоторые SEM достигают разрешения менее 1 нм. Одним из современных приборов является сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM-840, который используется нами для получения микрофотографий поверхности.

В просвечивающем электронном микроскопе (TEM – transmission electron microscopy) ускоренный и сфокусированный электронный пучок направляется на

тонкий образец. Электроны, сталкиваясь с атомами в образце, изменяют направление своего движения. Размер угла рассеяния обусловлен плотностью и толщиной образца, таким образом формируются изображения с различной яркостью. Так как длина волны электрона де Бройля очень мала, разрешение просвечивающего электронного микроскопа намного выше, чем разрешение оптического микроскопа, и может достигать 0,1–0,2 нм, а увеличение составляет от десятков тысяч до миллионов раз. Просвечивающая электронная микроскопия используется для исследования тонкой структуры наноматериалов. В работах нашего коллектива мы используем просвечивающие электронные микроскопы высокого разрешения JEOL JEM 3010 и Jeol JEM-2200FS [233].

Калориметрия – это метод измерения теплоты и теплоемкости процессов и веществ (например, тепло химической реакции, скрытая теплота фазового перехода и т.д.). На практике изменение температуры соответствует поглощенному или выделенному теплу. Калориметрия обычно применяется для прямого определения тепловых эффектов, например, теплоты сгорания, теплоты плавления, теплоемкости материала и др. Калориметрия выполняется путем измерения тепла, выделяемого при реакции, с помощью калориметра с известной теплоемкостью. Тепловой эффект определяется по изменению температуры калориметра во время реакции, то есть умножения теплового эквивалента K на величину изменения температуры Δt : $Q = K\Delta t$. Кроме измерения изменения температуры Δt во время эксперимента и теплового эквивалента K калориметра также необходимо точно определить количество и состояние веществ, участвующих в реакции. Традиционно для определения теплового эффекта окисления нанопорошков металлов используется метод измерения с помощью калориметрической бомбы [234]. Калориметрическая бомба представляет собой калориметр, который измеряет выделяемое тепло при постоянной температуре окружающей среды.

Термография – это метод измерения соотношения массы и температуры при запрограммированном изменении температуры. Кривая, полученная с помощью термографического теста, называется термографической кривой. В качестве ординат указывается масса и тепловой поток. В качестве абсциссы указывается

температура или время. Когда исследуемое вещество сублимируется, испаряется, разлагается в процессе нагревания, масса измеряемого вещества меняется. Анализируя термографическую кривую, можно узнать, при какой температуре изменяется измеряемое вещество, и в соответствии с потерей веса вы можете рассчитать, сколько материала потеряно.

Дифференциальный термический анализ является разновидностью термографического анализа [235]. Он используется для регистрации фазовых превращений образца и их параметров. При исследовании характеристик нанопорошков с помощью дифференциального термического анализа можно определить четыре параметра химической активности: температуру начала окисления, максимальную степень окисления, степень превращения нанопорошка при определенном температурном интервале и удельный тепловой эффект [236].

Рентгеноструктурный анализ – дифракционный метод, широко применяемый для исследования структуры вещества. В основе данного метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трёхмерной кристаллической решётке. В работах нашего коллектива рентгеноструктурные исследования образцов продуктов сгорания проводятся с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 7000, количественное распределение наночастиц по размеру определяется лазерным анализатором размера частиц Shimadzu SALD-7101 [225].

1.4.3. Методы и оборудование для исследования процесса горения

Скоростная видеорегистрация. Горение энергетических материалов является динамическим процессом с высокой скоростью протекания [212–215]. Поэтому исследование горения нанопорошков металлов предполагает использование скоростных видеокамер, позволяющих записывать изображения с частотой от нескольких сотен до тысяч кадров в секунду [237–245]. Динамика процессов оценивается путем анализа записанных в течение некоторого времени изображений объекта наблюдения, а также других данных об изменении физических или химических свойств. В настоящее время пассивная скоростная

видеорегистрация является базовым методом исследования процессов горения. На рисунке 1.17 приведена схема прямой видеорегистрации, которую мы также называем наблюдением в собственном свечении. Скоростная видеокамера регистрирует последовательность кадров процесса без применения полосовой фильтрации излучения, лазерной подсветки или усиления яркости. В такой системе временное разрешение определяется быстродействием скоростной камеры. При этом пространственное разрешение изображений зависит от используемого объектива, размера пикселя камеры и разрешения матрицы. Разрешение матрицы скоростной камеры уменьшается с увеличением скорости съемки, поэтому на практике ученые выбирают компромисс между разрешением изображения и временем между кадрами.

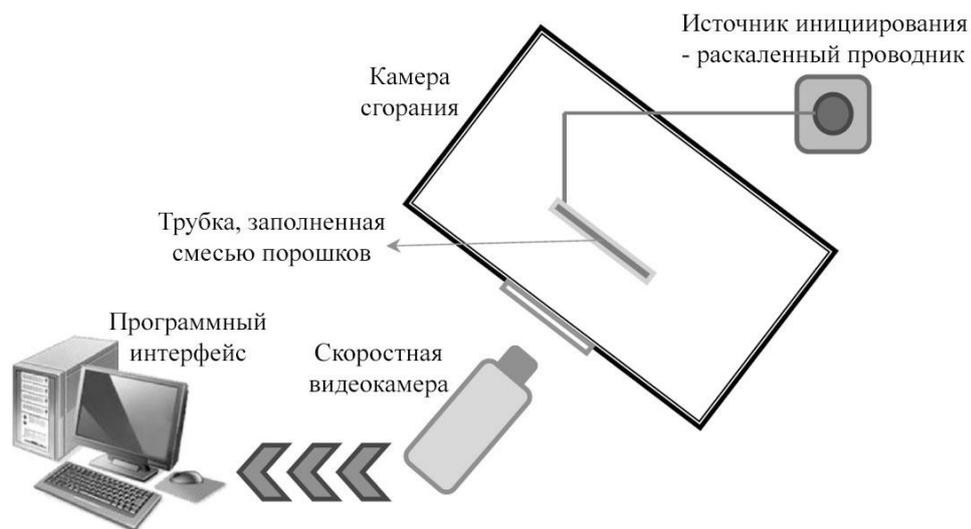


Рисунок 1.17 – Схема прямой видеорегистрации процессов горения [215, стр. 30]

Скоростная видеорегистрация с лазерной подсветкой. Высокая температура в процессе горения создает яркую засветку, которая препятствует наблюдению за поверхностью веществ. Фактически скоростная запись регистрирует распространение светящегося пламени. При высокой яркости пламени перед камерой устанавливаются светофильтры. Соответствующий подбор светофильтров позволяет снизить засветку камеры, при этом детали картины процесса, имеющие относительно невысокую яркость, становятся невидимыми. Одной из первых работ по использованию лазерной подсветки для визуализации

процесса горения является работа [246], в которой исследовался факел при горении навески Ti/2В. Подсветка осуществлялась лазером на парах меди. Авторами показано, что скоростная фотография с лазерной подсветкой позволяет проводить более детальное исследование горения энергетических материалов по сравнению с прямой визуализацией и по мере развития позволит получить много новой информации о процессах горения этих материалов и физико-химических закономерностях взаимодействия их компонентов.

Применительно к задачам диссертационной работы интересной является работа [247], в которой использовалась подсветка лазером на парах меди совместно с цифровой скоростной камерой. Камера регистрировала лазерное излучение, отраженное от образца и фронта волны горения. «Идея работает, потому что отраженный лазерный свет от образца значительно превышает энергию, идущую от образца через фильтр без лазерного освещения. Камера записывает изображение на длине волны лазерного излучения и не регистрирует широкополосный свет, излучаемый объектом исследования. Такое расположение позволяет камере «видеть» сквозь пламя и записывать детали процессов, которые в противном случае были бы полностью скрыты фоновым светом» [247]. На рисунке 1.18 показан фрагмент последовательностей кадров горения образца смеси Al/MoO₃ с использованием системы визуализации на основе лазера на парах меди и скоростной видеокамеры.

Предложенный в работе [247] подход показал перспективность развития направления лазерной визуализации. Использование цветных скоростных камер даст возможность отличить широкополосную засветку от отраженного излучения лазера подсветки и использовать режим частичного подавления широкополосной засветки. В ряде задач информация об интенсивности свечения пламени также важна, как и информация о распространении горения по поверхности образца. Уже сегодня доступны как монохромные, так и цветные скоростные камеры, которые обеспечивают скорость съемки 1000 кадров в секунду разрешением 1024×1024 пикселей [248–250], позволяя исследовать процессы со скоростью протекания единицы–десятки сантиметров в секунду.

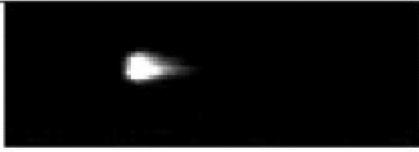
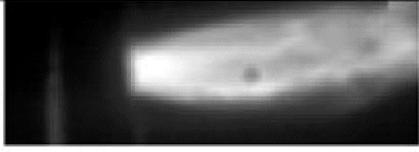
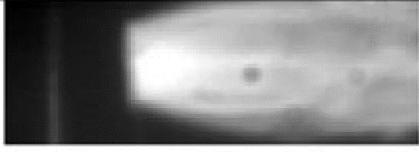
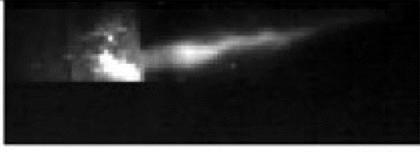
Sequence A 67.01% TMD 32 f-stop, 2.5% ND transmission	Frame# t [ms]	Sequence B 68.4% TMD 4 f-stop, Split CV image (CV on top of image)	Frame# t [ms]
	11170 0.0		12276 0.0
	11180 0.3125		12286 0.3125
	11190 0.6250		12296 0.6250

Рисунок 1.18 – Пример использования подсветки лазером на парах меди для визуализации поверхности горящего ВЭМ [247]

Тепловидение – получение видимого изображения объектов (или их тепловых полей) по испускаемому ими либо отражённому тепловому (ИК) излучению; метод интроскопии [251]. Используется для определения местоположения и формы объектов, находящихся в темноте или в оптически непрозрачных средах, а также для изучения степени нагретости отдельных участков сложных поверхностей. Тепловидение широко используется в неразрушающем контроле и диагностике [252–255].

Современные ИК-камеры используют светочувствительную матрицу, откалиброванную по интенсивности, и позволяют регистрировать ИК-изображения со скоростью до 1000 кадров/с в температурном диапазоне до 3000 °С [256]. При исследовании процессов горения такие камеры позволяют изучать изменение температурного профиля образца, определять локализации зон с наибольшей температурой [190]. На основе нескольких камер ближнего ИК-диапазона могут быть построены пирометры для измерения температуры пламени [257–259].

Регистрация спектрального состава излучения. Во время горения образца происходит окисление, испарение, распыление и возбуждение частиц за счет теплового эффекта и химических взаимодействий в пламени. Для определения

состава веществ, содержащихся в смеси, спектр излучения сравнивается с известными спектрами отдельных веществ. Качественный анализ образца осуществляется путем проверки наличия или отсутствия характерной линии элемента в спектре, дальнейшее измерение интенсивности каждой характеристической линии осуществляется более подробно [236].

Интересной с точки зрения исследования динамики горения является скоростная регистрация спектра в режиме реального времени. В работе [260] записывался спектральный состав излучения при горении нанокompозита $2\text{Al}-3\text{CuO}$ в воздухе с помощью 32-канального спектрометра. Во время горения максимум интенсивности излучения соответствовал 500–600 нм (рисунок 1.19), интенсивность излучения на более длинных волнах увеличивалась в течение более длительного времени, что указывало на снижение температуры. Такой подход позволил авторам обнаружить разницу спектральных характеристик излучения при горении нанокompозитов $2\text{Al}-3\text{CuO}$, приготовленных разными методами.

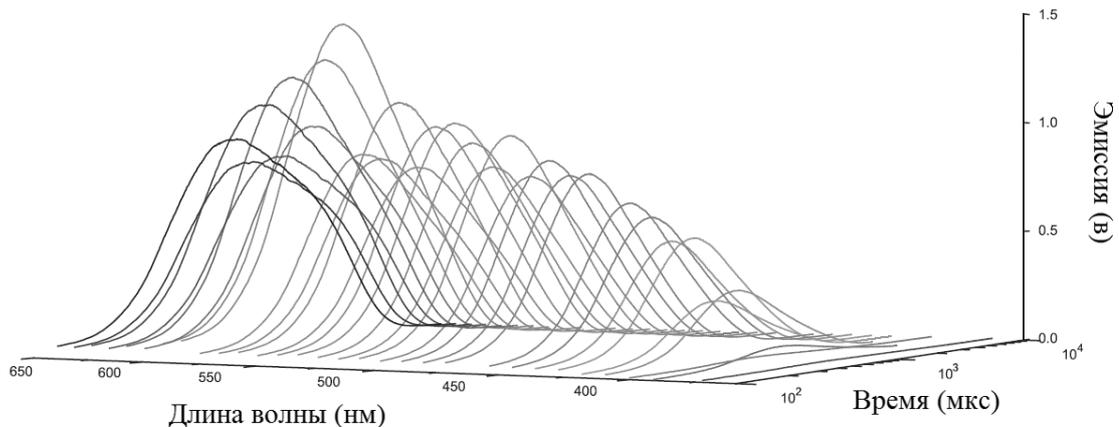


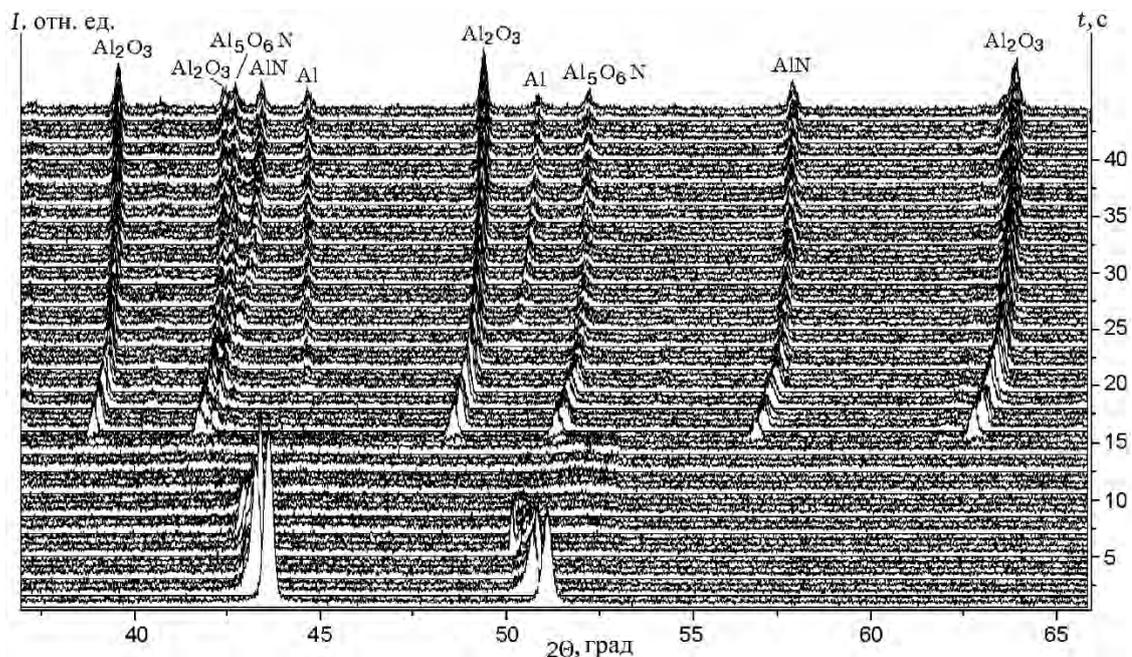
Рисунок 1.19 – Спектральные характеристики излучения во время горения термитной смеси $2\text{Al}-3\text{CuO}$ в воздухе [260]

Анализ эмиссионных и абсорбционных спектральных характеристик горящих продуктов в процессе горения нанопорошка позволяет определить наличие промежуточных продуктов горения. Например, по регистрации спектральных характеристик излучения в процессе горения нанопорошка алюминия в ударной трубке можно исследовать, при каких условиях горения производится сгоревший

продукт – оксид алюминия (AlO). Типичный спектр при горении нанопорошка алюминия в воздухе близок к спектру абсолютно черного тела, нагретого до температуры горения. Поскольку в процессе горения температура меняется, будет изменяться и спектр свечения.

Синхротронная спектроскопия – это метод и оборудование для анализа и исследования материалов на основе синхротронного излучения. Синхротронное излучение представляет собой импульсный источник излучения высокой интенсивности, высокой степени направленности, высокой поляризации с непрерывными характеристиками от дальнего инфракрасного до рентгеновского диапазонов. В исследовании нанопорошков синхротронное излучение применяется для определения состава горящих веществ. Данный метод позволяет исследовать динамику процесса горения.

На рисунке 1.20 показано временное сканирование дифрактограмм конденсированных продуктов при сгорании, выполненное в работе [261]. Каждая дифрактограмма соответствует определенному времени записи с момента инициирования.



2θ – угол дифракции; t – время горения; I – интенсивность излучения

Рисунок 1.20 – Временные дифрактограммы поверхности горящего образца нанопорошка алюминия [261]

Авторами [261] продемонстрировано двухстадийное горение нанопорошка алюминия, в частности, обнаружено, что в продуктах сгорания прессованного образца нанопорошка алюминия основная фаза (100 % отражение) – это нитрид алюминия, а содержание остальных кристаллических фаз не превышает 27 %; при горении нанопорошка алюминия γ -оксид алюминия образуется первым; образование нитрида алюминия происходит за счет последовательного вытеснения кислорода азотом из оксида алюминия.

1.5. Цель и задачи диссертационного исследования

Визуальное наблюдение процесса горения является одним из основных методов анализа процесса, особенно на начальных стадиях исследования новых смесей. В связи с развитием цифровых скоростных технологий записи изображений в конце 1990-х гг. скоростные видеокамеры получили широкое внедрение в исследования быстропротекающих процессов. В настоящее время скоростная видеорегистрация является стандартным инструментом для исследования инициирования и горения нанопорошков металлов и смесей на их основе.

Одновременно с развитием скоростной видеосъемки, в 1990–2000-х гг., произошел прорыв в разработке и промышленном производстве твердотельных лазеров, что позволило внедрить лазерное инициирование в исследование энергетических материалов, в том числе в Томском политехническом университете [262–264]. Система инициирования, основанная на технологии управления излучением лазера, имеет следующие преимущества: простая точечная передача тепловой энергии; гибкое распределение источника зажигания; высокая стабильность инициирования; высокая надежность и безопасность современных лазеров. Именно эти уникальные преимущества делают технологию лазерного инициирования перспективной в исследовании энергетических материалов. Таким образом, в начале 2000-х гг. имел место интерес к разработке интегрированной системы визуализации с усилением яркости для исследования лазерного зажигания энергетических материалов.

На момент начала работ по применению лазерных мониторов на парах металлов, в частности, на парах бромида меди, для визуализации процессов горения [125] в области лазерного мониторинга были проработаны следующие направления:

- исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения [101–103, 115, 116];
- взаимодействие лазерного излучения с поверхностью цельных материалов, в частности, лазерная обработка материалов [105–113] и лазерная сварка [104, 114];
- исследование эрозионного капиллярного разряда [119].

Кроме того, в литературе отмечался интерес к разработке систем дистанционного контроля объектов в условиях воздействия плазмы [120, 121], на основе активных сред на парах металлов.

Направление практического использования лазерных мониторов в системах визуализации процессов горения оставалось и остается в настоящее время перспективной областью внедрения и разработки оптических систем с усилением яркости. Об этом свидетельствует отсутствие публикаций об использовании лазерных мониторов для наблюдения процессов высокотемпературного горения до 2009 г. и публикации последних лет, в том числе выполненные при участии автора диссертации.

Применительно к активной среде на парах бромида меди показана принципиальная возможность применения этой среды для создания лазерного проекционного микроскопа [68]. Значительный успех в разработке лазеров на парах бромида меди в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (совместно с Томским политехническим университетом и Институтом мониторинга климатических и экологических систем СО РАН) и в Институте физики твердого тела Болгарской академии наук свидетельствовал о перспективе успешной реализации лазерных мониторов на основе усилителей яркости на парах бромида меди для наблюдения объектов в условиях интенсивной фоновой засветки. В 2008–2014 гг. при участии автора диссертации была показана возможность применения лазерных мониторов на парах бромида меди для исследования угольной дуги

постоянного тока, лазерного воздействия на поверхность стекла, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при горении смесей крупнодисперсных порошков. В то же время, с другой стороны, оставалась обширная область физики горения и взрыва – высокотемпературное горение нанопорошков металлов, термитных смесей на основе нанопорошков металлов и твердых топлив, в которой лазерные мониторы еще не использовались.

Поэтому целью диссертационной работы стала разработка методик исследования высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей на основе методов скоростной видеосъемки с применением лазерного монитора и лазерной подсветки, а также практическая реализация разработанных методик. Разработка систем должна учитывать специфику горения высокоэнергетических материалов, в частности, легковоспламеняющихся нанопорошков металлов, и быть направлена на снижение мощности, освещающей объект исследования при обеспечении достаточно высокого качества формируемых изображений.

Для достижения поставленной цели диссертационной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать возможности визуализации на основе лазерного монитора с усилителем яркости на парах бромида меди для исследования морфологических изменений поверхности ВЭМ во время горения, в том числе непосредственно в области лазерного инициирования.

2. Исследовать горение нанопорошка алюминия, а также смесей нано- и микропорошков металлов, термитных смесей и модельных ВЭМ с применением лазерных мониторов, в том числе с возможностью перемещения области наблюдения в процессе исследования для изучения однородности горения и характера распространения фронта горения.

3. Разработать методику визуализации лазерного инициирования и горения тонких слоев нанопорошков металлов.

4. Разработать способы качественной и количественной оценки изменения поверхности порошковых материалов (нано- и микропорошки металлов) во время горения на основе цифровой обработки изображений лазерного монитора.

5. Экспериментально проверить возможность увеличения контрастности изображений поверхности нанопорошков металлов при использовании в лазерном мониторе независимой лазерной подсветки.

6. Определить характер влияния температуры контейнеров с рабочим веществом и расстояния до объекта визуализации на характеристики излучения в режимах, необходимых для исследования горения нанопорошков металлов.

7. Разработать методику дистанционного исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения на основе метода лазерной спекл-корреляции.

Анализ работ по теме исследования показал, что оптические характеристики активной среды на парах бромида меди изучены менее детально по сравнению с активной средой на парах меди. В частности, интерес представляет исследование характеристик усиления не только относительно мощных систем, но и систем с малой мощностью излучения, в частности, усилителей яркости с пониженным энергозатратом в разряд.

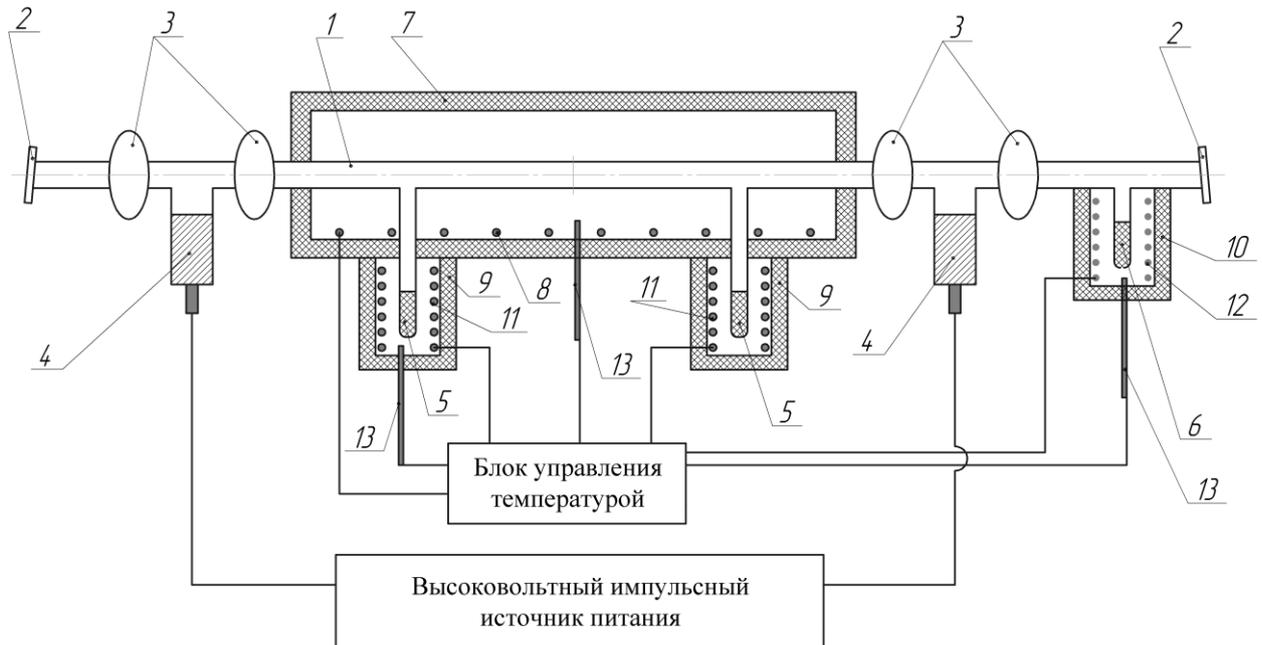
Лазерная подсветка является активным методом исследования, который может использоваться для визуализации и контроля горения энергетических материалов наравне с лазерным мониторингом. В связи с этим интерес представляет как усовершенствование известных систем на основе лазерной подсветки, так и разработка новых методов и систем. Одним из таких перспективных методов является лазерная подсветка с регистрацией спекл-изображений поверхности горящего образца с их последующей обработкой.

Глава 2. Активные элементы усилителей яркости на парах бромида меди и источники накачки

2.1. Активные элементы на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров и традиционной накачкой

Использование саморазогреваемых конструкций, предполагающих существенные затраты ресурса тиратрона на вспомогательные функции, является оправданным решением для получения высоких мощностей генерации лазеров на парах бромида меди (ЛПБМ) [32, 122, 265]. В то же время относительно низкая рабочая температура ЛПБМ может достигаться за счет применения простых в изготовлении и недорогих нагревательных элементов, а активная среда работает не в саморазогревном режиме, а в режиме пониженного энергозатрата в разряд [10]. В связи с этим мы сформулировали следующую задачу: разработать для ЛПБМ такую конструкцию активного элемента, у которого вспомогательные функции реализуются за счет автономного источника энергии, не связанного с высоковольтным разрядом.

На рисунке 2.1 приведена конструкция активных элементов на парах бромида меди с независимым нагревом контейнеров с рабочим веществом, активной области ГРТ и контейнера с адсорбентом, насыщенным HBr , разработанная в Институте оптики атмосферы им В.Е. Зуева СО РАН при участии автора, защищенная патентом [266]. Активный элемент состоит из кварцевой трубки, наполненной буферным газом неона, к торцам которой приклеены кварцевые пластины, которые обеспечивают герметичность ГРТ и служат выходными окнами. Для возбуждения разряда используются электроды, выполненные в виде кварцевых стаканов, заполненных медной стружкой. Токоввод к ним осуществляется посредством электродов от ламп ИФП 1200 (2000). Такая конструкция электродов обеспечивает наилучший электрический контакт с газом и снижает степень загрязнения подводящих электродов [122, 265].



1 – кварцевая трубка; 2 – выходные окна; 3 – ловушки; 4 – электроды; 5 – контейнеры с рабочим веществом; 6 – контейнер с цеолитом; 7 – металлический кожух с теплоизолятором и нагревателем для активной зоны; 8, 11, 12 – нагревательные элементы; 9, 10 – нагреватели контейнеров с рабочим веществом и цеолитом; 13 – термопары

Рисунок 2.1 – Активные элементы лазеров на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров [266]

Рабочий канал кварцевой трубки помещен в металлический кожух с теплоизолятором (огнеупорная плита), на дне которого расположен нагревательный элемент и имеются отверстия для вывода контейнеров с бромидом меди. Нагревательный элемент выполнен из нихромовой спирали и уложен по периметру дна кожуха, мощность нагревательного элемента варьируется от 0 до 1,2 кВт. Контейнеры с бромидом меди выполнены в виде отростков, равномерно расположенных вдоль основного канала трубки, и имеют длину, достаточную, чтобы бромид меди находился за пределами нагревателя. Контейнер с цеолитом (Molecular Sieves 13X 1/16) располагается со стороны анода ГРТ (обычно земляной электрод) и служит для ввода малой добавки HBr в активную среду, а также для улавливания примесей при работе без добавки. Контейнеры с бромидом меди и цеолитом снабжены отдельными нагревателями с термопарами, с помощью которых контролируется температура внутри кожуха и контейнеров. Блок

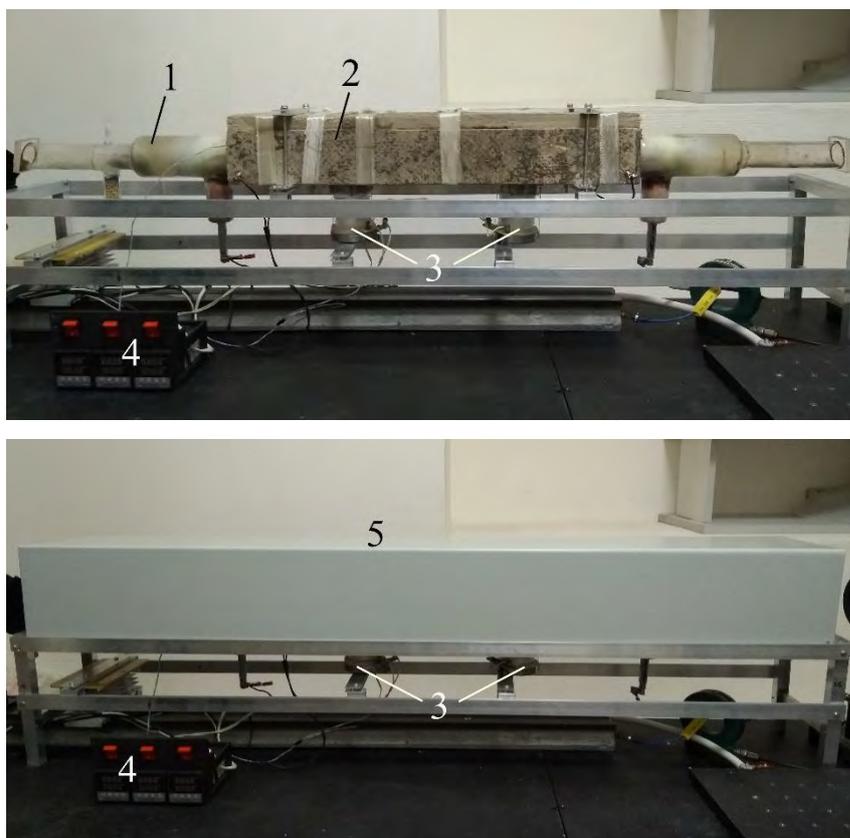
управления температурой автоматически поддерживает заданные температуры внутри нагревателей. Контейнер с цеолитом и соответствующий ему нагреватель в совокупности составляют так называемый генератор HBr. При нагреве цеолита до определенной температуры поддерживается необходимое давление активной добавки в объеме ГРТ. Особенностью генератора является свойство реверсивности. Концентрация HBr регулируется температурой нагревателя, типичное давление добавки составляет 0,2–0,3 торр [17, 122]. В работах [267–269] в активную среду вводилась добавка HBr.

В таблице 2.1 представлены параметры ГРТ лазеров на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров, которые использовались в работах по исследованию энергетических характеристик активных сред на парах бромида меди с традиционной газоразрядной накачкой – положительный столб продольного газового разряда, формируемый между электродами, введенными в ГРТ в холодных зонах. Активная добавка HBr применялась в основном при исследовании максимальных энергетических характеристик в режиме генератора лазерного излучения (лазера). При работе в режиме усилителя активная добавка практически не использовалась.

В модификациях активных элементов, использованных в диссертационной работе для исследования горения нанопорошков металлов и смесей на их основе, металлический кожух отделен от теплоизолятора и служит защитным экраном. Теплоизолятор выполнен из каолиновых плит, стянутых огнеупорной лентой, и является механической опорой для ГРТ. Теплоизолятор и кожух размещаются на основании из алюминиевых профилей. Такое решение позволило существенно уменьшить массу активных элементов. Внешний вид таких активных элементов показан на рисунке 2.2. Приведенные на рисунке активные элементы использовались в большей части экспериментальных исследований процесса горения нанопорошков металлов в качестве усилителей яркости, рассмотренных в диссертационной работе. В таблице 2.1 параметры этих ГРТ приведены под номерами 18 и 19.



а



б

а – ГРТ диаметром 1,5 см, длиной 50 см; *б* – ГРТ диаметром 3 см, длиной 60 см; 1 – кварцевая трубка; 2 – нагреватели разрядного канала; 3 – нагреватели контейнеров с рабочим веществом; 4 – контроллер температуры нагревателей; 5 – экран

Рисунок 2.2 – Внешний вид активных элементов усилителей яркости на парах бромида меди с независимым нагревом

Таблица 2.1 – Параметры активных элементов с традиционной накачкой

№ ГРТ	Диаметр, см	Длина активной зоны, см	Объем активной зоны, см ³	Работы, в которых опубликованы результаты исследований
1	3,5	56	540	[267, 269]
2	3,8	91	1032	[267]
3	5,8	105	2774	[267, 268]
4	0,5	24	4,7	[270]
5	1,5	36	64	[28]
6	0,7	40	15,4	[271]
7	8,0	90	4522	[272]
8	1,2	45	51	[273]
9	1,0	40	31,4	[274]
10	0,6	30	8,5	[275]
11	0,8	30	15	[275]
12	1,2	30	34	[275]
13	2,5	90	442	[275]
14	5,0	90	1766	[128, 130, 131, 275–284]
15	1,5	40	71	[125–127, 285–287]
16	2,5	50	245	[129, 277, 280]
17	2,5	40	196	[282, 283]
18	1,5	50	88	[288–300]
19	3,0	60	424	[296–304]

В работе [11] исследовались особенности работы активных элементов лазеров на парах бромида меди с независимым нагревом активной области ГРТ, контейнеров с бромидом меди и цеолита, насыщенного бромоводородом, конструкция которых предложена в патенте [266]. Проводится анализ работы элементов с независимым нагревом при использовании различных схем накачки:

схемы прямого разряда накопительного конденсатора, схемы удвоения напряжения Блюмляйна и схем с магнитным сжатием импульса.

В таблице 2.2 представлены наибольшие средние мощности генерации CuBr-лазеров, полученные автором диссертации, с различными активными элементами с независимым нагревом активной области ГРТ, контейнеров с бромидом меди и цеолита, насыщенного HBr. Применение внешнего нагрева ГРТ при использовании традиционных схем накачки не приводит к повышению эффективности лазера. Вместе с тем предложенная конструкция лазера с пониженным энергозатратом позволяет получить генерацию при малой мощности накачки, настолько малой, что при отсутствии внешнего нагрева реализовать самонагрев режим в CuBr-лазерах большого объема было бы затруднительно. Практическим преимуществом CuBr-лазеров с независимым нагревом является существенное расширение динамического диапазона накачки. Применение внешнего нагрева активной области ГРТ позволяет также избежать металлизации внутренних стенок ГРТ и быстрого выноса рабочего вещества из контейнеров из-за недогрева рабочего объема, который имеет место при снижении энергозатрат в разряд [51].

Таблица 2.2 – Энергетические характеристики CuBr-лазеров

№ ГРТ	Диаметр канала, см	Длина активной зоны, см	$P_{Г ср.}$, Вт без HBr	$P_{Г ср.}$, Вт с HBr	Кпд, % без HBr	Кпд, % с HBr	Ссылка
1	3,5	56	–	10	–	0,67	[267]
2	3,8	91	–	16	–	0,9	[267]
3	5,8	105	–	24	–	1,0	[267]
4	5,0	90	5,85	12	0,34	0,7	[279]
5	8,0	90	6,84	8,7	0,38	0,46	[272]
5*	8,0	90	12,1	13	0,66	0,68	[272]

$P_{Г ср.}$ – средняя мощность генерации. * – в качестве усилителя мощности в МОПА-системе при входной средней мощности излучения 1,9 Вт.

В отличие от ГРТ большого объема, в трубках малого диаметра (малого активного объема) достаточно использовать теплоизолятор для обеспечения требуемого для генерации температурного режима [51]. В трубках малого диаметра возможно получение генерации с рекордными частотами следования. В работе [270] при участии автора диссертации впервые на тот момент времени была получена максимальная для лазеров на парах металлов частота следования импульсов генерации 400 кГц в ГРТ диаметром 0,5 см.

В таблице 2.3 представлены параметры активных элементов усилителей яркости на парах бромида меди, которые использовались в основной части исследований и составили основу наиболее значимых результатов. В таблице приведены наибольшие значения мощности излучения для данных ГРТ.

Таблица 2.3 – Энергетические характеристики усилителей яркости

№ ГРТ	Диаметр канала, см	Длина активной зоны, см	ЧСИ, кГц	Наличие добавки HBr	E_{ASE} , мкДж	P_{ASE} , мВт	Ссылки
1*	1,5	40	28,8	без HBr	2,7	78	[125–127]
			24	без HBr	2,7	65	[285–287]
2	5,0	90	20–24	без HBr	21–25	500	[128, 130, 131, 284]
			20	без HBr	60	1200	[281, 282]
			20	с HBr	100	2000	[281, 282]
3	2,5	50	20	без HBr	20	400	[129, 280, 281]
4	2,5	40	20	без HBr	11,5	230	[283, 284]
5	1,5	50	20	без HBr	20	400	[288–300]
6	3,0	60	20	без HBr	32	640	[296–304]
7**	2,0	50	20	без HBr	12,25	245	–

E_{ASE} – энергия в импульсе сверхизлучения (усиленного спонтанного излучения); P_{ASE} – средняя мощность усиленного спонтанного излучения; * – ГРТ со стабилизацией температуры активной области, без независимого контроля температуры контейнеров с рабочим веществом; ** – ГРТ с емкостной накачкой, более детально рассмотрена в разделе 2.2.

При исследовании инициирования и горения нанопорошков металлов воздействие интенсивным сверхизлучением усилителя яркости на освещаемую поверхность образца может привести к неконтролируемому возгоранию, поэтому важно минимизировать это воздействие. В связи с этим обстоятельством активная добавка HBr не вводилась. Активная добавка вводилась, когда исследовалось ее влияние на оптические характеристики активных элементов усилителей яркости. Мощность накачки активных элементов при работе с нанопорошками металлов также устанавливалась минимальной, чтобы обеспечить равномерный профиль излучения и высокое качество изображений, с одной стороны, и минимальное воздействие на объект исследования, с другой стороны.

2.2. Активные элементы на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров и емкостной накачкой

Активные элементы лазеров на парах галогенидов металлов с накачкой импульсно-периодическим сильноточным тлеющим разрядом, традиционно применяемым для создания инверсии в лазерах на парах металлов, имеют недостаток, связанный с деградацией электродов. Компоненты активной среды, такие как бром и бромоводород, вступают в реакцию с материалом электродов, приводя к его загрязнению и снижению срока службы [1, 11]. По аналогии с эксилампами [305–307] накачка продольным емкостным разрядом может использоваться для получения генерации в лазерах на парах бромида меди [308]. На предложенный способ возбуждения и техническую реализацию получен патент на изобретение [309]. В последующих работах характеристики CuBr-лазеров с емкостной накачкой были значительно улучшены [310–316] и получены практически значимые мощности излучения и КПД. Ключевым усовершенствованием конструкций активных элементов, предложенных в [309], стало применение независимого нагрева активной области ГРТ, контейнеров с рабочим веществом и цеолитом.

Параметры исследованных в данной работе ГРТ с накачкой емкостным

разрядом приведены в таблице 2.4. Конструкции ГРТ с емкостной накачкой приведены на рисунке 2.3. ГРТ № 1, 2, 3, 5 имели односекционные электроды, ГРТ № 4, 6 имели двухсекционные электроды. Двухсекционные электроды применялись для увеличения электродных емкостей и эквивалентной емкости ГРТ. Электроды на каждой стороне активной области имели одинаковые геометрические размеры. Для формирования продольного емкостного разряда электроды располагались в «холодных» концевых зонах ГРТ за пределами нагревателя активной области ГРТ. Поскольку энергия, передаваемая в разряд, ограничена величиной емкостей электродов [317], формирование температурных параметров в ГРТ значительных объемов с емкостной накачкой было невозможно обеспечить в саморазогревном режиме, соответственно стало возможным с применением внешнего нагрева активной области.

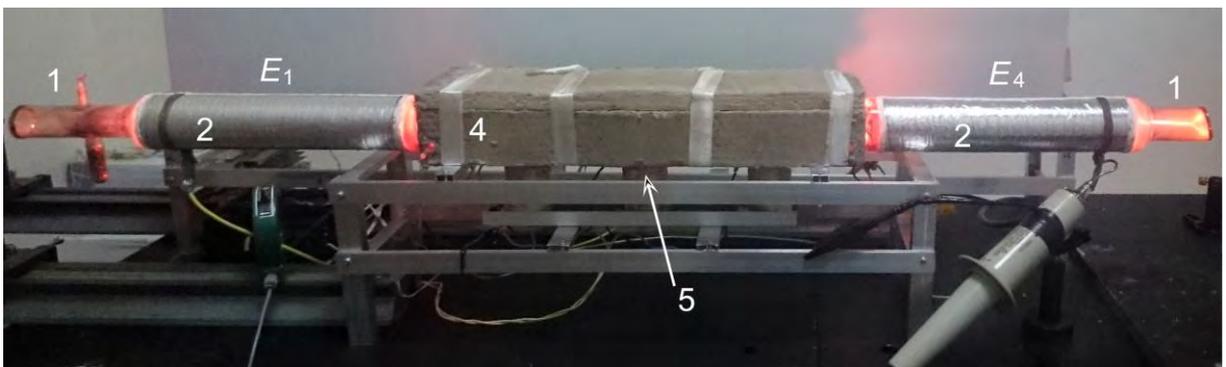
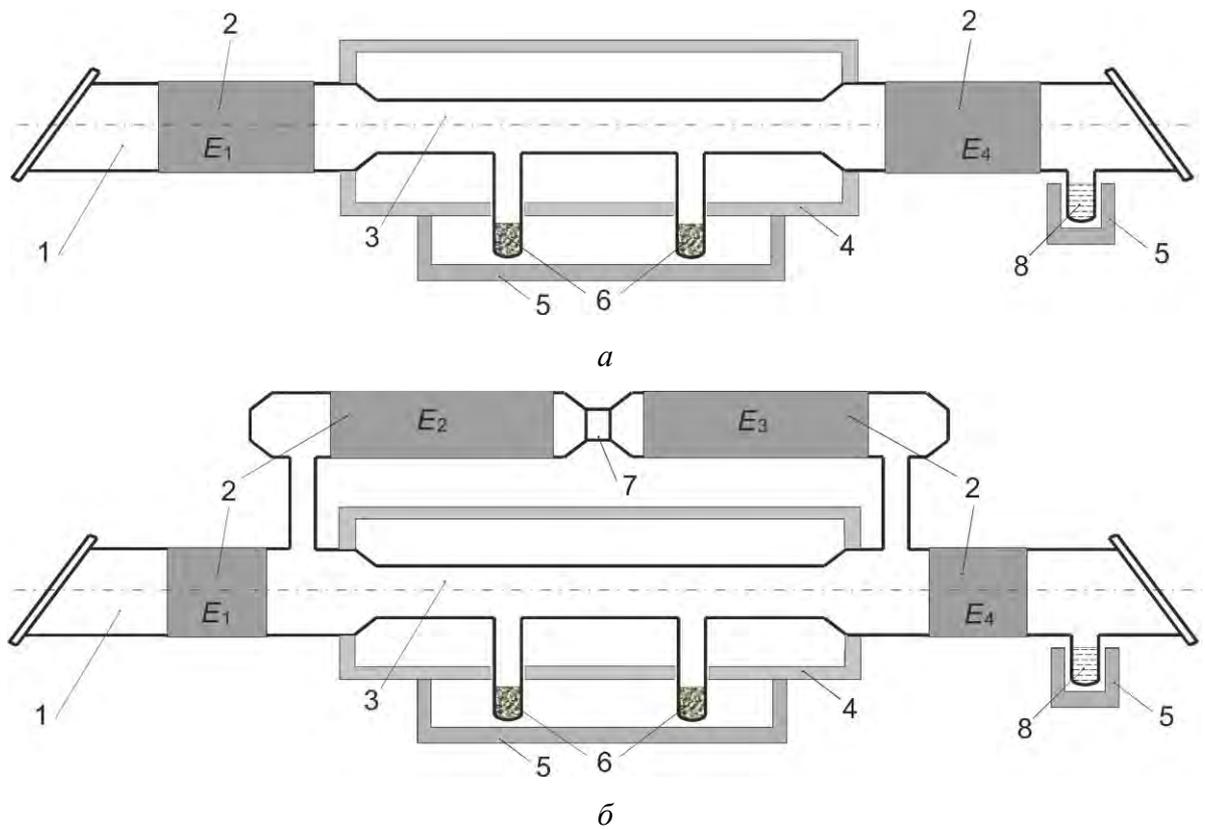
Таблица 2.4 – Параметры исследованных ГРТ с емкостной накачкой

№ ГРТ	Диаметр канала, см	Длина активной зоны, см	Объем активной зоны, см ³	Ширина/диаметр электродов, см	Работы, в которых опубликованы результаты исследований
1	1,2	28	32	10/1,2	[308, 309]
2	1,0	38	30	10/5,0	[310–312]
3	2,7	38	218	10/5,0	[310, 312]
4	4,0	90	1130	14/10 38/7,6	[313–316]
5	1,0	40	31,4	24/6,4	[315, 316]
6	2,5	50	245	14/10 38/7,6	[315, 316]
7	2,0	50	157	29/6,5	–
8*	2,0	50	157	19,5/7,0 28/5,0	[315]

* CuCl-лазер с внутренним реактором хлорида меди, аналогичный предложенному ранее в работе [84].

Преимуществом лазеров с емкостной накачкой является отсутствие прямого контакта материала электродов с газовой средой, что актуально при использовании активных добавок HBr для повышения энергетических характеристик лазера. В связи с этим было проведено исследование влияния добавок HBr на среднюю мощность генерации и КПД CuV-лазеров с емкостной накачкой различного

активного объема. Исследование показало, что подобно CuBr-лазерам с традиционной накачкой положительное влияние добавки HBr имеет место и в CuBr-лазерах с емкостной накачкой.



б

1 – холодная зона ГРТ; 2 – электроды; 3 – активная область ГРТ; 4 – независимый нагреватель активной области; 5 – нагреватели рабочего вещества и цеолита; 6 – бромид меди; 7 – изоляционная втулка; 8 – цеолит

Рисунок 2.3 – Активные элементы лазеров на парах бромида меди с независимым нагревом и емкостной накачкой

В таблице 2.5 приведены наиболее значимые средние мощности генерации и КПД, полученные автором диссертационной работы в CuBr-лазерах с емкостной накачкой. КПД рассчитывался относительно мощности, потребляемой схемой накачки от высоковольтного источника постоянного напряжения. Лазер на парах бромида меди с емкостной ГРТ использовался в качестве лазера подсветки в бистатическом лазерном мониторе. На рисунке 2.3, в приведена фотография активного элемента с емкостными электродами (ГРТ № 7 в таблице 2.3 и 2.4).

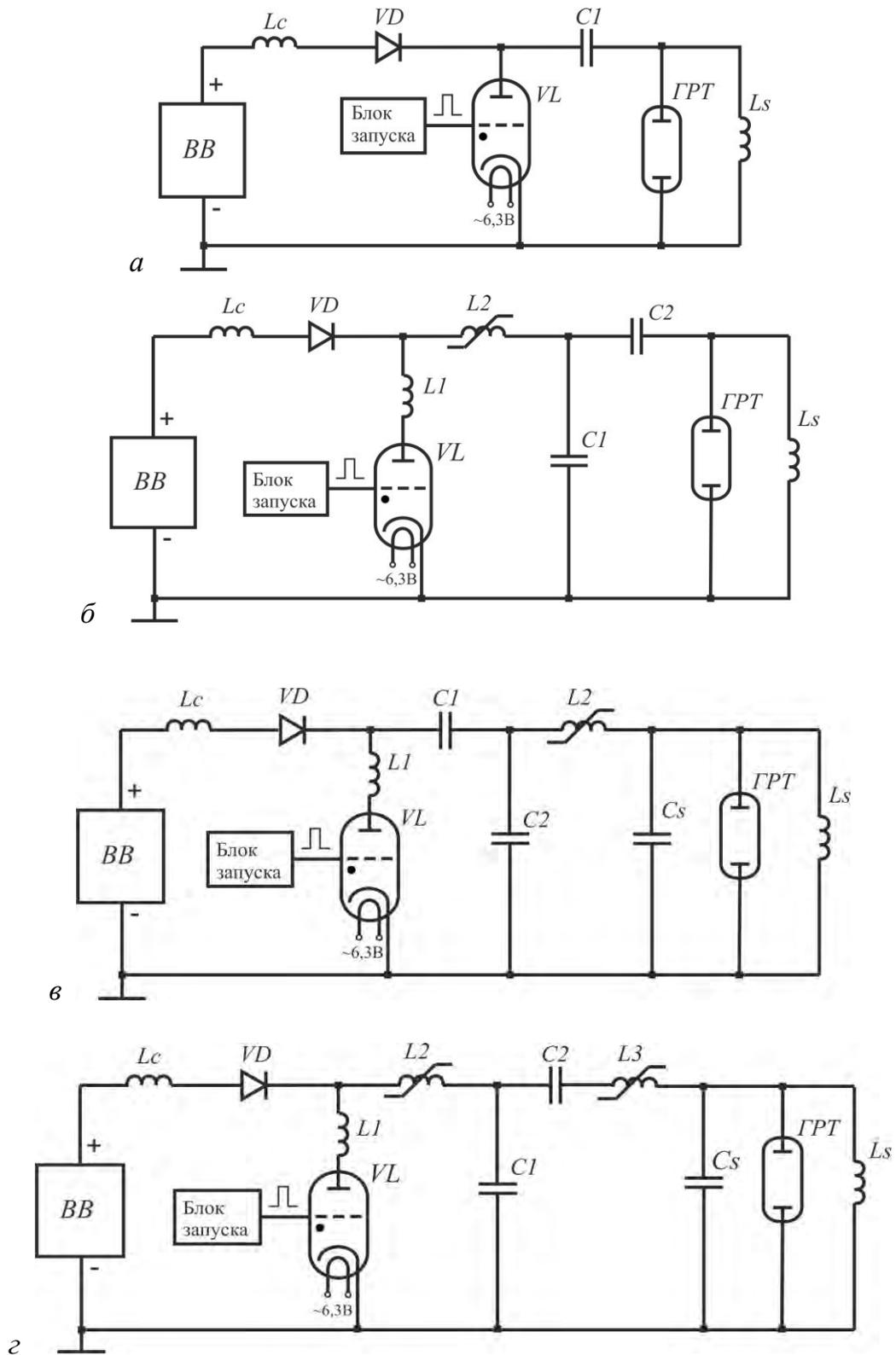
Таблица 2.5 – Энергетические характеристики CuBr-лазеров с независимым контролем температурных параметров и емкостной накачкой

№ ГРТ	Диаметр канала, см	Длина активной зоны, см	$P_{г\text{ ср.}}$, Вт без HBr	$P_{г\text{ ср.}}$, Вт с HBr	КПД, % без HBr	КПД, % с HBr	Ссылка
1	1,0	38	1,1	1,32	0,08	0,1	[310]
2	2,7	38	1,4	3,5	0,12	0,3	[310]
3	4,0	90	6,2	15	0,33	0,5	[315]
4	1,0	40	2,15	–	0,13	–	[315]
5	2,5	50	3,5	5,6	0,36	0,4	[315]

2.3. Схемы накачки лазеров и усилителей яркости

2.3.1. Одноканальные схемы накачки активных элементов на парах бромида меди

На рисунке 2.4 представлены схемы накачки, использованные для исследования энергетических характеристик CuBr-лазеров с независимым нагревом [267]. Во всех представленных схемах заряд накопительных емкостей $C1$ и $C2$ осуществлялся от высоковольтного источника постоянного напряжения (BB). Для повышения напряжения на накопительной емкости $C1$ ($C2$) использовалась схема резонансного заряда через индуктивность Lc и диод VD . В качестве ключевого элемента применялся импульсный водородный тиратрон ТГИ1-1000/25 (VL) с воздушным или водяным охлаждением.



a – схема прямого разряда накопительного конденсатора; *б* – схема удвоения напряжения Блюмлейна; *в* – схема с магнитным сжатием импульса без удвоения напряжения; *г* – схема удвоения напряжения с магнитным сжатием импульса

Рисунок 2.4 – Схемы накачки [267]

В отличие от прямой схемы (рисунок 2.4, а), коммутационные возможности которой ограничиваются скоростью нарастания тока в тиратроне [37], в схемах (б–г) временные характеристики коммутатора практически не оказывают влияния на процессы в разрядном контуре. При использовании схем с магнитным сжатием импульса снижаются требования к коммутатору и повышается его срок службы. Параметры звеньев магнитного сжатия импульса определялись по формулам и методике, описанной в [5, 42, 318] и уточнялись в процессе настройки схем.

Энергетические характеристики, представленные в таблице 2.6, показывают, что наиболее высокие мощности излучения и КПД достигаются в схемах с удвоением напряжения. В таких схемах при одинаковой мощности, потребляемой от выпрямителя, к ГРТ прикладывается большее напряжение. Поэтому возбуждение верхних рабочих уровней атома меди происходит более эффективно по сравнению со схемами без удвоения напряжения. Из полученных данных следует, что для ГРТ большого рабочего объема (ГРТ № 2, 3, таблица 2.2) предпочтительнее использовать схемы с магнитным сжатием импульса.

Таблица 2.6 – Энергетические характеристики CuVr-лазеров

	№ ГРТ	Диаметр, мм	$P_{Г\text{ ср.}}$, Вт	$P_{в\text{ ср.}}$, кВт	кпд, %
Схема прямого разряда накопительного конденсатора	1	35	5	1,2	0,42
	2	38	9	1,8	0,50
	3	58	15	2,4	0,63
Схема с магнитным сжатием импульса	1	35	6	1,4	0,43
	2	38	10,5	1,8	0,58
Схема удвоения напряжения Блюмляйна	1	35	10	1,4	0,70
	2	38	12	1,8	0,67
Схема удвоения напряжения с магнитным сжатием импульса	1	35	10	1,5	0,67
	2	38	16	1,8	0,90
	3	58	24	2,4	1,0

$P_{Г\text{ ср.}}$ – средняя мощность генерации; $P_{в\text{ ср.}}$ – средняя мощность, потребляемая от высоковольтного выпрямителя.

Работы [268, 269] посвящены исследованию зависимости амплитуды и длительности токов, протекающих в разрядном контуре лазера на парах бромида меди с независимым нагревом, от параметров активной среды и условий возбуждения. Показано, что на начальной стадии развития разряда в ГРТ CuBr-лазера протекает ток, который обусловлен спецификой зарядки емкостной составляющей импеданса ГРТ. Во время существования фантомного тока активная среда находится под равным потенциалом, что не позволяет предимпульсным электронам в плазме набрать энергию, достаточную для осуществления неупругих соударений в активной среде. Размер ГРТ определяет два предельных случая в поведении токов, протекающих через тиратрон и ГРТ, напряжения на ГРТ и времени начала генерации. В ГРТ больших размеров генерация наблюдается после двух колебательных изменений тока через тиратрон. В случае ГРТ с малыми геометрическими размерами генерация появляется после первого колебательного процесса изменения тока через тиратрон, т.е. раньше по отношению к фронту импульса напряжения. Более детально физические процессы в плазме лазеров на парах бромида меди и процесс пробоя разрядного промежутка изучены в работах Н.А. Юдина [319].

Исследование влияния индуктивности разрядного контура, проведенное в работе [276], показало, что присутствие электроотрицательной добавки HBr в активной среде CuBr-лазера, приводящее к задержке развития разряда и затягиванию переднего фронта импульса тока, является фактором, снижающим требования к скорости нарастания тока через тиратрон. С добавкой HBr активная среда CuBr-лазера менее критична к dl/dt . В большинстве случаев, когда предпочтение отдается надежности устройства, для работы с CuBr-Ne-HBr-лазерами достаточно традиционной схемы прямого разряда накопительного конденсатора с тиратронами типа ТГИ1-1000/25, для которых допустимая dl/dt составляет ~ 4 А/нс, или других схем, обеспечивающих аналогичную скорость нарастания тока.

В работах [2, 320–324] показано, что путем воздействия на электронную

компоненту плазмы газового разряда в ГРТ лазера на парах меди возможно осуществлять управление формой и длительностью импульса генерации. Основным отличием лазера на парах меди от лазера на парах бромида меди с независимым нагревом является разделение функций возбуждения активной среды и нагрева активного объема, что имеет принципиальное значение при манипуляциях с импульсом накачки. В связи с этим представлялось важным определить, каковы возможности управления импульсом генерации в лазерах на парах бромида меди с независимым нагревом.

В лазерах на парах бромида меди, в отличие от лазеров на парах чистых металлов, импульс накачки выполняет не только функции возбуждения активной среды и нагрева, но и функции диссоциации молекул бромида меди в разряде для получения атомарной меди [1–5, 325]. В работе [273] реализован низкочастотный режим генерации CuBr-лазера (50 Гц) с использованием сдвоенных импульсов возбуждения: диссоциирующего и основного. Отличием используемой схемы накачки является применение тиристорного генератора для формирования диссоциирующих импульсов. Применение тиристорного блока формирования импульсов дает возможность исключить из схемы второй дорогостоящий газоразрядный прибор (тиратрон), когда требуется работа CuBr-лазера в низкочастотном режиме или режиме одиночных импульсов генерации.

В работах [271, 274] показана возможность управления генерацией CuBr-лазера с транзисторным коммутатором путем изменения параметров импульса возбуждения. В работах использовались активные элементы малого объема (таблица 2.1) с независимым нагревом активной области ГРТ и контейнеров с бромидом меди. Результаты работы [271] показали, что управлением формой импульса возбуждения – изменением крутизны или формированием «полки» на переднем фронте – можно изменять энергию в импульсе генерации и среднюю мощность CuBr-лазера. Управление может осуществляться модуляцией каждого отдельно взятого импульса. При соответствующем выборе режима управления возможно полное подавление вынужденного излучения. Реализован цуговой

режим генерации путем периодического подавления нескольких импульсов. При таком способе формирования цугов уменьшения энергии в импульсах излучения после паузы не наблюдается, как это имеет место при цуговом характере накачки CuBr-лазеров [267, 325, 326] или частотно-импульсном кодировании излучения [277, 327]. Реализованный в работе [277] способ управления генерацией лазеров на парах металлов позволяет формировать заданную последовательность импульсов излучения либо управлять средней мощностью лазера без применения дополнительных внешних устройств, например, оптических затворов.

В работе [274] показана возможность управления энергией генерации CuBr-лазера путем введения дополнительного импульса с регулируемой амплитудой перед основным импульсом возбуждения. При этом управление может быть реализовано с использованием одного полупроводникового источника накачки. Показано, что увеличение амплитуды дополнительного импульса путем частичного отпириания транзисторов в схеме накачки позволяет уменьшать энергию в импульсе генерации как частично, так и до полного ее подавления. В работе отмечается, что управление энергией в каждом импульсе генерации будет полезным там, где требуется дозирование энергии. В системах «задающий генератор – усилитель мощности» в качестве задающего генератора может использоваться лазер с полупроводниковым источником накачки и управляемой генерацией.

Управление энергией генерации применительно к лазерным мониторам может использоваться в двух основных направлениях:

1. Реализация цугового режима усиления, синхронного с работой скоростной камеры, если частота регистрации камеры меньше частоты работы усилителя яркости. Такой режим работы позволит свести к минимуму воздействие усилителя яркости на объект наблюдения, что актуально при наблюдении объектов, чувствительных к свету, таких как биообъекты и легковоспламеняющиеся вещества.
2. Управление излучением лазера подсветки в лазерном мониторе с независимой подсветкой (бистатический лазерный монитор).

В традиционной моностатической схеме лазерного монитора освещение

объекта усиленным спонтанным излучением усилителя яркости и усиление отраженного света являются самосопряженными [59–62]. В таких проекционных системах отраженный от объекта наблюдения свет должен вернуться в активную среду во время существования инверсии. В силу самоограниченности лазерных переходов время существования инверсии в лазерах на парах меди и ее соединений может варьироваться в диапазоне 20–60 нс без применения специальных схемотехнических решений [320]. Таким образом, дальность наблюдения моностатической схемы лазерного монитора при использовании длиннофокусной линзы потенциально ограничена 5 м при условии, что длительность импульса генерации составляет 60 нс, а отраженный свет возвращается в активную среду примерно в середине импульса генерации (усиления). С точки зрения анализа перспектив увеличения дальности наблюдения лазерного монитора интерес представляет исследование максимально достижимых длительностей импульса генерации в лазерах на парах металлов, в частности в лазерах на парах бромида меди. Получение максимально продолжительной генерации также представляет интерес с точки зрения физической реализуемости подобных режимов работы CuBr-лазеров.

Известны два основных способа увеличения длительности импульса генерации при работе с лазерами на парах металлов: увеличение рабочей емкости с одновременным уменьшением ЧСИ [2, 322] и использование составного коммутатора, состоящего из последовательно подключенных тиратрона и таситрона [321]. В работе [2] наибольшая длительность генерации составила 120 нс для лазера на парах меди. Для лазера на парах бромида наибольшая длительность импульса генерации, достигнутая без применения составного коммутатора, на сегодня составляет 100 нс при ЧСИ 3–5 кГц [32].

Существенно увеличить длительность импульса генерации можно путем управляемого ограничения тока разряда, т.е. путем формирования импульса возбуждения «сложной» формы. В работах [9, 328] этот импульс формировался с помощью таситрона, включенного последовательно в разрядный контур.

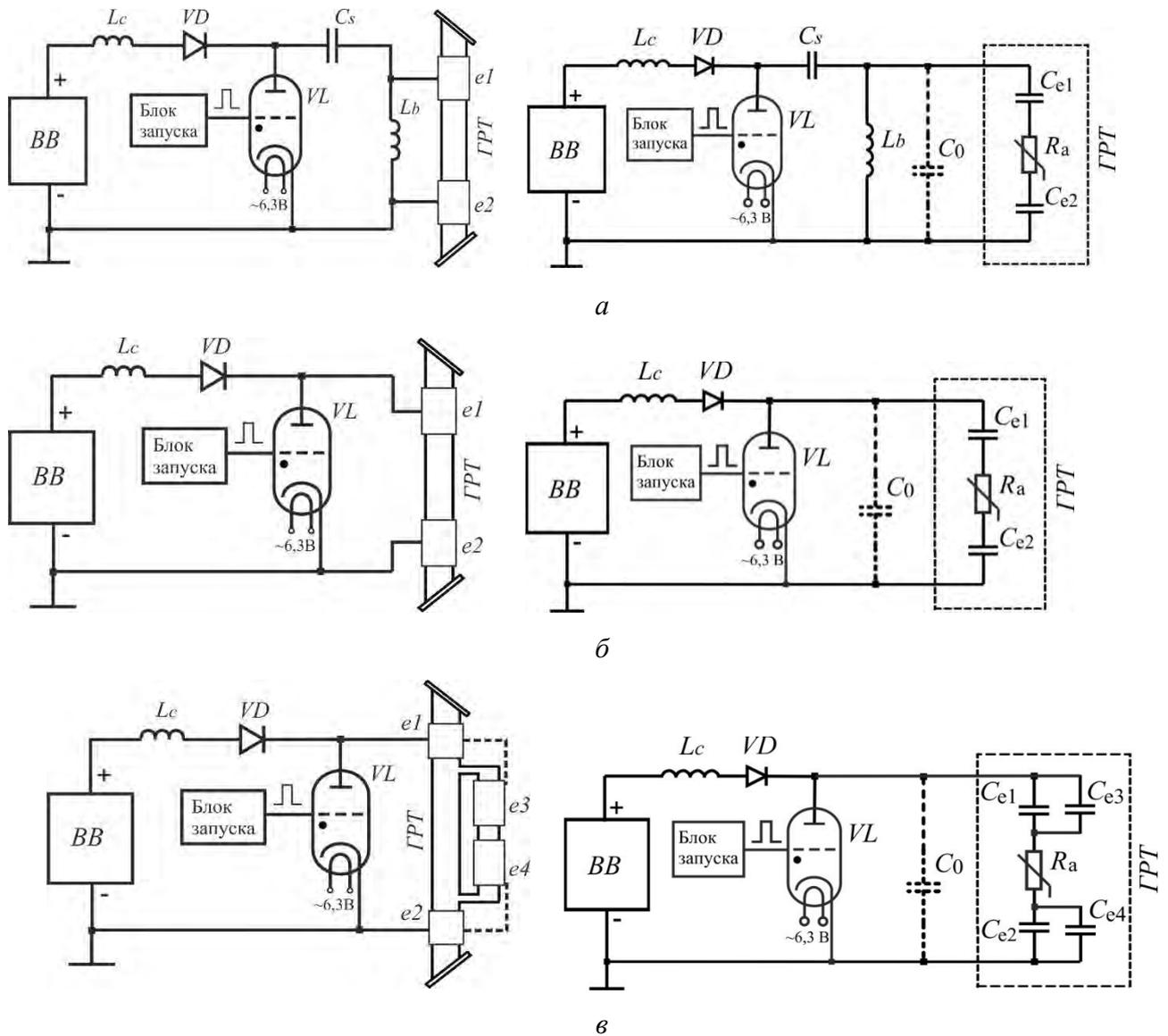
Изменение длительности импульса возбуждения позволяло регулировать длительность импульса генерации в диапазоне 3–200 нс [9] и получить максимальную на то время длительность импульса генерации в лазере на парах меди 230 нс [328].

Работы [275, 278] посвящены исследованию возможности получения длинного импульса генерации в лазерах на парах бромида меди. Увеличение длительности импульсов генерации в трубках среднего и большого диаметров происходит без применения специальных методов при работе на относительно низких для лазеров на парах галогенидов металлов ЧСИ [275, 278]. Наибольшая длительность импульса генерации достигнута в трубках диаметром 25 и 50 мм при частотах следования импульсов 2–4 кГц. При этом следует иметь в виду, что газовый разряд и энергия в импульсе генерации могут быть нестабильными.

В работе [275] представлены первые для лазера на парах бромида меди результаты по увеличению длительности импульса генерации, полученные с использованием схемы накачки с составным коммутатором. Исследование режима «длинного» импульса генерации CuBr-лазеров проведено с использованием пяти ГРТ разного диаметра и длины (таблица 2.1). В работе показано, что в лазерах на самоограниченных переходах в парах металлов, в частности в лазерах на парах меди и бромида меди, существует реальная возможность получения импульсов генерации длительностью более 300 нс. В лазере на парах бромида меди реализован режим с длительностью импульса генерации до 320 нс.

На рисунке 2.5 показаны упрощенные схемы включения ГРТ с емкостными электродами и их схемы замещения. Активные элементы на парах бромида меди с емкостной накачкой конструктивно отличаются от активных элементов традиционных CuBr-лазеров расположением электродов на внешней стенке ГРТ и отсутствием непосредственного контакта материалов электродов с газовой средой. С электротехнической точки зрения отличие заключается в передаче энергии в разряд посредством емкостной связи. Наличие холодных электродных буферных зон в традиционных ГРТ с внутренними электродами также вводит емкостную

связь в разрядный контур, однако величина электродных емкостей относительно небольшая, а после их заряда происходит пробой электродных зон. Соответственно, емкости электродных зон не ограничивают энерговклад в разряд.



а – схема прямого разряда накопительного конденсатора (прямая схема); б – схема без внешней накопительной емкости; в – схема без внешней накопительной емкости с составными электродами; L_c и VD – зарядные дроссель и диод; C_s – накопительный конденсатор; L_b – шунтирующая индуктивность; VL – таситрон ТГУ1-1000/25; $e1$ – $e4$ – электроды; C_{e1} , C_{e2} – емкости электродов; C_0 – паразитная емкость; R_a – активное сопротивление плазмы

Рисунок 2.5 – Схемы накачки ГРТ емкостным разрядом

При отделении электродов от газовой среды диэлектрической стенкой ГРТ пробой электродных зон невозможен, поэтому емкость электродов является параметром, ограничивающим энергозатраты в разряд при использовании схем накачки с внешней накопительной емкостью – схемы прямого разряда накопительного конденсатора и схемы удвоения напряжения Блюмляйна [312]. С другой стороны, значительная величина емкости электродов позволяет использовать электродные емкости в качестве накопительных емкостей. Величина электродной емкости определяется по формуле для цилиндрического конденсатора:

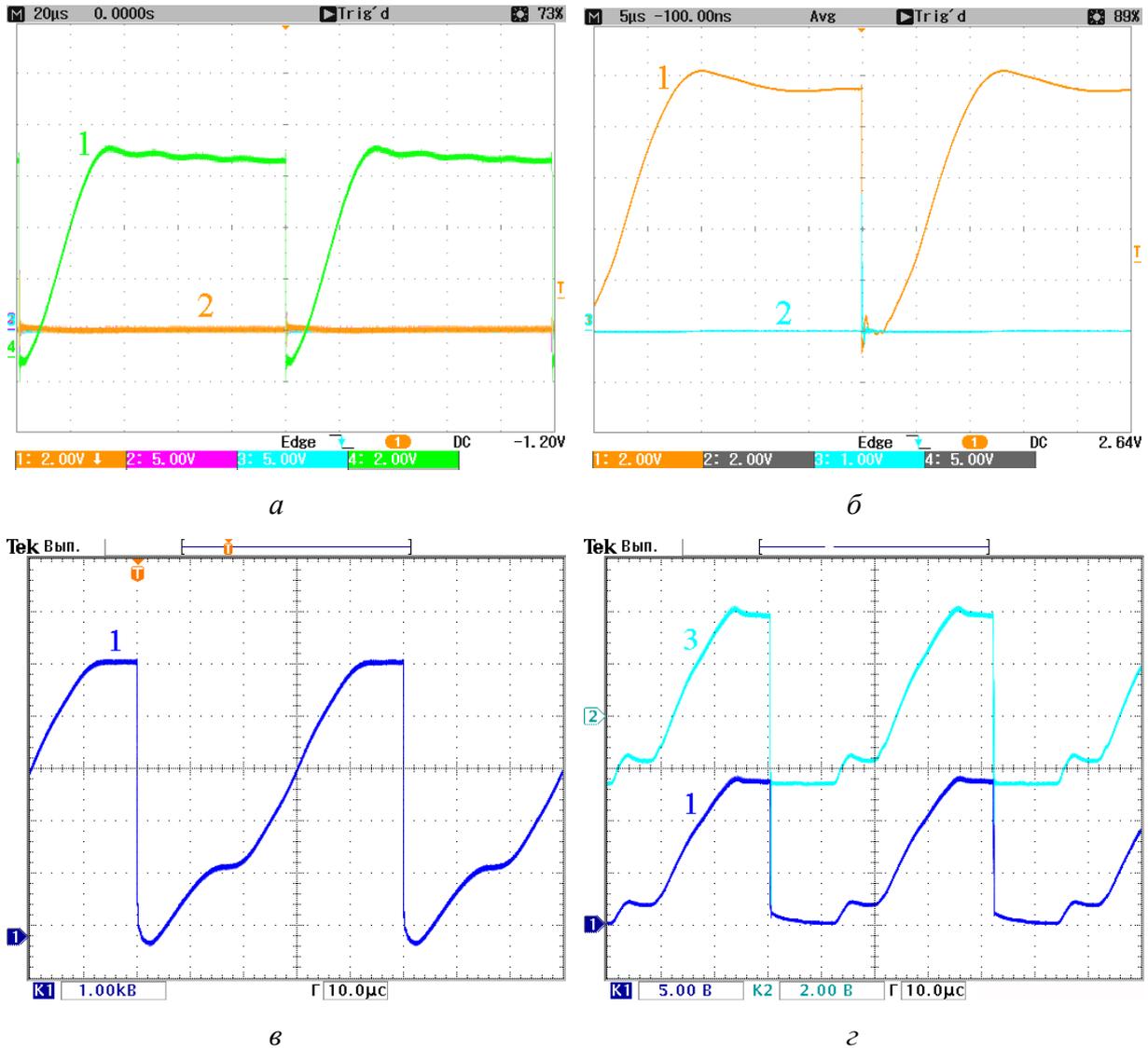
$$C_e = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon h}{\ln(D_2/D_1)}, \quad (2.1)$$

где D_2 – внешний диаметр электрода; $D_1 = D_2 - 2d$ – внутренний диаметр электрода; d – толщина кварцевой стенки (~ 2 мм); h – ширина электрода; ϵ – диэлектрическая проницаемость кварца ($\epsilon \approx 4$). Для ГРТ № 7 (таблица 2.4), представленной на рисунке 2.3, a , b , расчетное значение емкости каждого электрода $C_{e1} = C_{e2} = C_e = 524$ пФ. Если считать емкость разрядного промежутка и емкость ГРТ относительно земли ~ 0 , то собственная емкость ГРТ $C_t = C_e/2 = 262$ пФ.

Исследование частотных и энергетических характеристик CuBr-лазеров с накачкой емкостным разрядом и анализ процессов в разрядном контуре лазера с таким типом накачки показали, что относительно большая величина электродных емкостей позволяет исключить из схемы накопительный конденсатор и шунтирующую индуктивность, роль накопителя энергии при этом выполняет собственная емкость ГРТ. Таким образом, схема без внешней накопительной емкости является наиболее подходящей схемой накачки CuBr-лазера с внешними электродами. Схема без внешней накопительной емкости является наиболее простой, а по эффективности превосходит распространенную на практике схему прямого разряда накопительного конденсатора. Схема без внешней накопительной емкости имеет преимущество и по отношению к схеме Блюмляйна, которое заключается в возможности работы при более высоких частотах повторения импульсов.

Введение добавки HBr в активную среду CuBr-лазеров с накачкой емкостным разрядом позволяет в два и более раз повысить среднюю мощность генерации и КПД, однако, в отличие от обычного импульсно-периодического сильноточного разряда с внутренними электродами, при емкостной накачке наибольший эффект достигается в трубках с большим диаметром разрядного канала. В трубках малого диаметра наличие добавки HBr не приводит к существенному увеличению мощности генерации в рабочем диапазоне мощностей накачки. Влияние добавки проявляется только при повышенных уровнях вводимой мощности. Другим отличием является то, что в случае накачки емкостным разрядом увеличение энергии в импульсе генерации происходит за счет увеличения амплитуды импульса генерации, а не длительности, как при традиционной накачке.

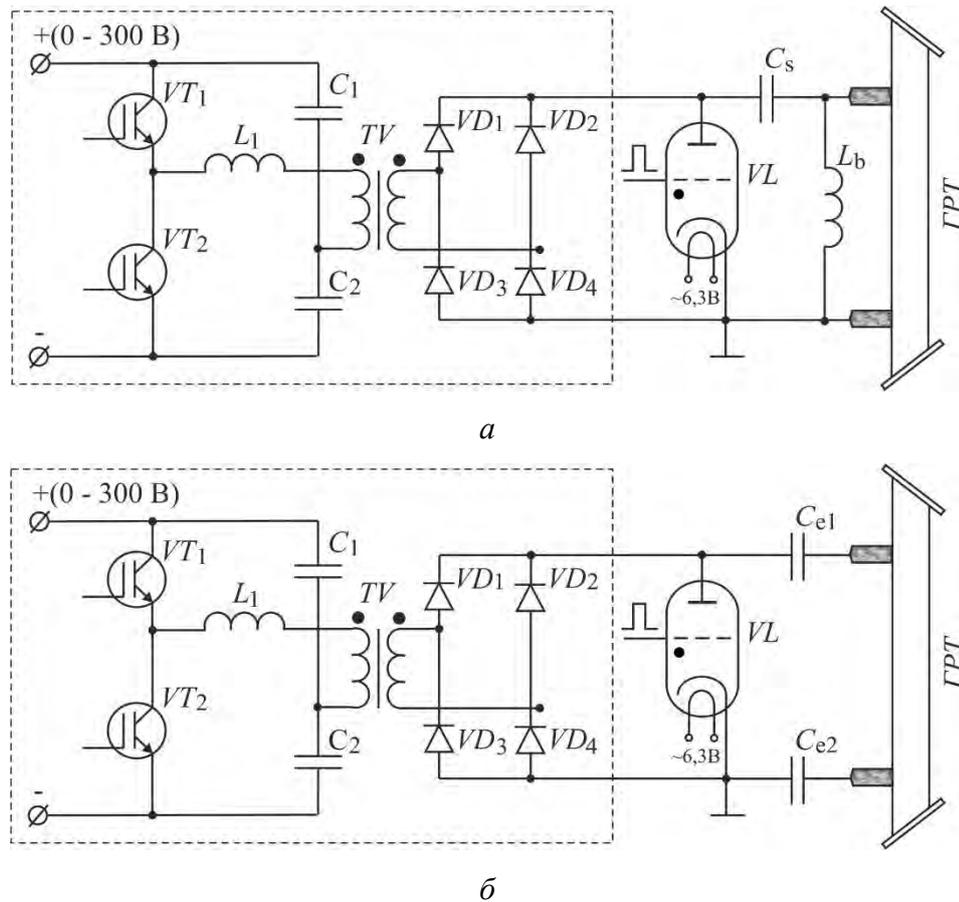
В лазерах на самоограниченных переходах в парах металлов с емкостным возбуждением накачка лазерных переходов происходит во время заряда электродных емкостей в схемах с внешней накопительной емкостью и во время разряда электродных емкостей в схеме без внешней накопительной емкости. Схема с импульсным зарядом рабочей емкости имеет преимущество перед схемой прямого разряда накопительного конденсатора, которое заключается в режиме работы водородного тиратрона. В схеме прямого разряда накопительного конденсатора, как и в схеме без внешней накопительной емкости, большую часть периода повторения импульсов напряжение на аноде остается высоким, ограничивая восстановление диэлектрической прочности тиратрона. В схеме с импульсным зарядом время, в течение которого напряжение на аноде тиратрона остается высоким, сокращено. Это снижает вероятность неконтролируемого пробоя разрядного промежутка и увеличивает срок службы газоразрядного прибора. На рисунке 2.6 приведены осциллограммы заряда накопительной емкости в случае традиционной резонансной схемы заряда накопительного конденсатора и схемы с импульсным зарядом.



а – схема прямого разряда накопительного конденсатора (рисунок 2.4, *а*, традиционная ГРТ); *б* – схема без накопительного конденсатора (рисунок 2.5, *б*, емкостная ГРТ); *в* – схема с импульсным зарядом (рисунок 2.7, *а*, традиционная ГРТ); *г* – схема с импульсным зарядом (рисунок 2.7, *б*, модельная)

Рисунок 2.6 – Осциллограммы напряжения на аноде тиратрона (1), тока через ГРТ (2) и напряжения на катоде ГРТ (3)

В работе [279] модельным способом показана возможность использования схемы с импульсным зарядом рабочей емкости для работы с ГРТ с емкостной накачкой, что дало нам основание рассчитывать на получение высоких мощностей генерации в трубках с внешними электродами, которые были достигнуты в работах [313–316]. Схема моделирования емкостной накачки приведена на рисунке 2.7, *б*.



Пунктиром обведена схема импульсного заряда. C_s – накопительная емкость; L_a – дополнительная индуктивность; L_b – шунтирующая индуктивность; VL – тиратрон; C_{e1} , C_{e2} – конденсаторы, моделирующие емкости электродов емкостной ГРТ; VD_1 – VD_4 – диоды; TV – импульсный трансформатор; C_1 , C_2 – емкости фильтра; VT_1 , VT_2 – IGBT-транзисторы

Рисунок 2.7 – Схема прямого разряда накопительного конденсатора с импульсным зарядом (а) и модельная схема (б)

2.3.2. Двухканальный источник высоковольтных импульсов

Моностабический (традиционный) лазерный монитор имеет самосопряженную подсветку, при которой объект освещается собственным сверхизлучением усилителя яркости. Освещение объекта и усиление отраженного от поверхности света осуществляется одним активным элементом. Соответственно, используется одна ГРТ и один источник высоковольтных импульсов. Лазерный монитор с независимой подсветкой предполагает использование второго активного элемента, работающего в режиме генератора. Принимая во внимание, что режим

работы лазеров и усилителей яркости на парах металлов является импульсно-периодическим с длительностью импульсов генерации 20–40 нс, работа двух активных элементов требует прецизионного согласования во времени. Лазерный монитор с независимой подсветкой по своей сути является системой «задающий генератор-усилитель мощности» (МОПА-система). Типовой схемой накачки двух активных элементов лазеров на парах металлов в МОПА-системе является схема с двумя отдельными тиратронными генераторами импульсов, синхронизованными по импульсу запуска [6].

В работах [329, 330] была предпринята попытка реализации синхронной работы двух ГРТ с помощью электронного блока синхронизации. Генератор и усилитель имели схемы накачки с импульсным зарядом накопительной емкости, которые управлялись микроконтроллерами ATmega8 с внешними входами синхронизации от оптоволоконных приемников HFBR-2522. Схема синхронизации была реализована на основе интегральных одновибраторов типа АГЗ и формировала два сигнала с регулируемой задержкой. Схема соединения элементов показана на рисунке 2.8, а.

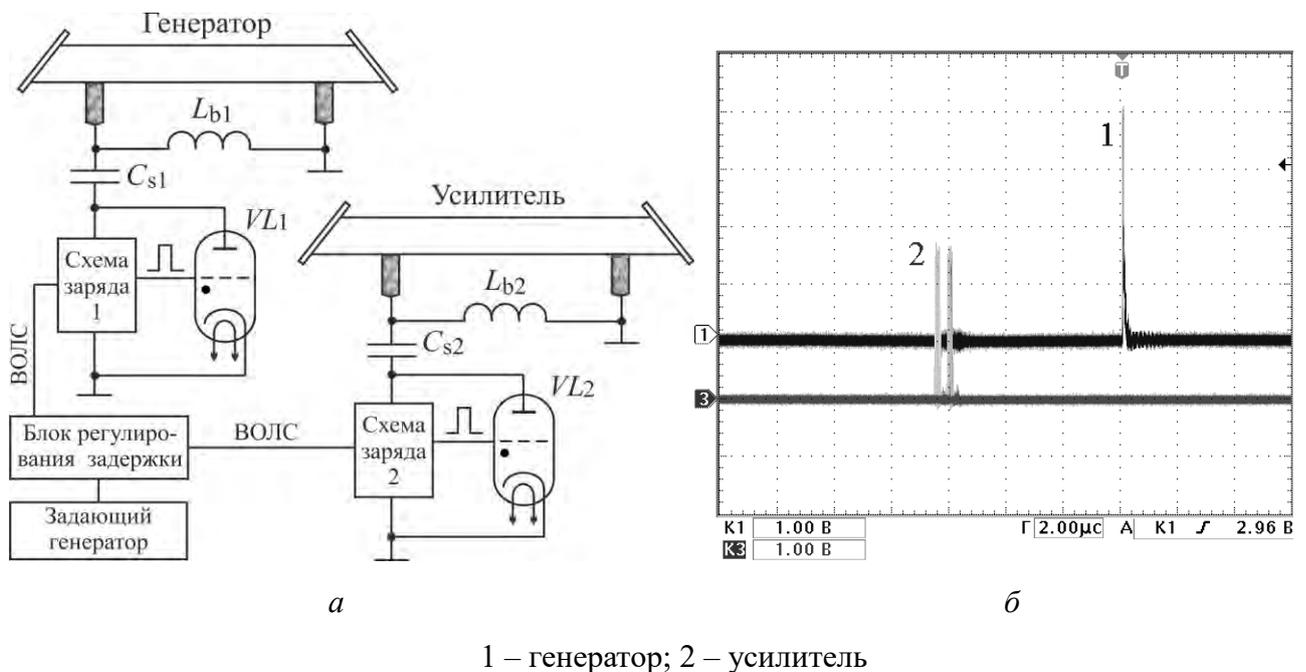


Рисунок 2.8 – Схема синхронизации двух активных элементов (а) и импульсы накачки (б)

В данной реализации заряд накопительных емкостей осуществлялся с несущественным временным разбросом, при этом синхронный запуск тиратронов с точностью единицы наносекунд оказался невозможным. Система синхронизации построена так, что тиратроны в схемах накачки запускались разными драйверами от разных микроконтроллеров. В результате возникала постоянная задержка 6 мкс с «дребезгом» до ~ 460 нс, который складывался из длительности машинного такта микроконтроллера ~ 400 нс и разброса срабатывания тиратронов до 60 нс (рисунок 2.8, б). Постоянную задержку можно было скомпенсировать, дребезг – нет. Поскольку длительность импульса усилителя яркости составляла ~ 40 нс, то усиление изображения происходило в случайном порядке.

На рисунке 2.9 показан вариант реализации синхронной работы двух активных элементов с использованием кабельных линий задержки. Подобная МОПА-система использовалась в работе [272] для исследования характеристик усиления активной среды на парах бромида меди. Каждый источник высоковольтных импульсов строился по схеме с импульсным зарядом накопительной емкости (рисунок 2.7, а). Заряд накопительных емкостей управлялся микроконтроллерами, которые синхронизовались от одного задающего генератора. Импульсы запуска на входы тиратронов подавались от одного тиратронного генератора импульсов с выходным импульсным трансформатором через регулируемые кабельные линии задержки.

Исторически МОПА-системы создавались для получения высокой мощности излучения в луче с малой расходимостью для задач лазерного разделения изотопов и прецизионной обработки материалов [6, 87]. Поэтому варианты МОПА-систем малой мощности не представляли практического интереса. В работе [121] предлагалось использовать дистанционную схему лазерного монитора с независимой подсветкой для визуализации поверхности дивертора и первой стенки ITER, в которой предполагалось использовать лазер подсветки высокой мощности (10 Вт). Соответственно, схемы накачки МОПА-систем на основе одного высоковольтного блока заряда накопительных емкостей также не рассматривались.

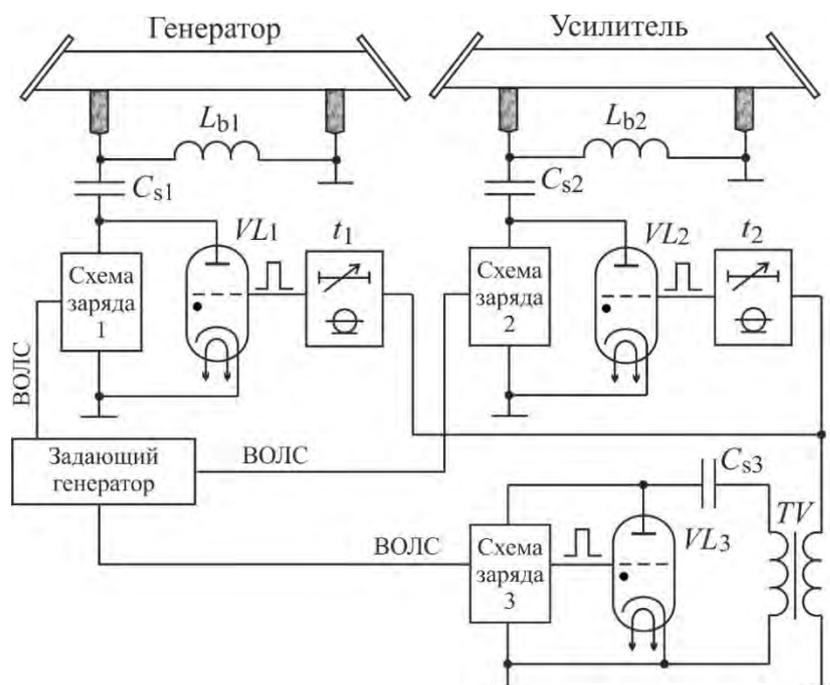
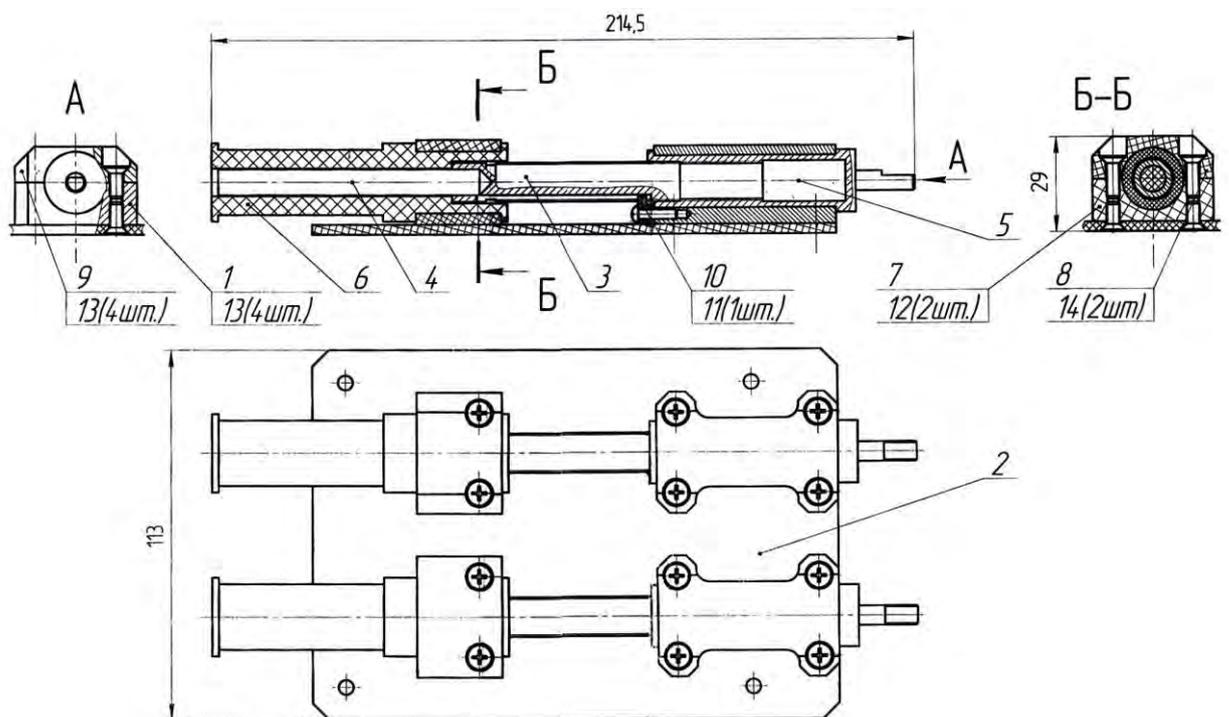


Рисунок 2.9 – Схема синхронизации двух активных элементов с кабельными линиями задержки

При исследовании инициирования и горения легковоспламеняющихся веществ, таких как смеси нанопорошков металлов, необходимо снизить до минимума воздействие излучения лазерного монитора. Поэтому применение интенсивных пучков для подсветки поверхности является нежелательным. При разработке лазерного монитора с независимой подсветкой в данной диссертационной работе наш коллектив ориентировался на использование ГРТ с небольшой мощностью генерации (ГРТ № 5, 6, таблица 2.3). Для накачки данных ГРТ достаточно использовать накопительные емкости 680–1000 пФ, заряжаемые до напряжения 5–6 кВ. Учитывая, что разряд емкостей в МОПА-системе осуществляется практически синхронно и время разряда существенно превышает время импульсного заряда, работа импульсного источника заряда на две емкости C_{s1} и C_{s2} будет аналогична работе на одну емкость ($C_{s1}+C_{s2}$). Тогда проектная мощность импульсного источника питания при частоте повторения импульсов 20 кГц составит $\sim 0,7$ кВт. Такой источник может быть реализован на основе одного импульсного трансформатора с воздушным охлаждением, что обеспечит минимальные массу и габариты.

Применение коаксиальной кабельной линии задержки позволяет обеспечить

наносекундную точность синхронизации, но имеет следующие недостатки: значительные массу и габариты, и невозможность плавной регулировки задержки. В работах [329, 330] рассмотрен вариант реализации линий задержки на основе ферровариометров, а также приведено конструктивное исполнение согласованных линий задержки на основе двух ферровариометров. На рисунке 2.10 приведен чертёж каркаса, который использовался для изготовления ферровариометров [329]. В качестве сердечников использовались ферритовые стержни, которые прикреплялись к подвижному стержню 3 и вставлялись в полость 4 каркаса, на который наматывалась обмотка индуктивности.



- 1 – нижняя часть крепления втулки с резьбой; 2 – основание всего блока вариометров;
 3 – втулка со шпоночным пазом; 4 – полость для ферритового стержня; 5 – втулка с резьбой;
 6 – каркас для обмотки; 7 – нижняя часть крепления каркаса; 8 – верхняя часть крепления
 каркаса; 9 – верхняя часть крепления втулки с резьбой; 10 – фиксатор

Рисунок 2.10 – Чертёж каркаса для переменных индуктивностей (ферровариометров) [329]

В работе [331] нашими коллегами реализован двухканальный генератор импульсов для синхронного запуска двух тиратронов с использованием переменных индуктивностей (вариометров). Конструкция индуктивностей в работе

[331] не представлена. Основными особенностями генератора импульсов являются его реализация на основе тиратрона, наличие двух импульсных трансформаторов, двух накопительных емкостей, а также двух емкостей, включенных последовательно переменным индуктивностям. Разработанный генератор позволяет формировать временной сдвиг импульсов запуска тиратронов с точностью позиционирования 1 нс. На практике синхронизация световых сигналов осуществляется с точностью ± 2 нс [6] и обусловлена в основном нестабильностью запаздывания анодного тока тиратрона по отношению к сеточному напряжению. Для большинства тиратронов, произведенных в советское время, разброс фронта тока анода не превышает 5 нс [18]. Для современных тиратронов, например ТПИ1-0,2к/12, приводится длительность фронта тока анода 1–4 нс [19].

Недостатком схемы с применением отдельного тиратронного блока формирования импульсов запуска для тиратронов основной схемы накачки ГРТ является высокая стоимость, значительные масса и габаритные параметры, а также ограничение срока службы, вызванное ограниченным ресурсом тиратрона. Более предпочтительным вариантом, на наш взгляд, является применение транзисторного блока запуска. На рисунке 2.11 приведены фотографии разработанного источника импульсного заряда накопительных емкостей (C_{s1} , C_{s2}) и блока формирования высоковольтных импульсов накачки на основе двух тиратронов типа ТГИ1-1000/25 и ферровариометров для регулирования задержки между импульсами возбуждения.

На рисунке 2.12 приведена схема лазерного монитора с независимой подсветкой и синхронной накачкой двух активных элементов с транзисторным блоком запуска и линиями задержки на основе ферровариометров. Лазерный монитор на рисунке 2.12 построен с использованием схемы формирования изображения усилителя яркости на основе вогнутого зеркала. В качестве активного элемента использовалась ГРТ № 6 (таблица 2.3). Для освещения поверхности объекта исследования использовался лазер на основе ГРТ № 5 (таблица 2.3) с одним зеркалом в качестве резонатора.

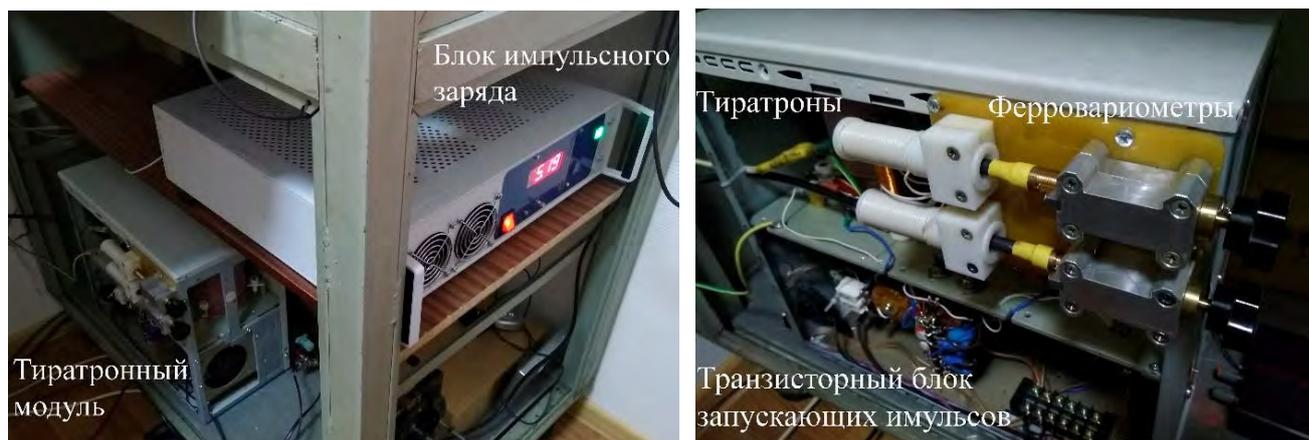
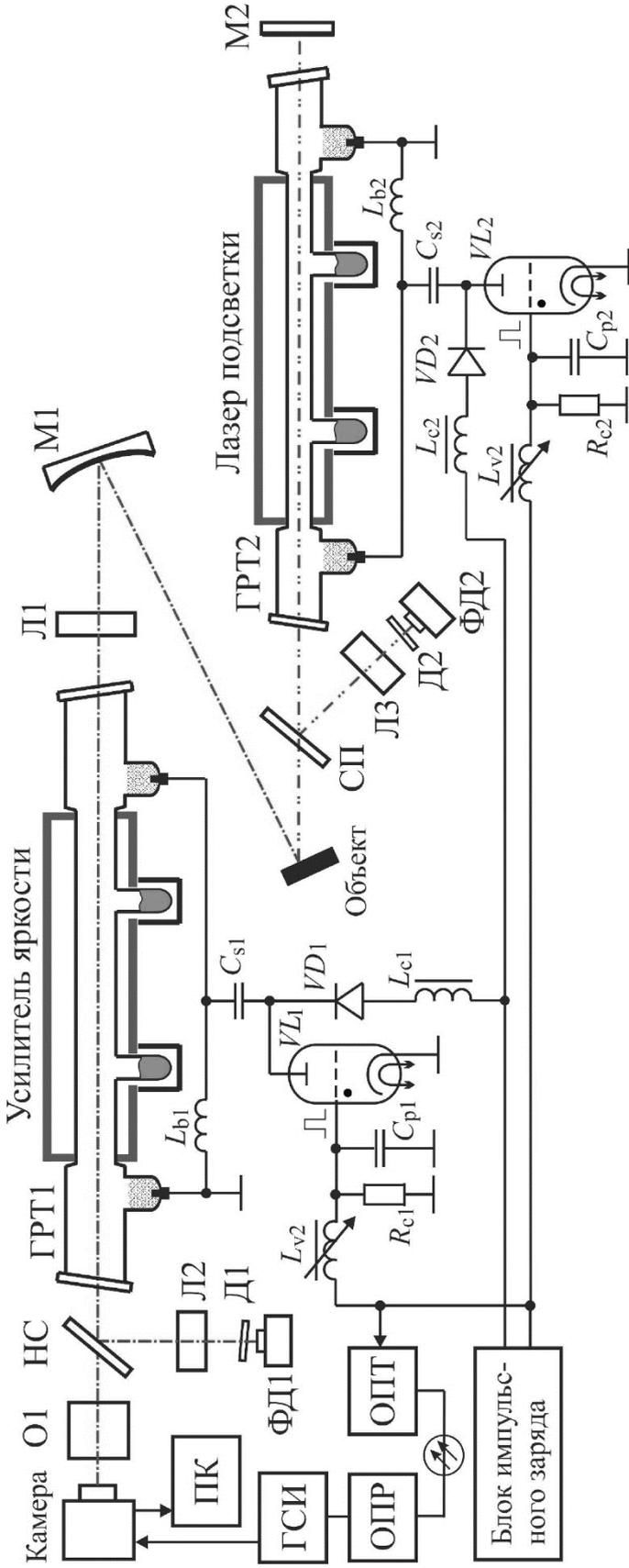


Рисунок 2.11 – Источник импульсного заряда накопительных емкостей (1) и блок формирования синхронных импульсов накачки (2)

Каждый канал двухканального источника высоковольтных импульсов представляет собой тиратронную схему с импульсным зарядом и прямым разрядом накопительного конденсатора. В межимпульсный период, когда оба тиратрона закрыты, накопительные конденсаторы заряжаются токами, протекающими от блока импульсного заряда через зарядные индуктивности, зарядные диоды и шунтирующие индуктивности. Когда тиратрон $V L_1$ открыт, накопительный конденсатор C_{s1} разряжается через ГРТ1, формируя импульсы накачки, которые создают излучение сверхсветимости усилителя яркости. Когда тиратрон $V L_2$ открыт, накопительный конденсатор C_{s2} разряжается через ГРТ2, формируя импульсы накачки лазера подсветки, которые создают излучение подсветки. Накопительная емкость в разрядном контуре ГРТ1 составляла 1000 пФ, в разрядном контуре ГРТ2 – 680 пФ. Величины шунтирующих индуктивностей были примерно одинаковыми и составляли $L_{b1} = L_{b2} = 0,1$ мГн. Емкости заряжались до одинакового напряжения $\sim 5,2$ кВ с регулируемой частотой 16–20 кГц. Максимально рабочее напряжение заряда емкостей составляло 6,2 кВ. Накопительные емкости коммутировались на ГРТ тиратронами ТГИ1-1000/25. Заряд накопительных емкостей осуществлялся от блока импульсного заряда (одного импульсного преобразователя), выполненного с использованием инверторной схемы с входным стабилизатором напряжения [332, 333].



$V/L_1, V/L_2$ – тиратроны; C_{s1}, C_{s2} – накопительные конденсаторы; VD_1, VD_2 – зарядные диоды; L_{b1}, L_{b2} – шунтирующие индуктивности; L_{v1}, L_{v2} – ферровариометры; R_{c1}, R_{c2} – согласующие резисторы; C_{p1}, C_{p2} – обостряющие конденсаторы; M_1 – вогнутое зеркало; M_2 – плоское зеркало; L_1 – L_3 – собирающие линзы; $НС$ – нейтральная светофильтр; O_1, D_2 – диффузоры; $ФД_1, ФД_2$ – фотодиоды; $СП$ – светоразделительная пластина; $ОПТ$ – оптический передатчик; $ОПР$ – оптический приемник; $ГСИ$ – генератор синхронимпульсов; $ПК$ – персональный компьютер

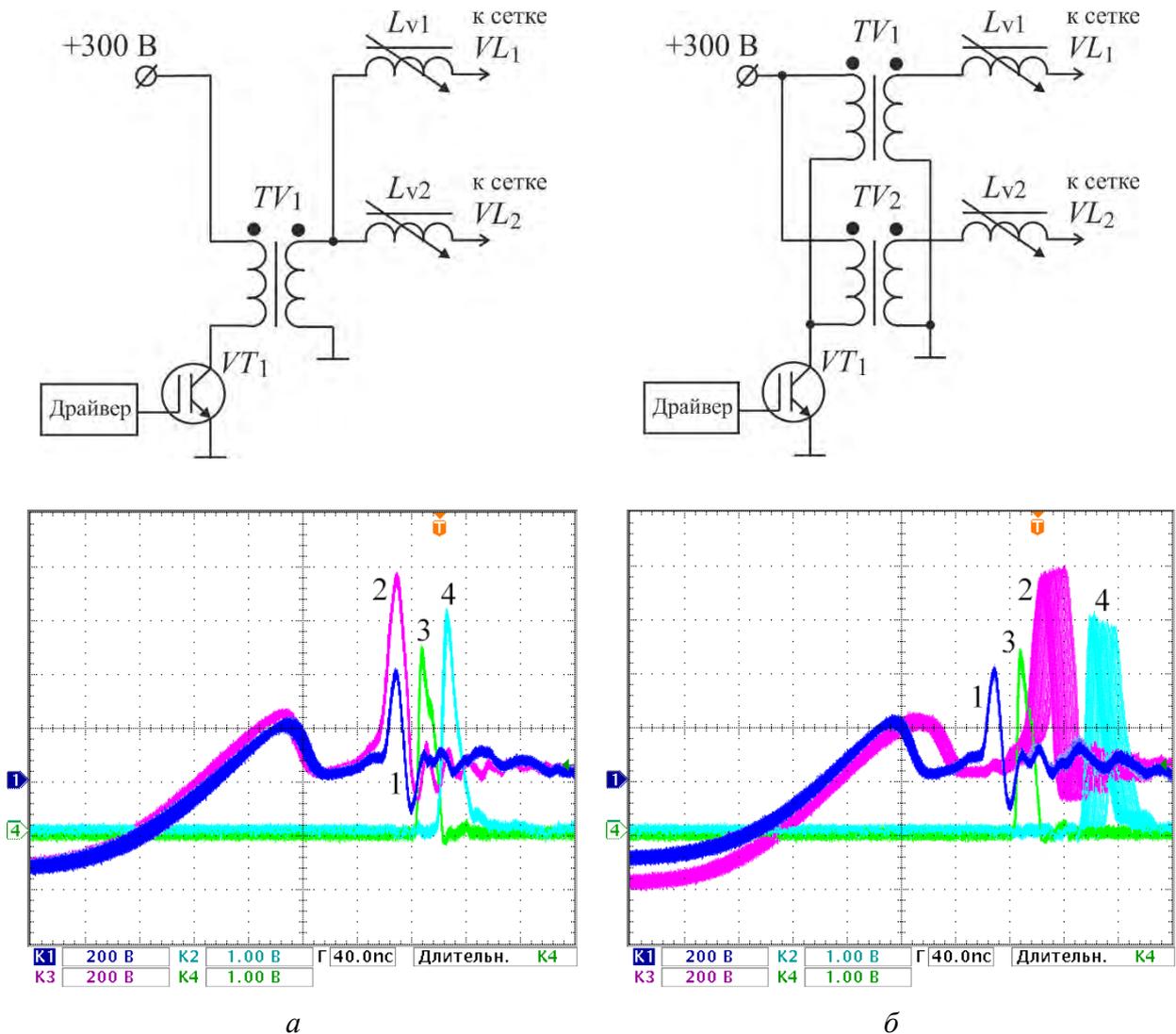
Рисунок 2.12 – Схема синхронной накачки двух активных элементов на основе одного источника импульсного заряда

Синхроимпульс, также формируемый блоком импульсного заряда, подавался на сетки тиратронов через ферровариометры, позволяющие регулировать задержку распространения сигнала в диапазоне от 0 до 50 нс. Синхроимпульс формировался схемой на основе импульсного трансформатора и транзисторного ключа и обеспечивал формирование импульсов с разбросом не более 2 нс. Величины емкостей обостряющих конденсаторов C_{p1} , C_{p2} и согласующих резисторов R_{c1} , R_{c2} подбирались эмпирическим путем для согласования импеданса блока импульсного заряда с сеточным импедансом тиратронов и обеспечения их устойчивой работы. На рисунке 2.13 приведены осциллограммы импульсов запуска на сетках тиратронов при одинаковом положении ферровариометров, а также схемы подключения каналов запуска тиратронов. Для сравнения показаны импульсы запуска для случая, когда каждый тиратрон запускался от отдельного трансформатора, которые подключались к одному транзистору.

Как следует из полученных результатов, простое отличие в изготовлении импульсных трансформаторов приводит к джиттеру импульсов запуска по отношению друг к другу до 20 нс. Такое значительное рассогласование импульсов накачки ГРТ является неприемлемым для бистатического лазерного монитора. Поэтому в экспериментах, описанных далее в данной работе, применялась схема запуска, показанная на рисунке 2.13, а. Разработанная схема позволяет осуществлять формирование импульсов генерации активных элементов на парах бромида меди с регулируемой задержкой по отношению друг к другу от -50 нс до 50 нс с джиттером, не превышающим 2 нс. Импульсы генерации лазера подсветки регистрировались фотодиодом ФД2. Импульсы усиленного излучения усилителя яркости регистрировались фотодиодом ФД1 (рисунок 2.12).

На рисунке 2.14 приведены осциллограммы импульсов генерации и импульсов напряжения на ГРТ и тиратронах (на накопительных емкостях в установившемся режиме) при задержках $\Delta t = 10$ нс и $\Delta t = 30$ нс. Из представленных осциллограмм следует, что обе накопительные емкости заряжаются до одинакового напряжения. Амплитуды напряжений на ГРТ отличаются незначительно. Длительность

импульса излучения лазера подсветки (ГРТ №5) составляет 20 нс. Длительность импульса излучения усилителя яркости составляет 35 нс.



a – оба тиратрона запускаются от одного трансформатора; *б* – тиратроны запускаются от отдельных трансформаторов; 1 – импульс напряжения на сетке VL_2 ; 2 – импульс напряжения на сетке VL_1 ; 3 – импульс излучения лазера подсветки; 4 – импульс излучения усилителя яркости

Рисунок 2.13 – Схемы формирования импульсов запуска тиратронов

При положительной задержке между импульсами, которая имеет место при работе бистатической схемы лазерного монитора, излучение усилителя яркости не оказывает влияния на излучение лазера подсветки. Излучение лазера подсветки, наоборот, оказывает влияние на излучение усилителя яркости в диапазоне задержек, когда излучение лазера подсветки, отраженное от объекта исследования, приходит

в усилитель яркости во время существования инверсии населенностей, в частности, при $\Delta t = 10$ нс. При $\Delta t = 30$ нс излучение лазера подсветки не усиливается активной средой усилителя яркости, о чем можно судить по форме импульса излучения усилителя яркости. В диапазоне задержки импульса излучения усилителя яркости по отношению к импульсу излучения лазера подсветки Δt от -5 нс до 20 нс наблюдается значительное увеличение яркости и повышение контрастности изображений усилителя яркости. Наибольшая яркость изображений в экспериментах соответствовала $\Delta t = 10$ нс.

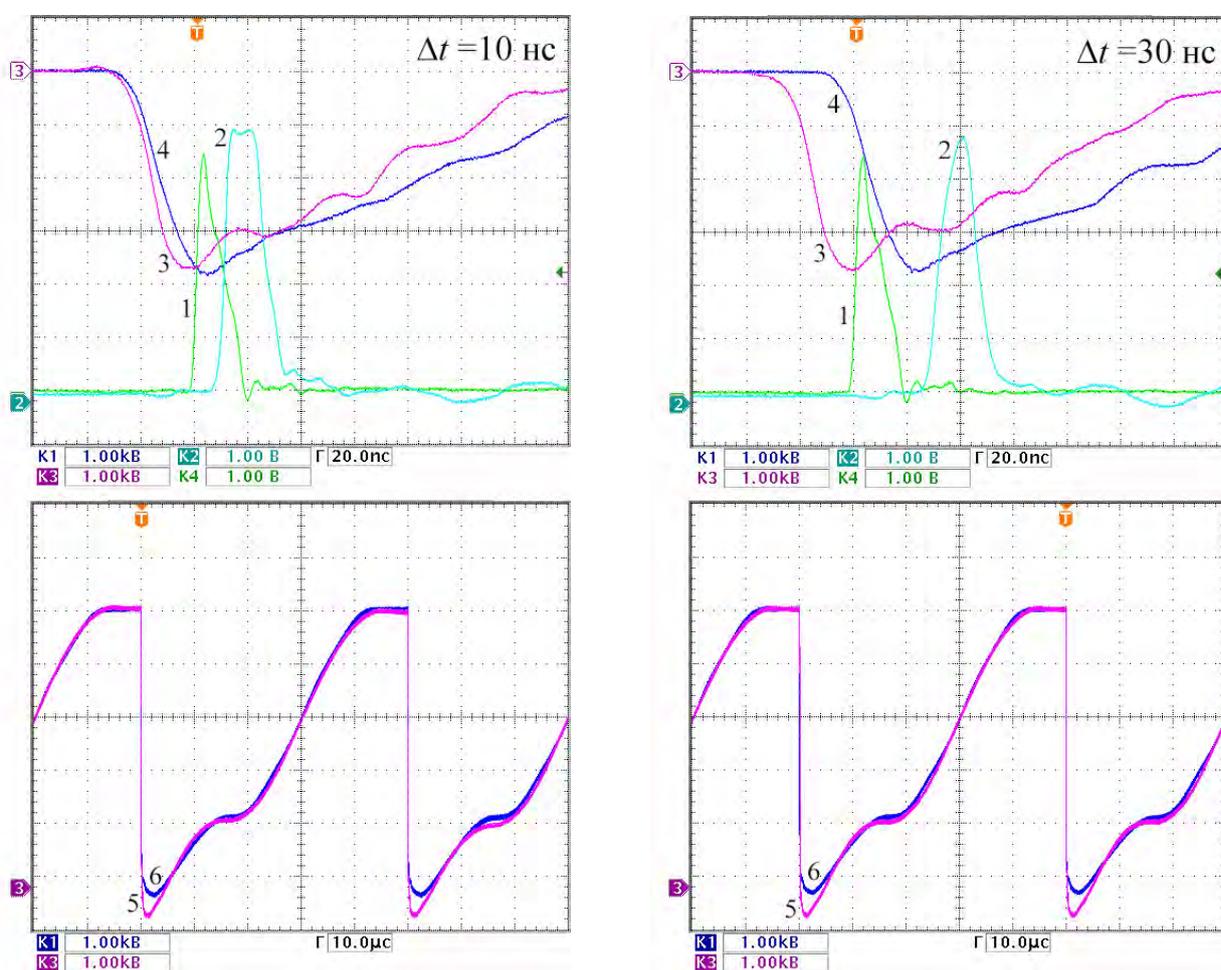


Рисунок 2.14 – Импульсы излучения лазера подсветки (1), усилителя яркости (2), напряжение на ГРТ лазера подсветки (3), ГРТ усилителя яркости (4), тиратроне $VL1$ (5) (рисунок 2.12), тиратроне $VL2$ (6) при различной задержке Δt между импульсами

Существенным достижением в области использования лазерных мониторов стало применение синхронизации цифровой камеры и усилителя яркости [126, 132,

133]. Вопрос синхронизации цифровой камеры является принципиальным для обеспечения одинаковой экспозиции цифровой камеры, с одной стороны, и увеличения временного разрешения лазерного монитора, с другой стороны. В схеме на рисунке 2.12 синхроимпульсы, формируемые блоком импульсного заряда, подаются на сетки тиратронов посредством ферровариометров. Одновременно эти импульсы поступают на вход оптического передатчика, в котором преобразуется в оптический сигнал и передаются по оптоволокну в оптический приемник, в котором преобразуется обратно в электрический сигнал и поступают на вход генератора синхроимпульсов, обеспечивая гальваническую развязку блока импульсного заряда и генератора синхроимпульсов. В качестве генератора синхроимпульсов для цифровой камеры использовался генератор Актаком AWG-4122 с возможностью внешней синхронизации. Применение коммерческого генератора синхроимпульсов, несмотря на более высокую стоимость, обеспечивает высокую стабильность синхронизации по сравнению с синхронизацией на основе логических элементов [132].

2.4. Выводы по главе 2

Комплексное исследование характеристик газоразрядных трубок на парах бромида меди и схем накачки продемонстрировало широкий диапазон условий, в которых могут работать активные среды на парах бромида меди. Основные выводы по полученным результатам.

1. Использование независимого нагрева активной области ГРТ и контейнеров с рабочим веществом дает возможность использовать усилитель яркости на основе ГРТ относительно большого диаметра (1,5–3 см) в режимах с малой мощностью накачки и малой выходной мощностью, что имеет принципиальное значение при разработке лазерного монитора для исследования легковоспламеняющихся энергетических материалов. Использование терморегулятора с точностью стабилизации ± 1 °С снизило флуктуации энергии импульса генерации, вызванные флуктуациями концентрации паров бромида меди.

2. Независимый нагрев активной области ГРТ и контейнеров с бромидом меди дает возможность исследовать различные режимы работы активных элементов: режим пониженного энерговклада, цуговой режим, режим сдвоенных импульсов, режим длинного импульса.

3. Малая требуемая мощность накачки ГРТ с независимым нагревом позволила использовать маломощный источник высоковольтных импульсов, уменьшить габариты и вес системы. Разработан двухканальный источник накачки двух активных элементов на основе одного импульсного преобразователя, который заряжает две накопительные емкости. Источник обеспечивает стабильную работу двух ГРТ, одна из которых может иметь внешние (емкостные) электроды.

Дальнейшим совершенствованием двухканального источника накачки может стать уменьшение его массы и габаритов за счет замены тиратронов ТГИ1-1000/25 на более компактные.

4. Высокие достигнутые мощности генерации лазеров на парах бромида меди с емкостной накачкой и гауссов пучок практически в любом режиме работы открывают перспективы их использования в практических задачах. Такие активные элементы могут использоваться в качестве усилителей яркости и лазеров подсветки в лабораторных активных оптических системах с усилением яркости. При этом следует принимать во внимание особенности эксплуатации таких активных элементов, ограничивающих их использование в мобильных диагностических комплексах: значительные размеры электродных областей, находящихся под высоким напряжением, и более высокие рабочие напряжения, необходимые для эффективной работы таких ГРТ, по сравнению с традиционными ГРТ на парах бромида меди.

Глава 3. Радиальное распределение излучения усилителей яркости на парах бромиды меди

3.1. Радиальное распределение усиления активной среды в системе «задающий генератор – усилитель мощности»

Основными параметрами усилителя яркости лазерного монитора, используемого для визуализации горения нанопорошков металлов, является средняя мощность усиленного спонтанного излучения, диаметр пучка и усиление активной среды. Оптические характеристики активной среды на парах бромиды меди зависят от условий работы активного элемента, таких как концентрация паров рабочего вещества в активном объеме, присутствие добавки бромоводорода и мощности накачки. Для исследования радиального распределения усиления в активной среде на парах бромиды меди от условий работы использовалась оптическая схема с двухпроходным усилением и система «задающий генератор – усилитель мощности».

Наиболее значимые результаты в области лазерного мониторинга, достигнутые коллективом при участии автора диссертации в 2009–2014 гг., получены с использованием ГРТ № 2, 3 (таблица 2.3), имеющих достаточно высокую среднюю мощность сверхизлучения (400–500 мВт). Учитывая значительный интерес коллектива авторов под научным руководством профессора ТПУ Г.С. Евтушенко к исследованию влияния активных примесей на частотные и энергетические характеристики лазеров на парах бромиды меди [10, 11, 28, 47, 122], перспектива применения активной среды на парах бромиды меди в лазерных мониторах связывалась с использованием активных примесей, способствующих повышению мощности генерации, частоты следования импульсов и выравнивающих профиль излучения [68, 122]. Соответственно, исследование характеристик усиления проводилось также в этом аспекте.

В работе [272] исследовалось влияние активной добавки HBr и температуры

контейнеров с бромидом меди на характеристики усиления CuBr-лазера с внешним нагревом активной зоны ГРТ большого объема (ГРТ № 5 в таблице 2.2). Характеристики излучения исследовались в МОПА-системе, в которой задающий генератор работал с конфокальным неустойчивым резонатором телескопического типа.

Результаты измерений интегрального коэффициента усиления в области входного сигнала от 15 мВт до 1,9 Вт при различных температурах контейнеров с бромидом меди представлены на рисунке 3.1. Диаметр входного пучка составлял 3 см. Как показано на рисунке, при малых входных сигналах (<400 мВт) коэффициент усиления существенно зависит от концентрации паров рабочего вещества. В области больших сигналов коэффициент насыщенного усиления практически одинаковый и примерно равен 5. На рисунке 3.2 показана зависимость профиля усиления от температуры контейнеров с рабочим веществом при отсутствии (*a*) и с добавкой (*б*) HBr. С ростом концентрации паров рабочего вещества, профиль усиления сужается как с добавкой, так и без добавки HBr. При этом усиление в осевой области ГРТ увеличивается. При одинаковой температуре контейнеров с бромидом меди профиль усиления с добавкой почти в два раза уже, чем без добавки, в то время как усиление на оси возрастает в 3–4 раза. Такое поведение активной среды, вероятно, связано с малым энерговыделением в разряд ($\sim 0,17$ Вт/см³ при мощности накачки $P_n = 1,44$ кВт). Максимальная ширина профиля усиления для исследованной ГРТ диаметром 8 см составила 3 см (при учете коэффициента усиления $P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} > 2$) и достигалась в режиме без добавки HBr.

Полученные результаты свидетельствуют о неэффективном использовании активного объема усилителя мощности в условиях эксперимента и нецелесообразности применения подобных активных элементов для создания компактных лазерных проекционных систем для практического использования. Тем не менее активные элементы CuBr-лазеров большого объема могут использоваться для определения оптимальных геометрических размеров ГРТ для МОПА-систем, с одной стороны. С другой стороны, диаметр пучка 3 см при

относительно небольшой мощности накачки $\sim 1,5$ кВт является относительно большим по сравнению с имеющимися данными для Cu- и CuBr-лазеров [6, 68], и активные элементы с большой апертурой могут быть востребованы при построении экспериментальных лазерных проекционных микроскопов и лазерных мониторов.

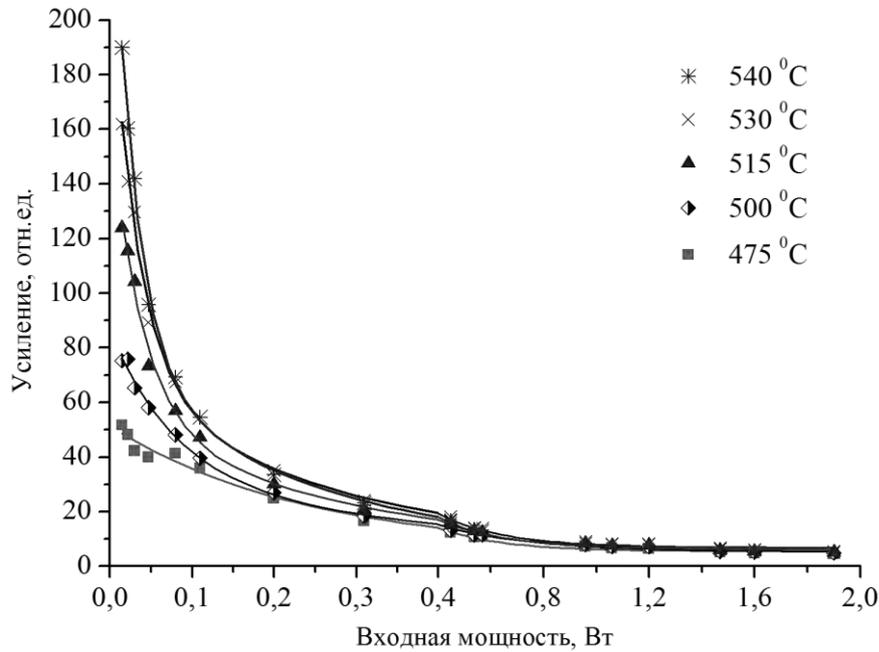
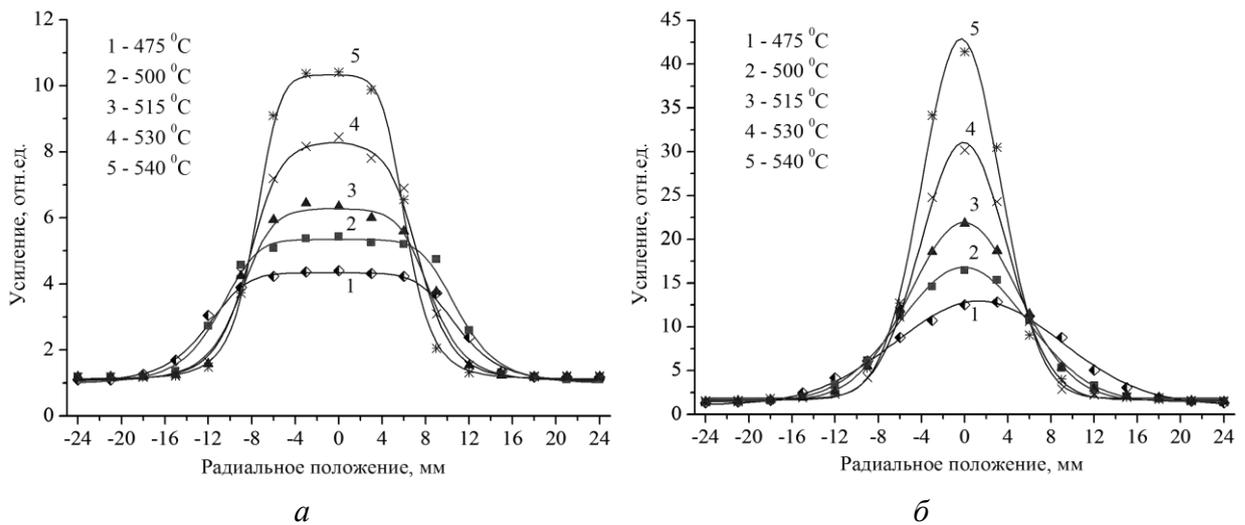


Рисунок 3.1 – Интегральный коэффициент усиления среды CuBr-лазера при различной температуре контейнеров с рабочим веществом (с добавкой HBr) [272]

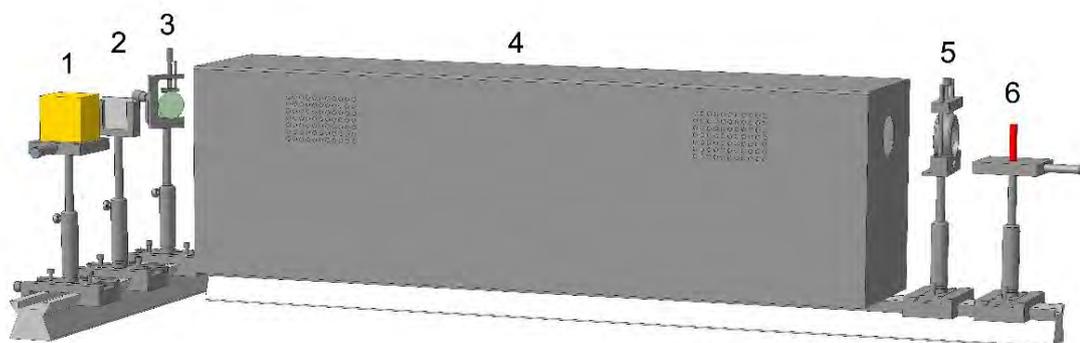


а – без добавки HBr; б – с добавкой HBr ($P_n = 1,44$ кВт) [272]

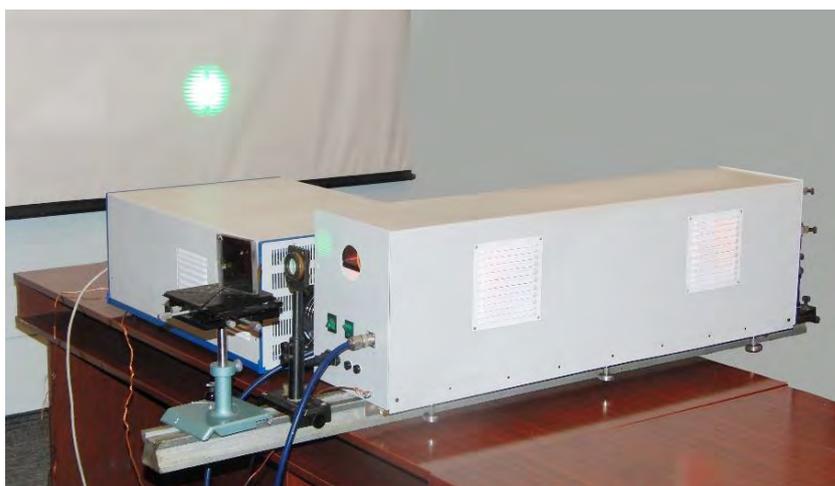
Рисунок 3.2 – Профиль усиления при различной температуре контейнеров с бромидом меди

3.2. Влияние условий работы усилителя яркости на радиальное распределение двухпроходowego усиления активной среды

Наряду с экспериментальными системами визуализации практический интерес представляют приборные варианты лазерных мониторов. В работах [129, 130] представлен макет малогабаритного лазерного монитора на основе активной среды на парах бромида меди, который схематично показан на рисунке 3.3, *а*. Фотография малогабаритного лазерного монитора (без цифровой камеры) приведена на рисунке 3.3, *б*. В качестве активного элемента использована ГРТ № 3 (таблица 2.3).



а

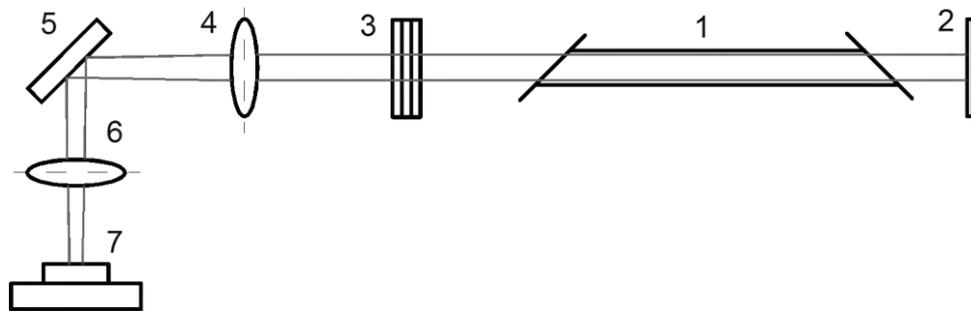


б

1 – цифровая камера, 2 – фильтр, 3 – поворотное зеркало, 4 – усилитель яркости, 5 – объектив,
6 – объект исследования

Рисунок 3.3 – Малогабаритный лазерный монитор [130]

Оптическая схема данного лазерного монитора представляет собой двухпроходовую схему усиления. Аналогичная оптическая схема, в которой вместо объекта и объектива устанавливалось плоское зеркало, применялась в работе [280] для исследования распределения усиления активной среды ГРТ № 3 (рисунок 3.4). В качестве приемника излучения использовалась камера (профилометр) Spiricon SP503U с программным обеспечением BeamGage Standard 5.4. Площадь активной области сенсора камеры $6,5 \times 4,8$ мм, поэтому применялись согласующие оптические элементы для регистрации пучка излучения: SPZ17024 – 4-х кратный объектив, монтируемый на камеру (6), и объектив «Индустар-51» (4).



1 – усилитель яркости, 2 – зеркало, 3 – светофильтры, 4 и 6 – объективы, 5 – светоделительная пластина с 20 % отражением, 7 – цифровая камера (профилометр)

Рисунок 3.4 – Схема регистрации профиля излучения [280]

На рисунке 3.5 приведены профили двухпроходового излучения, соответствующие различной средней мощности излучения, которая задавалась путем изменения температуры контейнеров с бромидом меди. Диапазон температуры внутри нагревателя контейнеров с рабочим веществом составлял от 315 до 410 °С при мощности накачки 600 Вт. Из представленных данных следует, что с увеличением концентрации паров рабочего вещества происходит существенное сужение профиля излучения (практически в два раза по основанию). Если при мощности двухпроходового излучения 0,2 Вт диаметр пучка составлял ~2 см и излучение занимало практически весь канал ГРТ, то при мощности 2,4 Вт диаметр пучка составлял ~1 см. Наиболее плоская вершина профиля излучения в

ГРТ диаметром 2,5 см и длиной 50 см наблюдалась при мощности двухпроходового излучения от 480 до 850 мВт, что существенно меньше максимальной мощности двухпроходового излучения для исследованной ГРТ (2,4 Вт). Этим режимам соответствовала температура нагревателя 330–350 °С в условиях данной работы.

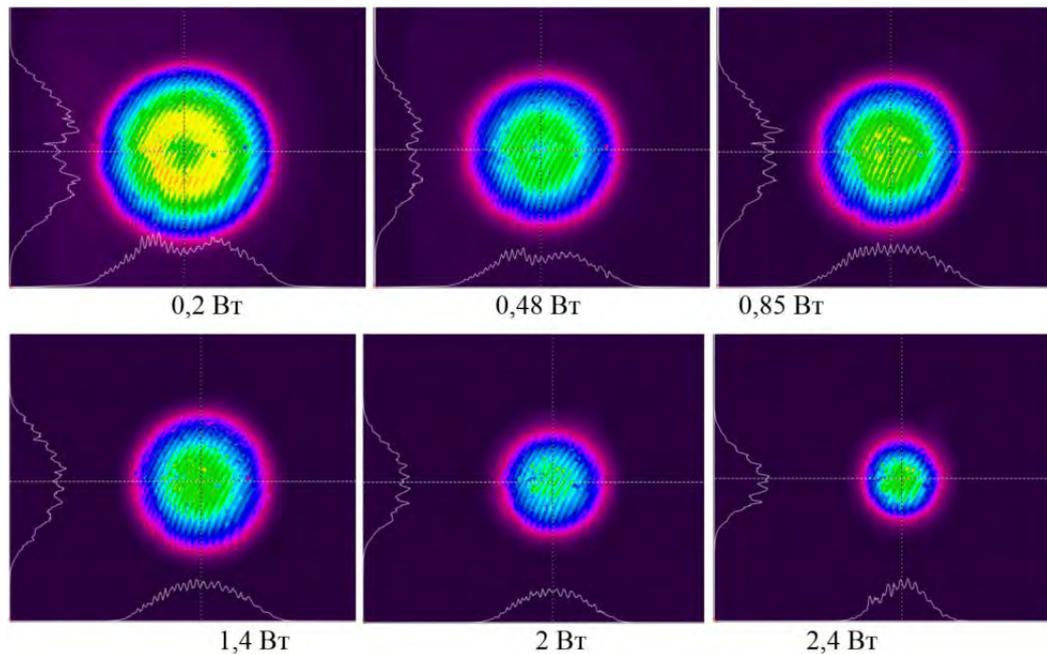


Рисунок 3.5 – Профиль двухпроходового излучения при различной мощности излучения (концентрации паров рабочего вещества: ГРТ № 3 (таблица 2.3))

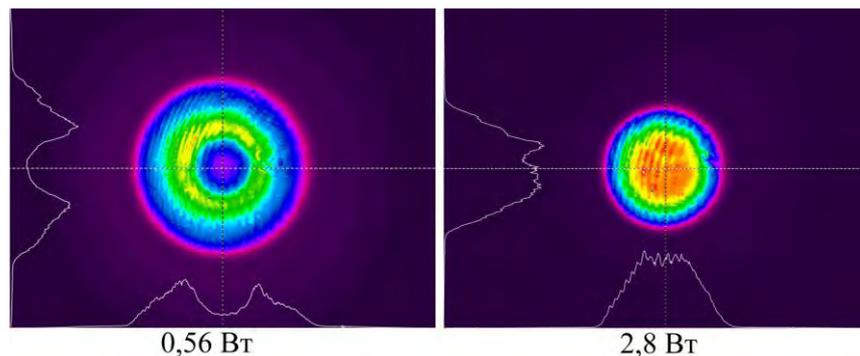


Рисунок 3.6. Профиль двухпроходового излучения при различной мощности излучения (концентрации паров рабочего вещества): ГРТ № 2 (таблица 2.3)

Таким образом, в работе [280] показана возможность модификации характеристик усиления активных элементов на парах бромида меди путем изменения концентрации паров рабочего вещества. Данный способ является

наиболее простым, т.к. может быть реализован путем изменения только одного параметра работы активного элемента. В зависимости от температуры контейнеров с бромидом меди может достигаться как Гауссов, так и кольцеобразный или плоский профиль усиления. Подобный эффект влияния концентрации паров рабочего вещества наблюдался нами в ГРТ диаметром 5 см и длиной 90 см (ГРТ № 2, таблица 2.3) [281], однако, как и в системе «задающий генератор – усилитель мощности» (рисунок 3.2, *a*), без добавки HBr Гауссов профиль не наблюдался. Профили излучения для этого случая представлены на рисунке 3.6.

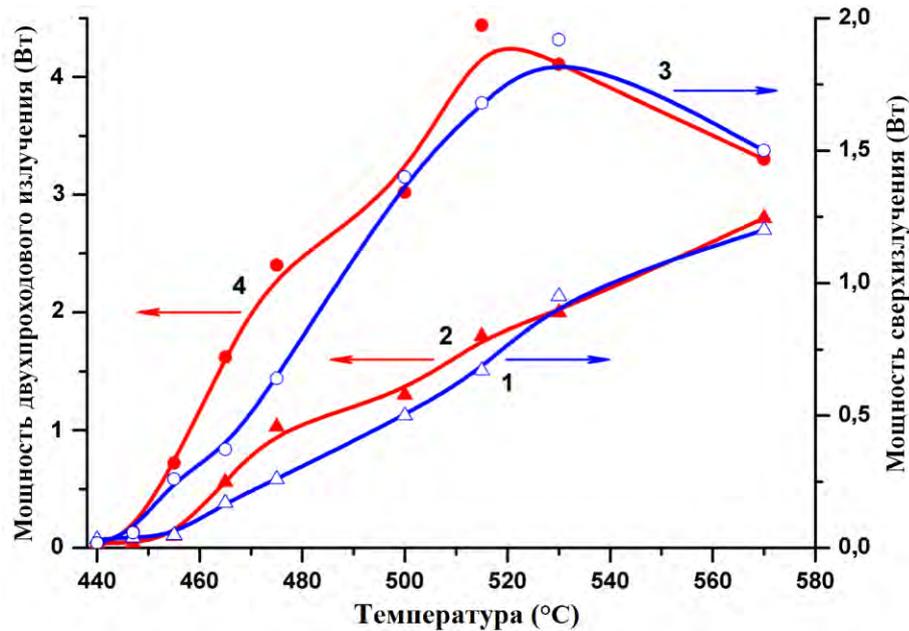
Уширение профиля по полувысоте при введении добавки водорода экспериментально наблюдалось ранее в работе [68] в ГРТ диаметром 2 см. При этом по основанию он не расширялся. Аналогичное [68] влияние добавки водорода отмечалось при моделировании высокотемпературного лазера на парах меди с модифицированной кинетикой (KE-CVL) [334] диаметром 2,5 см. Согласно расчетам [54] добавка галогеноводорода (HCl) должна расширять пучок по основанию и заострять к вершине. В работе [335] экспериментально не наблюдалось сужения профиля излучения. Значительное влияние добавки HBr на профиль двухпроходowego излучения усилителя яркости на парах бромида меди впервые опубликовано в работе [336], где отмечалось выравнивание профиля излучения при малых концентрациях HBr и значительное сужение при концентрации HBr, соответствующих максимальной мощности генерации.

В работе [282] проведено более детальное исследование характеристик усиления активного элемента на парах бромида меди диаметром 5 см и длиной 90 см (ГРТ № 2) с независимым нагревом. Температура нагревателя активной области ГРТ в экспериментах поддерживалась постоянной на уровне 730 °С, температура контейнеров с бромидом меди устанавливалась в диапазоне от 440 до 570 °С. Возбуждение активной среды осуществлялось по схеме импульсного заряда накопительной емкости и дальнейшим ее прямым разрядом на ГРТ (рисунок 2.7, *a*). Частота следования импульсов составляла 20 кГц при величине накопительной емкости 500 пФ. Наибольшая мощность генерации 5 Вт без добавки HBr и

мощности накачки 1350 Вт (потребляемой высоковольтным источником от сети) достигалась при температуре нагревателей контейнеров с бромидом меди 570 °С. Средняя мощность генерации 10 Вт достигалась при температуре генератора HBr 110 °С (~0,2 торр активной примеси) и температуре контейнеров с бромидом меди 530 °С. Для исследования характеристик усиления использовалась схема, аналогичная приведенной на рисунке 3.4.

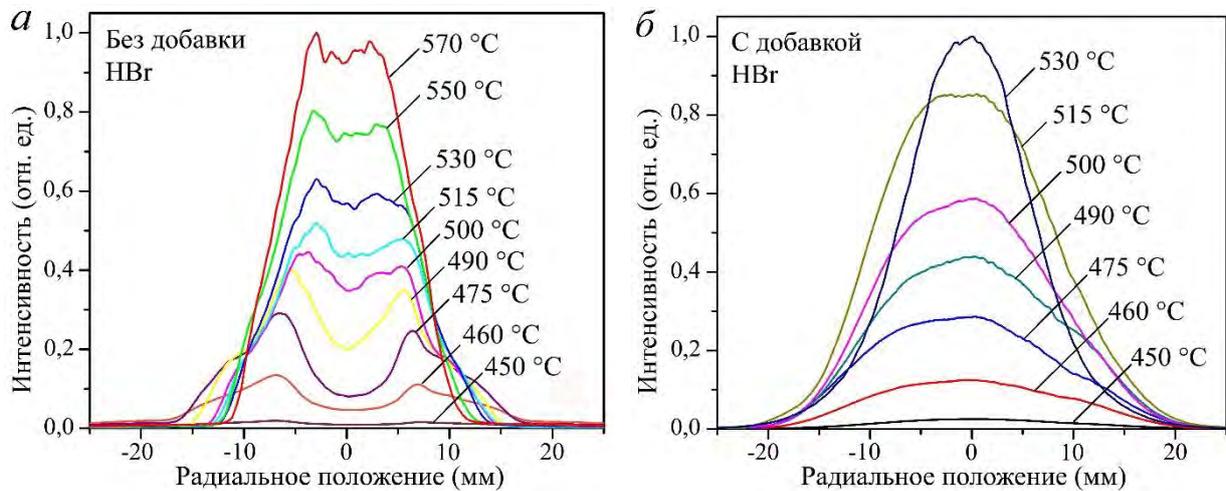
На рисунке 3.7 приведены зависимости средней мощности усиленного спонтанного излучения и двухпроходowego излучения усилителя яркости от температуры контейнеров с бромидом меди. Для положительного влияния добавки HBr на мощность генерации мощность накачки активной среды должна превышать определенное значение, составляющее около 1000 Вт для исследуемой ГРТ. Так как измерения проводились при постоянной мощности накачки, равной 1350 Вт, выше порогового значения, наблюдался положительный эффект от введения примеси, а именно, мощность однопроходowego излучения с примесью HBr превышала мощность однопроходowego излучения без примеси.

Анализ приведенных на рисунке 3.7 зависимостей показывает, что добавка HBr, вводимая в активную среду CuBr-лазеров для повышения частотных и энергетических характеристик, незначительно повышает коэффициент двухпроходowego усиления (отношение мощности двухпроходowego излучения к мощности усиленного спонтанного излучения). Введение примеси HBr, соответствующее температуре генератора HBr 100 °С, является оптимальным при использовании данного активного элемента в схеме лазерного монитора, т.к. обеспечивает наиболее равномерный профиль излучения. Значительное содержание примеси HBr ведет к сужению профиля. Для исследованной ГРТ диаметром 5 см оптимальным является режим со средней мощностью двухпроходowego излучения от 1 до 1,8 Вт без добавки HBr и от 2,5 до 3 Вт с добавкой. Данным значениям соответствуют температуры контейнеров с порошком CuBr 515–530 °С без добавки HBr и 475–500 °С с добавкой HBr.



- 1 – сверхизлучение без добавки HBr; 2 – двухпроходное излучение без добавки HBr;
3 – сверхизлучение с добавкой HBr; 4 – двухпроходное излучение с добавкой HBr

Рисунок 3.7 – Зависимости средней мощности двухпроходного излучения и средней мощности усиленного спонтанного излучения от температуры контейнеров с бромидом меди



a – без добавки; *b* – с добавкой; температура генератора HBr 110 °C, мощность накачки 1350 Вт

Рисунок 3.8 – Профили двухпроходного излучения при различных температурах контейнеров с бромидом меди

На рисунке 3.8 приведены профили однопроходного излучения, соответствующие различным температурам контейнеров с бромидом меди без добавки и с добавкой HBr (температура генератора HBr 110 °C). Из представленных

на рисунке данных следует, что с увеличением концентрации паров бромида меди, приводящей к увеличению средней мощности генерации в области устойчивого разряда, происходит сужение профиля излучения. При этом профиль пучка становится более пологим. Наиболее пологая вершина профиля излучения наблюдается при температуре контейнеров с бромидом меди 515–530 °С.

Важным параметром оптимизации режима работы усилителя яркости является мощность накачки. Экспериментально показано, что с увеличением мощности накачки происходит расширение профиля излучения, как с добавкой, так и без добавки HBr. Для получения наиболее равномерного профиля однопроходового излучения оптимальная мощность накачки для исследуемой ГРТ составляет ~1000 Вт (без HBr) [272]. При большей мощности накачки увеличивается провал в центре пучка. При мощности накачки 920 Вт профиль резко сужается, а при мощности 600 Вт разряд становится нестабильным.

Для работы с легковоспламеняющимися нанопорошками металлов мощность сверхизлучения, освещающая объект исследования в лазерном мониторе на уровне значений, представленных на рисунке 3.7, является несоразмерно высокой, особенно с добавкой HBr, так как приведет к воспламенению объекта исследования или его частичному окислению. Поэтому режим с добавкой HBr при визуализации поверхности нанопорошков металлов является неподходящим. При работе без добавки HBr рассмотренный активный элемент, вероятно, может использоваться для визуализации нанопорошков металлов при уменьшении мощности накачки.

3.3. Радиальное распределение усиления активной среды в импульсе генерации

В активной оптической системе с усилением яркости отраженный от объекта свет возвращается в усиливающую среду с некоторой задержкой по отношению к сверхизлучению, которая зависит от расстояния до объекта наблюдения. Очевидно, что в реальных системах расстояние может быть разным в зависимости от решаемой задачи. С целью минимизации искажений, вносимых усилителем

яркости, желательно обеспечить равномерное распределение усиления в течение всего времени существования инверсии или понимать границы, в которых неравномерность усиления активной среды не является существенной для получения качественного изображения.

Типичная длительность импульса генерации лазеров на парах бромида меди составляет 20–60 нс с пиком генерации на уровне 5–20 нс. Таким образом, при расстоянии от усилителя яркости до объекта порядка 0,5 м и длине усилителя 1 м излучение пройдет до объекта, отразится, вернется обратно в усилитель и усилится за время порядка 6 нс. То есть усиление яркости изображения произойдет в максимуме усиления активного элемента. Такой режим, как правило, и имеет место на практике при использовании традиционных схем лазерных проекционных микроскопов и лазерных мониторов на основе активных сред на парах металлов [52, 59, 130–134]. Можно полагать, что при таком режиме усиления достигается наиболее равномерный профиль, в частности, если подобраны оптимальные режимы работы по составу газовой смеси и мощности накачки.

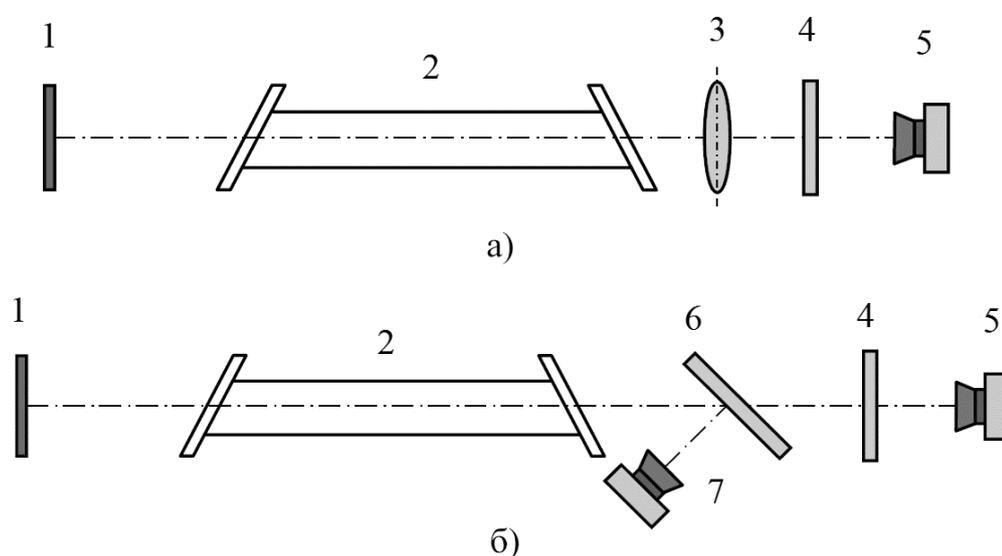
В статье [337] для лазера на парах меди отмечается, что при работе без резонатора основное усиление происходит в первые 10 нс импульса излучения, и именно излучение, формируемое в это время, является основным в пучке. Кроме того, это усиление – осевое усиление. В последующее время (в течение импульса генерации) максимум усиления смещается в пристеночную область. Принимая во внимание схожесть механизмов генерации лазеров на парах меди и бромида меди, подобное поведение можно ожидать и в лазерах (и усилителях яркости) на парах бромида меди. Об этом свидетельствуют результаты, полученные в работах [94, 338] в системе «задающий генератор – усилитель мощности», в которых отмечается, что при оптимальной задержке, соответствующей наибольшей мощности генерации, и больших задержках профиль не имеет столь выраженной кольцевой формы, как при малой задержке. Очевидно, что при значительном отдалении объекта наблюдения возвратившийся сигнал попадет в среду с меньшим усилением. Можно предположить, что усиление на «хвосте» импульса генерации будет иметь

радиальное распределение, отличное от радиального распределения усиления в первые 10–20 нс, как в случае типовых условий использования лазерных мониторов.

В работе [283] исследовалось радиальное распределение излучения в усилителях яркости на парах бромида меди с малым (ГРТ № 4) и средним активным объемом – ГРТ № 2 (таблица 2.3) при различной задержке возвратившегося сигнала. В ГРТ № 2 (диаметром 5 см) введение активной примеси HBr в активную среду осуществлялось посредством генератора HBr. Температура генератора HBr составляла 100 °С. Как и в работе [282], возбуждение активной среды осуществлялось по схеме импульсного заряда накопительной емкости с тиратроном ТГИ1-1000/25 в качестве коммутатора. Частота следования импульсов накачки составляла 20 кГц при величине накопительной емкости 500 пФ. Для положительного влияния добавки примеси HBr на мощность генерации мощность накачки превышала пороговое значение и составляла 1220 Вт. Температура нагревателя активной области ГРТ в экспериментах поддерживалась постоянной на уровне 730 °С. Температуры контейнеров с бромидом меди составляли 515–530 °С без добавки HBr и 475–500 °С с добавкой HBr. Средняя мощность усиленного спонтанного излучения (сверхизлучения) составляла 1,1 Вт без добавки HBr ($T_{\text{CuBr}} = 530 \text{ °С}$) и 2,0 Вт с добавкой HBr ($T_{\text{CuBr}} = 500 \text{ °С}$).

В ГРТ № 4 нагрев активной области и контейнеров с бромидом меди осуществлялся одним нагревателем, разность температур, необходимая для диффузии паров бромида меди в активную область, достигалась за счет теплоизоляции. Источник питания обеспечивал среднюю мощность накачки 600 Вт, что не позволяло работать в режиме с добавкой HBr. Средняя мощность сверхизлучения составляла 0,23 Вт. Регистрация профиля излучения проводилась в типовой моностатической схеме лазерного монитора (рисунок 3.9). Применение в качестве объекта визуализации плоского зеркала с коэффициентом отражения 80 % моделировало объект с равномерным по всей области визуализации коэффициентом отражения. С использованием камеры Fastec HiSpec 1 регистрировался весь профиль излучения (рисунок 3.9, а), который затем

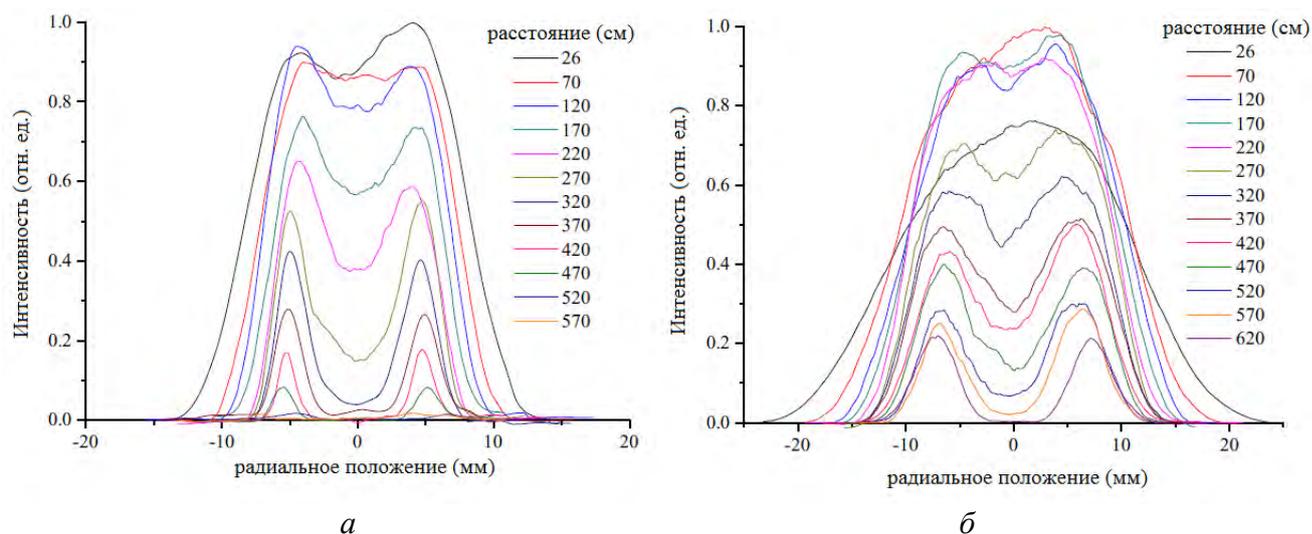
обрабатывался с использованием программы ImageJ. При регистрации профиля излучения с помощью CMOS камеры минимальная экспозиция камеры составляет 2 мкс, что значительно превышает длительность импульса генерации, соответственно камера фиксирует интегральную интенсивность излучения. С целью исследования формы импульса генерации в центре и на периферии пучка одновременно проводилась регистрация излучения двумя быстродействующими фотодиодами Thorlabs DET10A/M (рисунок 3.9, б). Для отделения желтой (578,2 нм) или зеленой (510,6 нм) линий генерации применялись полосовые фильтры с шириной полосы пропускания по полувысоте 10 нм.



1 – зеркало, 2 – усилитель яркости, 3 – линза, 4 – нейтральный светофильтр, 5 – камера (фотодиод), 6 – светоделительная пластина, 7 – фотодиод

Рисунок 3.9 – Схемы для исследования профиля пучка излучения (а) и интегрального усиления во времени (б)

На рисунке 3.10 приведены профили двухпроходowego излучения с добавкой и без добавки HBr для ГРТ № 2. Профиль излучения без существенного провала интенсивности в центре наблюдается при расстоянии от зеркала до усилителя яркости до 1 м без добавки HBr, и до 2 м с добавкой HBr. Это соответствует времени распространения излучения от выходной апертуры ГРТ до зеркала и обратно в диапазоне от 7 до 12 нс без добавки HBr и до 18 нс с добавкой.



a – без HBr, $T_{\text{CuBr}} = 530 \text{ }^\circ\text{C}$; *б* – с HBr ($T_{\text{HBr}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$), $T_{\text{CuBr}} = 515 \text{ }^\circ\text{C}$

Рисунок 3.10 – Профили выходного излучения усилителя яркости на разном расстоянии зеркала от усилителя

На рисунках 3.11 и 3.12 приведены осциллограммы излучения в центре и на окружности пучка, соответствующие тем же расстояниям, что на рисунке 3.10. На осциллограммах виден момент времени, когда отраженный от зеркала сигнал снимает инверсию населенностей. При увеличении расстояния до зеркала сначала наблюдается рост интенсивности в центре пучка и на периферии, затем спад (с добавкой HBr). Спад сопровождается появлением провала интенсивности излучения в центре пучка. Без HBr спад наблюдается сразу. При относительно малых расстояниях провал обусловлен уменьшением длительности генерации в центре при примерно одинаковой амплитуде (рисунок 3.11, до 220 см без добавки; рисунок 3.12, до 420 см с добавкой HBr). При больших расстояниях резко уменьшается амплитуда генерации. Таким образом, инверсия в центре пучка исчезает раньше, чем на периферии. В максимуме импульса излучения профиль радиального распределения является более равномерным, а на переднем фронте импульса генерации – близкий к Гауссову. Этот случай обычно имеет место на практике при использовании активных оптических систем с усилением яркости.

При удалении объекта наблюдения (зеркала в нашем случае) излучение возвращается в усиливающую среду позже максимума усиления. Из данных,

представленных на рисунках 3.10–3.12, следует, что к концу импульса излучения профиль принимает кольцевую форму и сужается практически в два раза, как без добавки, так и с добавкой НВг. Положительное влияние добавки заключается в следующем: больше интенсивность сама по себе; меньше ширина провала в центре; меньше относительная глубина провала (интенсивность на краю/интенсивность в центре); генерация пропадает при большем расстоянии до объекта наблюдения (зеркала). Последнее связано, в первую очередь, с тем, что с введением добавки практически в два раза увеличивается длительность импульса генерации (время существования инверсии), в частности, за счет снижения скорости возбуждения лазерных уровней в начале импульса возбуждения и увеличения времени релаксации резонансных уровней [339].

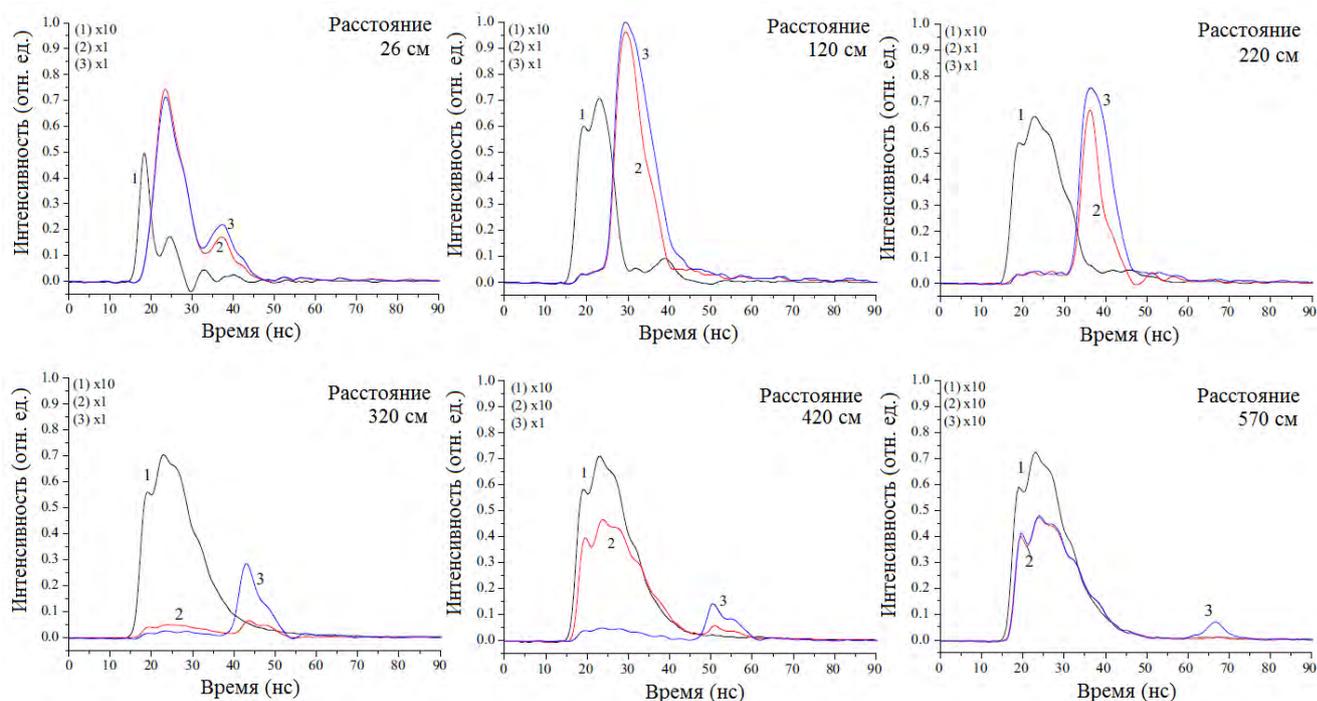


Рисунок 3.11 – Осциллограммы импульсов сверхизлучения (1) и отраженного излучения в центре (2) и на периферии (3) пучка при различном расстоянии между зеркалом и усилителем яркости без НВг; $T_{\text{CuBr}} = 530 \text{ } ^\circ\text{C}$

На рисунке 3.13 представлены профили излучения при двухпроходном излучении для ГРТ № 4. Как и для ГРТ № 2, профиль излучения без существенного провала интенсивности в центре наблюдается при расстоянии от зеркала до

усилителя яркости примерно до 1 м. Затем при увеличении расстояния профиль сужается и приобретает ярко выраженную кольцевую форму. Интенсивность на оси падает практически до нуля.

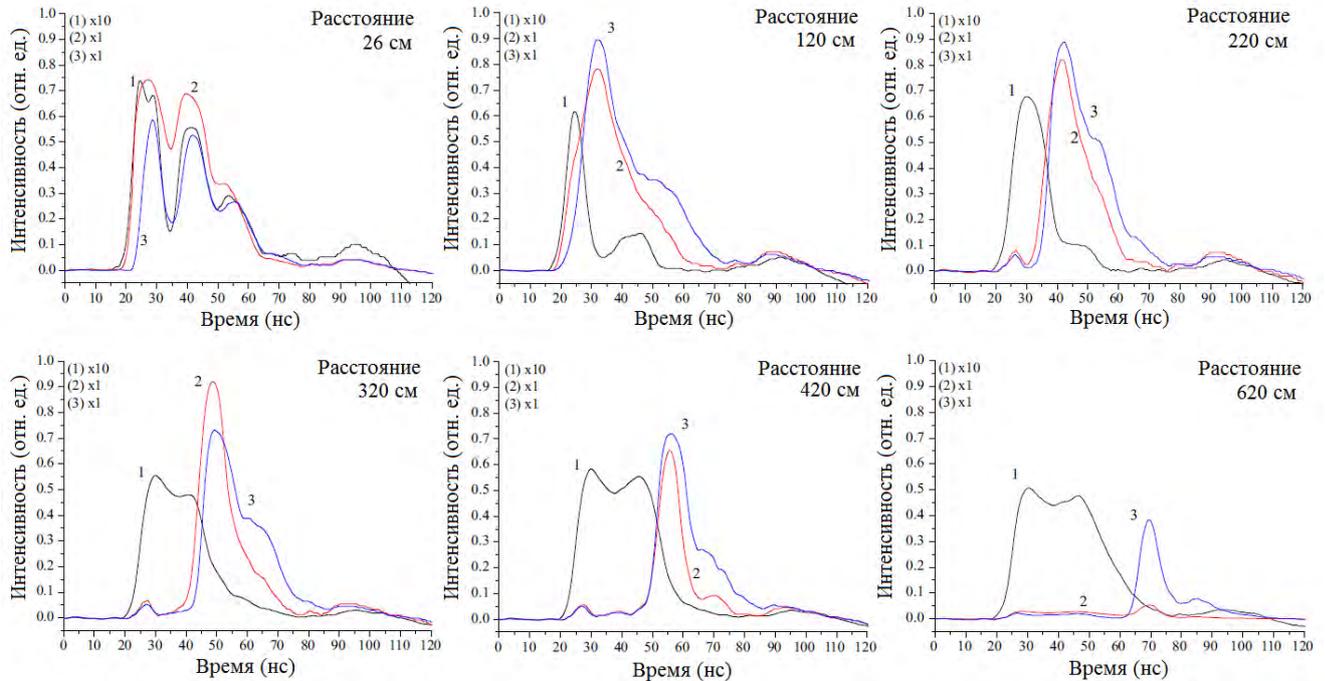


Рисунок 3.12 – Осциллограммы импульсов сверхизлучения (1) и отраженного излучения в центре (2) и на периферии (3) пучка при расстоянии между зеркалом и усилителем яркости с добавкой HBr; $T_{\text{HBr}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{CuBr}} = 515 \text{ }^\circ\text{C}$

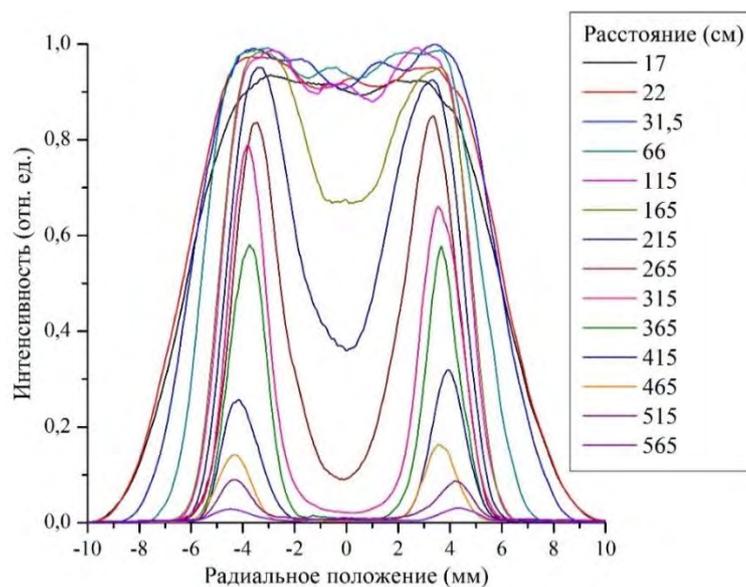


Рисунок 3.13 – Профили выходного излучения усилителя яркости на разном расстоянии зеркала от усилителя; ГРТ № 4; мощность накачки 600 Вт

Проведенное исследование пространственно-временного распределения усиления показало, что оптимальным расстоянием, на котором следует располагать объект наблюдения, является расстояние 120–220 см при модификации активной среды добавкой HBr. Без добавки HBr расстояние значительно меньше и составляет 26–70 см.

3.4. Радиальное распределение усиления активной среды в реальных схемах лазерных мониторов

В ряде задач неразрушающего контроля и диагностики требуется, чтобы система визуализации располагалась на значительном расстоянии от объекта исследования. В работе [284] мы показали возможность использования схемы на основе вогнутого зеркала для увеличения расстояния до объекта наблюдения. Подобные схемы лазерного монитора с увеличенным расстоянием до объекта наблюдения необходимы для дистанционного исследования горящих порошковых материалов, особенно в случае, когда горение сопровождается разлетом продуктов сгорания, когда требуется значительная (диаметром несколько миллиметров) область наблюдения и не требуется высокое оптическое увеличение. Схема с длиннофокусной линзой ($F=25$ см), использованная в работе [139] для удаленного исследования технологических процессов, также возвращает отраженный от объекта свет с задержкой по отношению к усиленному спонтанному излучению.

В схеме с вогнутым зеркалом, использованной нами в работе [288], расстояние от зеркала до объекта наблюдения составляло 50 см при расстоянии от усилителя яркости до объекта 1 м. Согласно данным, представленным на рисунке 3.10, *a* и рисунке 3.13, при таком расстоянии до объекта излучение возвращается в усиливающую среду, которая уже имеет незначительный спад усиления в центре. Предположительно, при дальнейшем увеличении расстояния до объекта наблюдения будет проявляться влияние неоднородности усиления. Однако до настоящего времени не представлялось возможным утверждать, насколько значительным является это влияние в реальной схеме лазерного монитора. Не

представлялось возможным также утверждать, насколько провал усиления в центре пучка в случае снижения концентрации паров рабочего вещества, которое имеет место при длительной эксплуатации газоразрядных трубок, влияет на распределение интенсивности выходного излучения усилителя яркости в реальных схемах лазерных мониторов. Профили излучения, представленные на рисунках 3.10, 3.13, получены при усилении излучения, отраженного от плоского зеркала, когда лучи, несущие информацию, распространяются практически параллельно. В реальной схеме лазерного монитора присутствуют формирующие изображение оптические элементы, такие как вогнутое зеркало, линза или объектив, которые формируют скрещивающиеся лучи, распространяющиеся через усиливающую среду непараллельно. Далее представлены результаты исследования влияния неоднородности усиления активной среды, вызванной снижением концентрации паров рабочего вещества и увеличением расстояния от усилителя яркости до объекта наблюдения в реальной схеме лазерного монитора и сравнение радиального распределения выходного излучения усилителя яркости в реальной схеме с радиальным распределением двухпроходowego параллельного пучка [296].

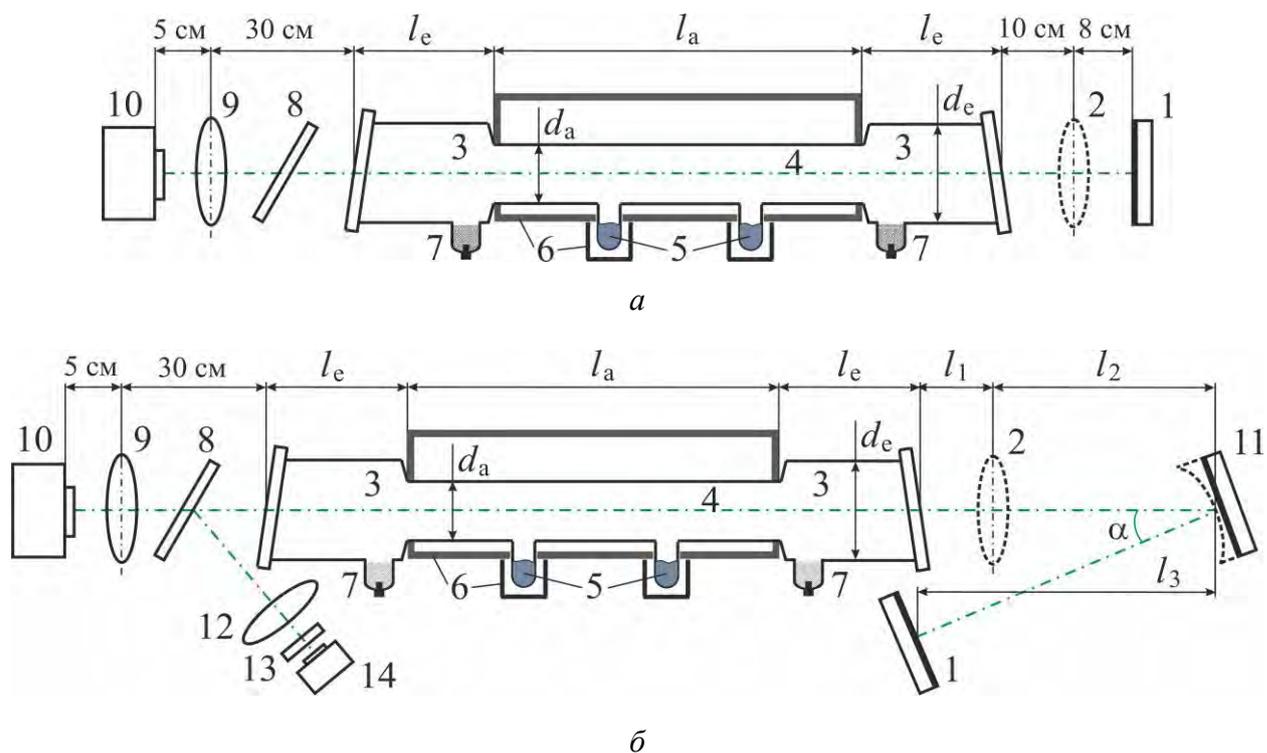
Исследовались два усилителя яркости небольшого активного объема – ГРТ №№ 5, 6 (таблица 2.3). Максимальная средняя мощность сверхизлучения, зарегистрированная фотоприемником Ophir Orion-PD300, установленным на месте объекта в традиционном лазерном мониторе (рисунок 3.14) с линзой $F=80$ мм, составила 14 мВт для ГРТ № 5 и 22 мВт для ГРТ № 6. Температура стенки ГРТ поддерживалась на постоянном уровне – 660 °С. Температура емкостей с бромидом меди задавалась в диапазоне 455–510 °С для ГРТ № 5 и в диапазоне 475–560 °С для ГРТ № 6. Накачка усилителей яркости осуществлялась тиратронным генератором на основе ТГИ1-500/16, выполненным по схеме прямого разряда накопительного конденсатора с накопительной емкостью 750 пФ. Частота следования импульсов составляла 20 кГц. Мощность, потребляемая схемой накачки от высоковольтного источника постоянного тока, составляла 600 Вт.

Эксперименты проводились в двух конфигурациях оптической схемы,

параметры которых представлены на рисунке 3.14 и в таблице 3.1. Первая конфигурация представляла собой традиционную схему короткофокусного лазерного монитора (рисунок 3.14, а). Профиль выходного излучения усилителя яркости в этой схеме формировался с использованием объектива с фокусным расстоянием 8 см (показано пунктирным эллипсом), расположенным на расстоянии 10 см от ГРТ, и плоским зеркалом с коэффициентом отражения 80 % в качестве объекта наблюдения. Использование плоского зеркала имитировало объект с равномерным коэффициентом отражения по всей области изображения. Во время исследования профиля параллельного пучка в данной конфигурации объектив, обозначенный пунктиром, удалялся из схемы. В ряде экспериментов в качестве объекта наблюдения использовался тест-объект в виде медной сетки с шагом 0,3 мм. Профиль излучения усилителя яркости изменялся путем изменения температуры контейнеров с бромидом меди, т.е. концентрации паров рабочего вещества.

Таблица 3.1 – Газоразрядные трубки и параметры оптической схемы

Диаметр активной области d_a	Длина активной области l_a	Длина концевых областей l_e	Диаметр концевых областей d_e	Расстояние			
				ГРТ–объект	ГРТ–линза l_1	линза–зеркало l_2	линза–объект l_3
см							
1,5 ГРТ № 5	50	20	4,0	100	10	40	50
				155	90	15	50
				200	140	25	35
				300	245	28	27
				400	345	35	20
3,0 ГРТ № 6	60	30	6,0	80	10	35	35
				130	70	15	45
				195	140	25	30
				300	240	35	25
				400	345	35	20



a – схема традиционного лазерного монитора; *б* – схема зеркального лазерного монитора;

1 – плоское зеркало, 2 – линза, 3 – концевые части ГРТ, 4 – активная область ГРТ, 5 – контейнеры с бромидом меди, 6 – нагреватели, 7 – электроды, 8 – нейтральный светофильтр, 9 – объектив, 10 – камера, 11 – плоское (сплошные линии) или вогнутое (пунктирные линии) зеркало, 12 – линза, 13 – диффузор, 14 – фотодиод

Рисунок 3.14 – Схемы регистрации профиля излучения

Во второй конфигурации регистрация профиля излучения проводилась в зеркальной схеме лазерного монитора (рисунок 3.14, б). Температура T_{CuBr} поддерживалась постоянной на уровне 510 °С для ГРТ № 5 и 540 °С для ГРТ № 6. Объект исследования с равномерным отражением моделировался плоским зеркалом. Зеркальная схема собиралась путем установки вогнутого зеркала $R=3$ м (показано пунктиром) и линзы $F=1$ м (показана пунктиром). Во время исследования профиля параллельного пучка линза, обозначенная пунктиром, убиралась; вогнутое зеркало, обозначенное пунктиром, заменялось на плоское зеркало. С использованием указанных оптических элементов в зеркальной схеме формировалось четкое изображение тест-объекта (медной сетки) при разном расстоянии между усилителем яркости в трех случаях расположения элементов

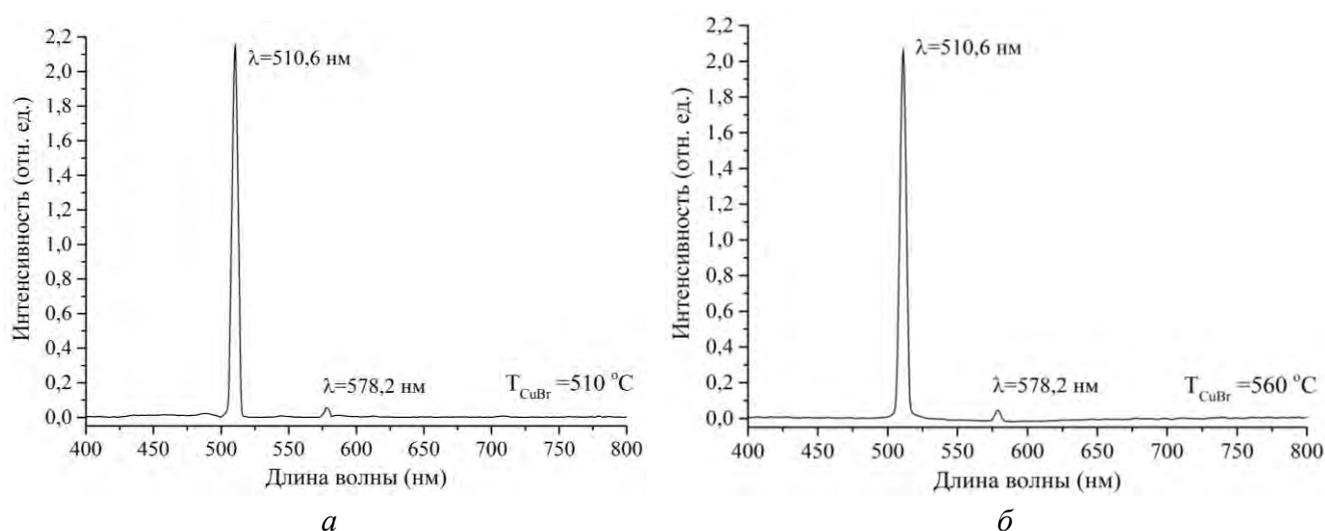
(таблица 3.1). Радиальное распределение интенсивности выходного пучка усилителя яркости в зеркальной схеме лазерного монитора и в параллельном пучке регистрировалось для пяти расстояний между усилителем яркости и объектом наблюдения: 100, 155, 200, 300 и 400 см для ГРТ № 5, и 80, 130, 195, 300 и 400 см для ГРТ № 6.

С помощью камеры Phantom Miro C110 записывался профиль излучения. Интенсивность излучения ослаблялась нейтральными светофильтрами, которые выбирались таким образом, чтобы предотвратить насыщение сенсора камеры. Нейтральный светофильтр 8 служил делителем света для регистрации излучения усилителя яркости фотодиодом. Таким образом, одновременно регистрировался импульс излучения усилителя яркости, ток и напряжение ГРТ с помощью фотодиода Thorlabs DET10A/M, Pearson Current Monitor 8450, пробника напряжения Tektronics P6015A и 4-канального осциллографа Tektronix TDS-3054C.

Температура внешней стенки обеих ГРТ поддерживалась на уровне 658 °С, что при мощности накачки 600 Вт обеспечивало режим генерации, когда интенсивность излучения с длиной волны 578,2 нм была намного ниже, чем интенсивность излучения с длиной волны 510,6 нм, и практически полностью подавлялась нейтральным светофильтром. Такой прием использовался для упрощения оптической схемы и уменьшения искажений, т.к. наличие интерференционного фильтра в ряде случаев приводило к появлению интерференционных колец на изображении лазерного монитора. На рисунке 3.15 представлены спектры излучения усилителей яркости, зарегистрированные спектрометром Avantes AvaSpec-ULS2048-USB2. Световод спектрометра устанавливался на месте скоростной камеры.

На рисунке 3.16 представлены изображения пучков излучения усилителя яркости, полученные при различной температуре контейнеров с рабочим веществом для случаев параллельного пучка и пучка, несущего изображение в схеме лазерного монитора на рисунке 3.14, *a* с зеркалом в качестве объекта наблюдения. Поскольку яркость изображений существенно отличается в

зависимости от концентрации паров бромида меди, рисунки нормированы по яркости. Пунктиром показаны линии, вдоль которых осуществлялась оцифровка профиля в программе ImageJ. На рисунке 3.17 приведены полученные радиальные распределения интенсивности излучения при различной температуре контейнеров с рабочим веществом. Сплошными линиями показаны профили усиленного параллельного пучка, когда отсутствует линза 2 на рисунке 3.14, а. Пунктирными линиями показан профиль пучка, несущего изображение в реальной схеме лазерного монитора, когда установлена линза 2.

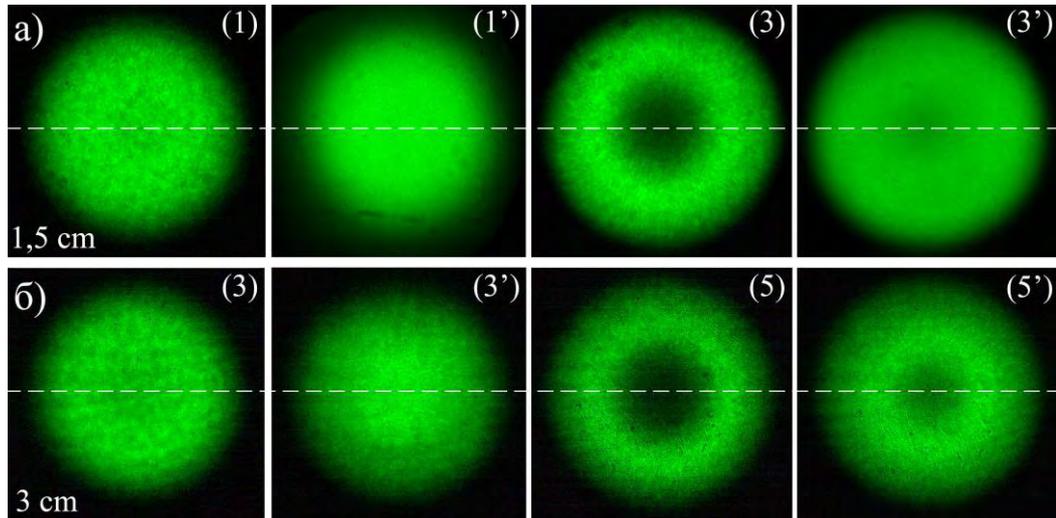


а – ГРТ № 5; б – ГРТ № 6

Рисунок 3.15 – Спектры излучения усилителей яркости

Как следует из представленных на рисунке 3.16 и 3.17 данных, в обеих ГРТ имеет место появление провала интенсивности в центре параллельного пучка и формирование кольцевого пучка при уменьшении температуры контейнеров с рабочим веществом. В отличие от двухпроходowego усиления параллельного пучка, при работе усилителя яркости в условиях реальной схемы лазерного монитора, интенсивность в центре пучка при тех же температурных параметрах существенно выше. Неоднородность усиления в центре газоразрядной трубки до 50–75 % выравнивается в усиленном пучке, несущем изображение. Таким образом, недостаток рабочего вещества в результате снижения температуры контейнеров, приводящий к значительному уменьшению интенсивности в центре параллельного

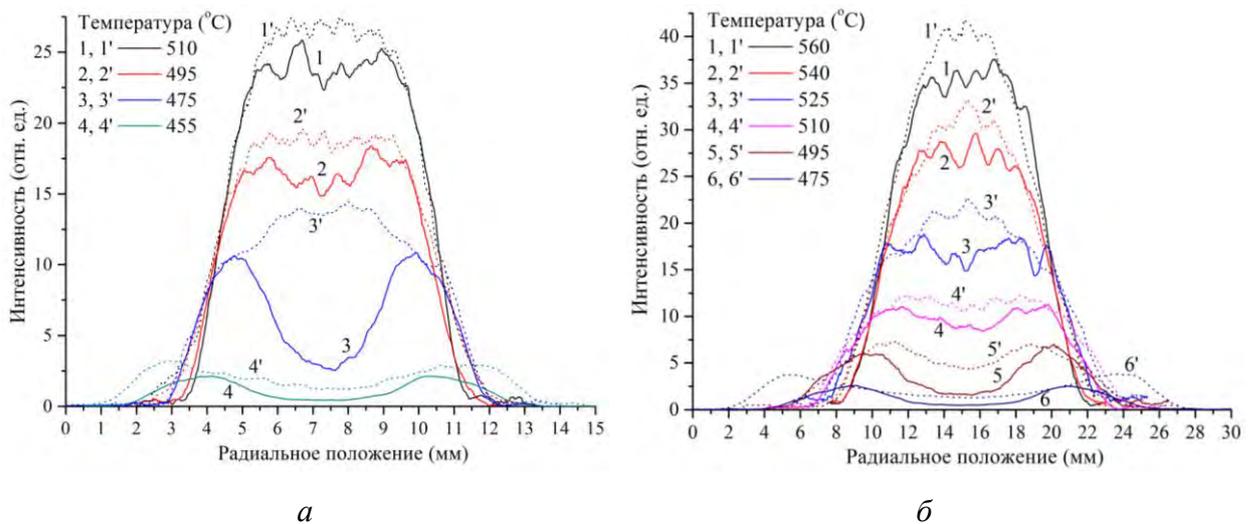
пучка, в реальной схеме лазерного монитора оказывает существенно меньшее влияние. В частности, провал интенсивности пучка в центре в реальной схеме (профиль 3') выравнивается до 5 раз по сравнению с параллельным пучком (профиль 3).



a – ГРТ № 5: 1, 1' – $T_{\text{CuBr}} = 510$ °C; 3, 3' – $T_{\text{CuBr}} = 475$ °C; *б* – ГРТ № 6: 3, 3' – $T_{\text{CuBr}} = 525$ °C; 5, 5' – $T_{\text{CuBr}} = 495$ °C; 1, 3, 5 – параллельный луч; 1', 3', 5' – лазерный монитор (рисунок 3.14, *a*).

Номера рисунков соответствуют номерам кривых на рисунке 3.17 для соответствующих ГРТ

Рисунок 3.16 – Профили излучения усилителя яркости



a – ГРТ № 5; *б* – ГРТ № 6; сплошные линии 1–6 – параллельный пучок; пунктирные линии 1'–6' – пучок излучения лазерного монитора

Рисунок 3.17 – Профили излучения усилителя яркости

На рисунке 3.18, *a* приведены изображения тест-объекта при различных температурах контейнеров с бромидом меди. Яркость изображений с уменьшением T_{CuBr} падает. При $T_{\text{CuBr}} = 455$ °С изображение практически не усиливается, в таком режиме усилитель яркости непригоден к эксплуатации. В остальных режимах изображение получается достаточно контрастным для визуализации и для количественного анализа, как это показано на рисунке (*б*).

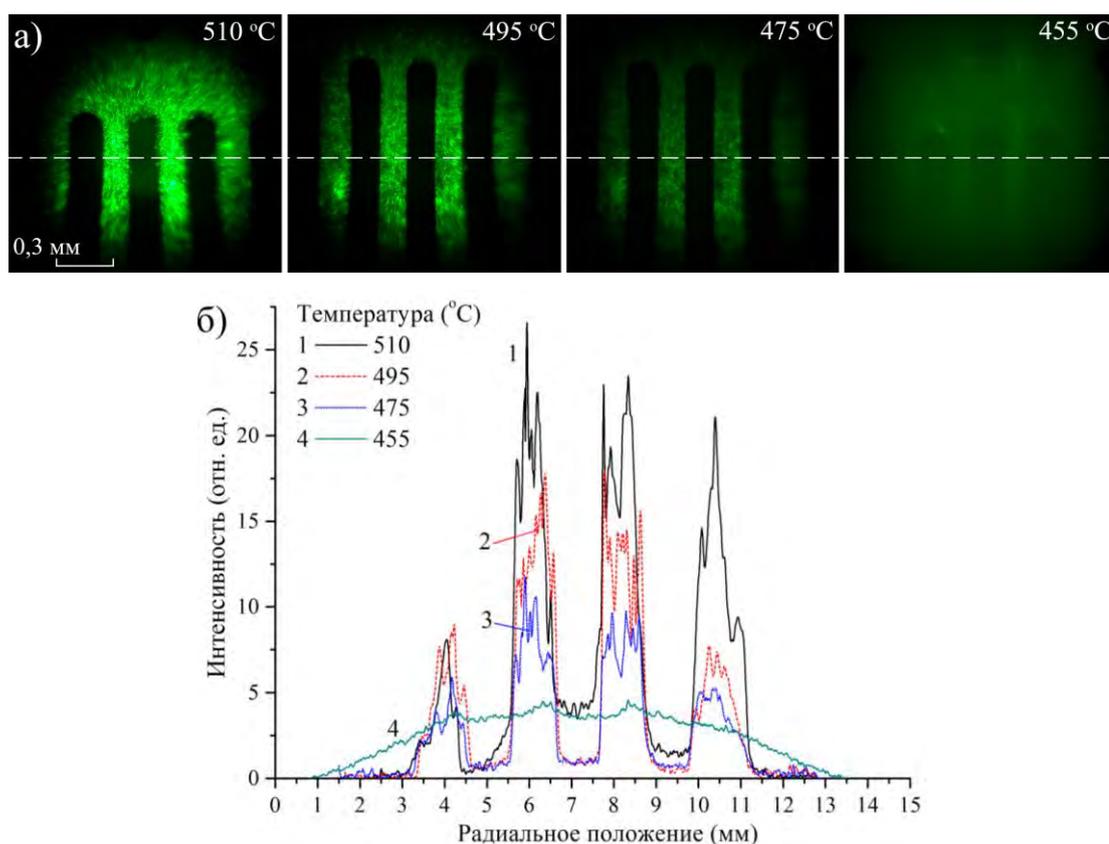


Рисунок 3.18 – Изображения тестового объекта (*a*) и соответствующие профили интенсивности (*б*) при различных температурах контейнеров с бромидом меди для ГРТ № 5

В реальной схеме лазерного монитора достигается эффект, что профиль изображения выравнивается или приобретает форму, близкую к Гауссовой, даже при значительном провале усиления в центре ГРТ. На наш взгляд, это обусловлено тем, что формирующие элементы, такие как линзы и зеркала, в оптической схеме лазерного монитора формируют скрещивающиеся лучи, которые проходят как через области ГРТ с большим усилением, так и через области с меньшим усилением. При снижении концентрации паров рабочего вещества появляется провал усиления

в центре ГРТ и формируется кольцевое излучение, что отчетливо наблюдается при усилении параллельного пучка. При усилении скрещивающегося пучка лучи проходят как через кольцевую, так и через центральную область, приводя к увеличению интенсивности выходного излучения в центре.

На рисунках 3.11, 3.12 продемонстрировано смещение импульса усиленного излучения по отношению к сверхизлучению усилителя яркости при удалении зеркала от ГРТ. В ГРТ внутренним диаметром 5 см и длиной 90 см и внутренним диаметром 2,5 см и длиной 40 см провал интенсивности в центре пучка наблюдался уже при удалении на 115–120 см. Значительный спад интенсивности усиленного излучения в ГРТ внутренним диаметром 5 см без добавки НВг начинался при удалении на расстояние более 220 см. На рисунке 3.19 приведены осциллограммы импульсов для ГРТ № 6 при удалении зеркала *I* в схеме на рисунке 3.14, б. При расстоянии 200 см и более устанавливалось плоское зеркало *II* на расстоянии 150 см от ГРТ. Как следует из представленных на рисунке 3.19 осциллограмм, импульсы напряжения и тока остаются с высокой точностью постоянными, что свидетельствует о стабильной работе источника высоковольтных импульсов. При удалении зеркала от ГРТ отчетливо наблюдается смещения импульса генерации вправо. До расстояния 150 см происходит некоторое расширение импульса генерации, затем сужение. Из представленных данных можно сделать вывод, что без существенного уменьшения интенсивности использование лазерного монитора возможно до 2,5 м. При дальнейшем увеличении расстояния снижается как мощность генерации (т.е. усиление), так и длительность импульса.

На рисунке 3.20 приведены изображения тест-объекта, полученные с использованием зеркальной схемы лазерного монитора для параметров оптической схемы, представленных в таблице 3.1. Задачей исследования являлось выяснение характера изменения профиля излучения усилителя яркости при удалении объекта наблюдения в реальной схеме лазерного монитора. Согласно рисунку, изображения четкие на расстоянии до 200 см. На расстоянии 300 см объект все еще можно визуализировать, но изображение становится менее резким, а также появляется

значительное фоновое излучение. На расстоянии 400 см изображение тест-объекта практически неразлично.

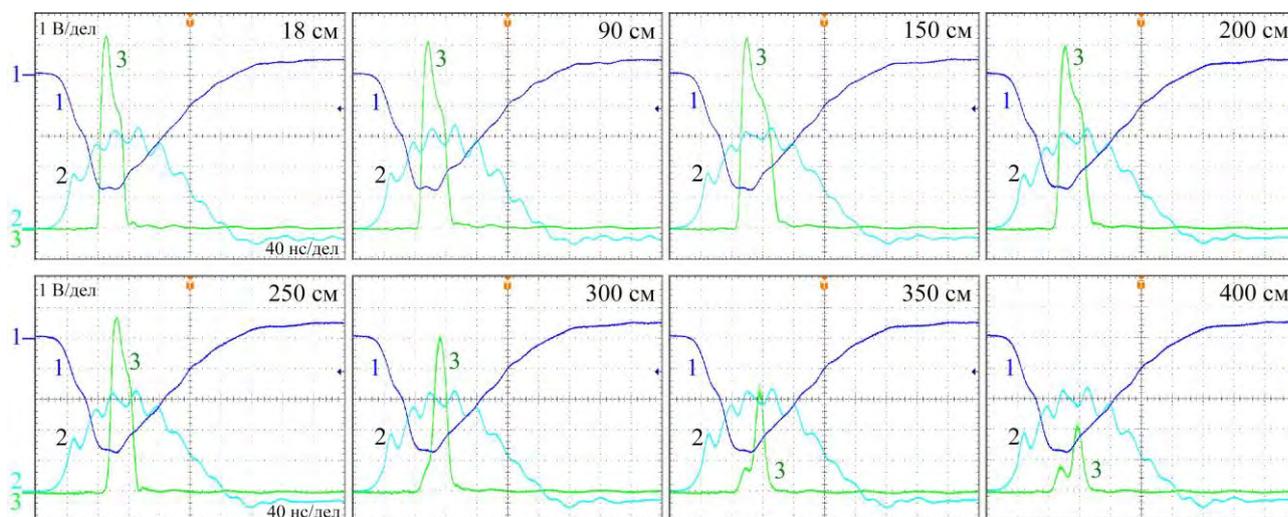
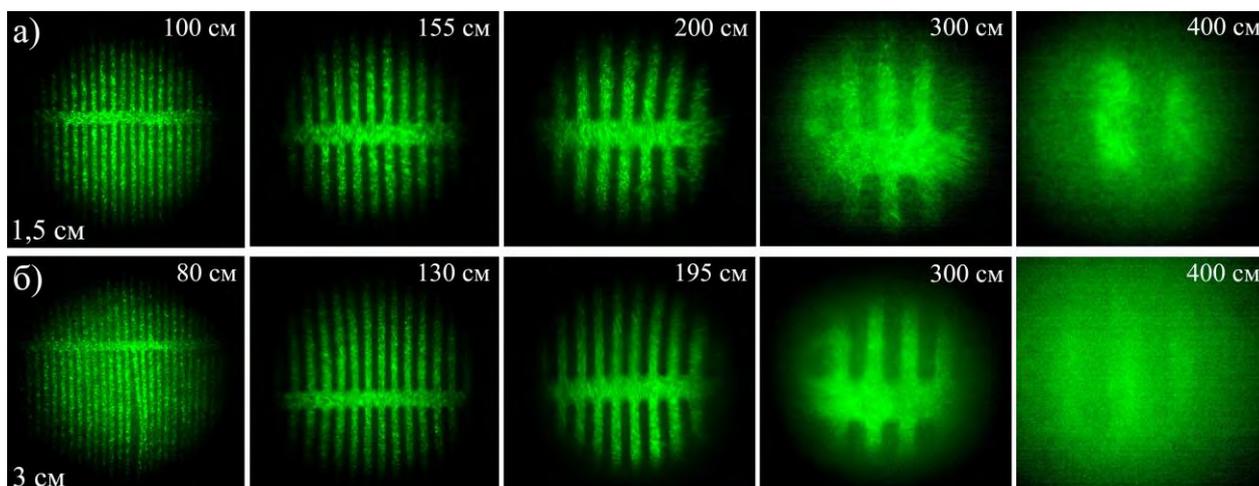


Рисунок 3.19 – Осциллограммы выходных импульсов усилителя яркости в зависимости от расстояния между зеркалом и ГРТ; $T_{\text{CuBr}} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$; мощность накачки 600 Вт

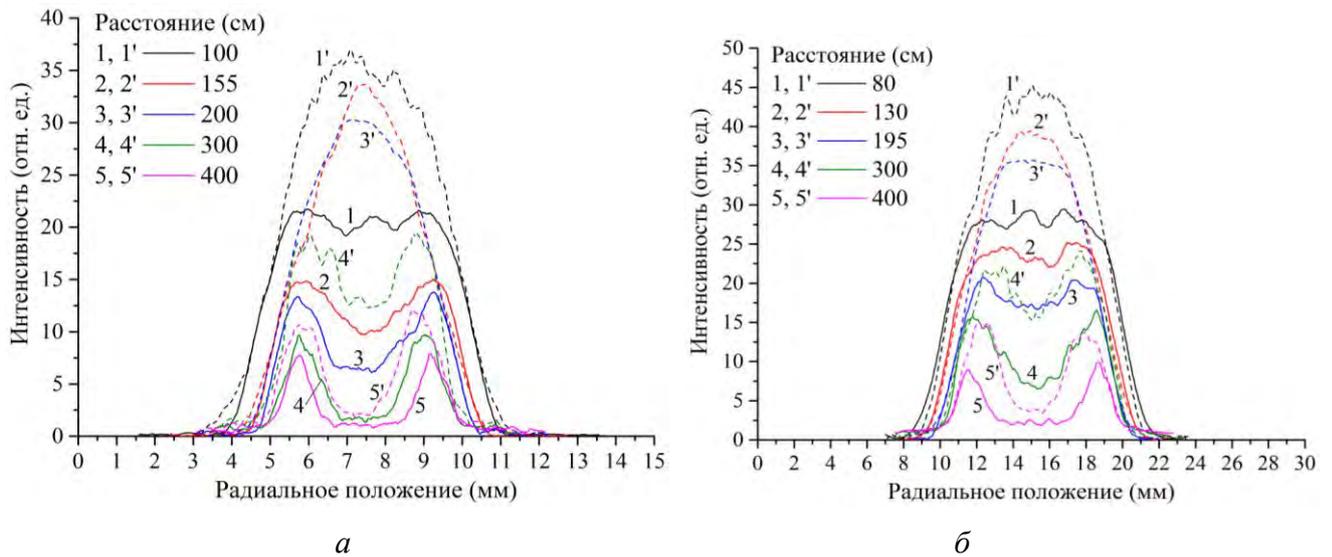


а – ГРТ № 5; б – ГРТ № 6

Рисунок 3.20 – Изображения тестового объекта на разном расстоянии между объектом и усилителем яркости

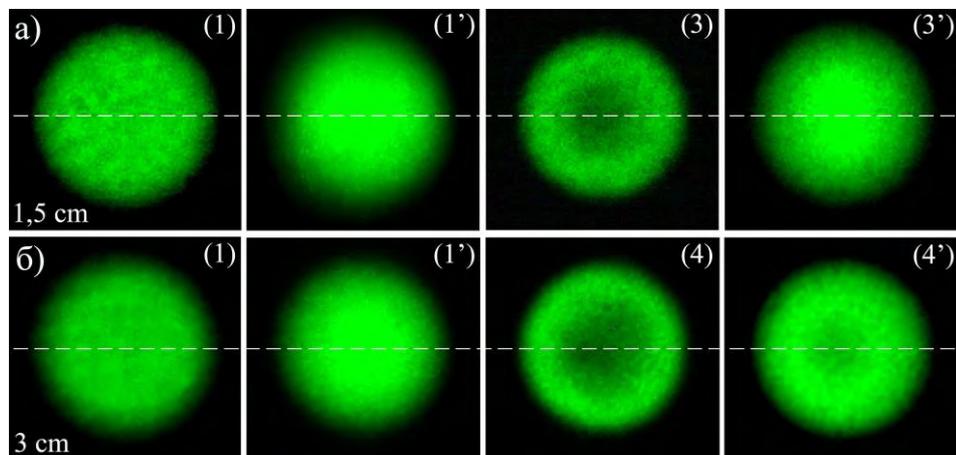
При использовании плоского зеркала в качестве объекта исследования наблюдается значительное (до 4,6 раза) увеличение интенсивности в центре усиленного пучка по сравнению с параллельным пучком (рисунок 3.21). Параллельный луч приобретает провал в центре при увеличении расстояния до зеркала, в то время как в лазерном мониторе радиальное распределение усиленного

луча остается близким к Гауссову. В целом уменьшение интенсивности выходного излучения в реальной схеме меньше, чем в случае параллельного пучка.



a – ГРТ № 5; *б* – ГРТ № 6; сплошные линии 1–3 – параллельный пучок; пунктирные линии 1'–3' – лучи лазерного монитора

Рисунок 3.21 – Профили излучения усилителя яркости при различном расстоянии



a – ГРТ № 5: 1, 1' – 100 см; 3, 3' – 200 см; *б* – ГРТ № 6: 1, 1' – 80 см; 4, 4' – 300 см; 1, 3, 4 – параллельный пучок, 1', 3', 4' – зеркальная схема. Номера рисунков соответствуют номерам кривых на рисунке 3.21 для соответствующих ГРТ

Рисунок 3.22 – Профили излучения усилителя яркости на разных расстояниях

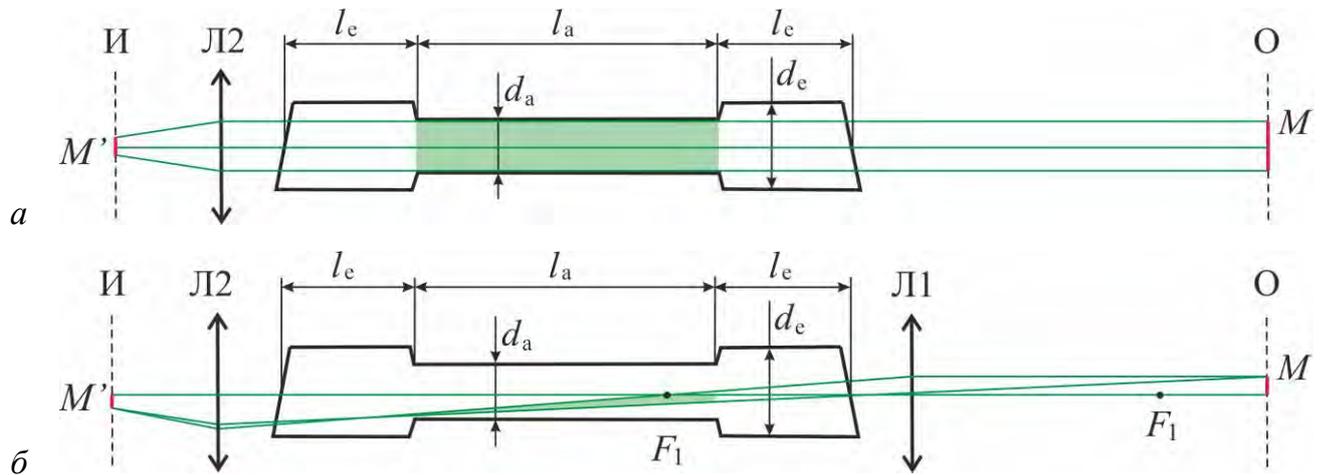
На рисунке 3.22 представлены изображения пучков излучения усилителей яркости, полученные на разных расстояниях между зеркалом и ГРТ для случаев параллельного пучка и пучка, несущего изображение в зеркальном лазерном

мониторе на рисунке 3.14, б. Визуально наблюдается полное отсутствие провала интенсивности и максимальная яркость в центре лучей на расстояниях 80–200 см. Относительно небольшой провал интенсивности в центре пучка наблюдается на расстоянии 300 см. На расстоянии 400 см провал в центре значительный как для параллельного луча, так и для луча в реальной схеме.

На рисунке 3.23 показаны упрощенные схемы распространения параллельного пучка и пучка, несущего изображение, в схеме с фокусирующей оптикой. Очевидно, что как в параллельном пучке, так и в случае скрещивающихся пучков (зеркальная схема) излучение попадает в активную среду с неоднородным усилением. Как показано на рисунке, в случае параллельного пучка отраженный луч усиливается вдоль одной радиальной области (центральной или пристеночной). Появление провала интенсивности в параллельном пучке указывает на то, что в начале инверсии населенности в усиливающей среде лазерный пучок имеет распределение интенсивности излучения, близкое к плоской вершине, которое затем становится неравномерным с провалом в центре.

В реальной лазерной проекционной системе с усилением яркости свет, отраженный от объекта, за счет элементов формирования изображения проходит через области усиления с различным усилением. Как следует из данных, представленных на рисунках 3.21 и 3.22, в реальном лазерном мониторе выравнивание усиления присутствует в определенном диапазоне, который для используемых усилителей яркости ограничен 2–2,5 м. Вероятно, для длинноимпульсного режима работы усилителя яркости [275, 278] дистанция для наблюдения будет больше.

Выравнивание профиля пучка, несущего изображение, также имеет место в ГРТ относительно большого активного объема (ГРТ № 2 диаметром 5 см длиной 90 см, таблица 2.3). На рисунке 3.24 показаны профили параллельного пучка и изображения тестового объекта при различных температурах контейнеров с бромидом меди без добавки HBr , определенные с использованием программы ImageJ вдоль вертикальной линии на рисунке (б).



a – параллельный пучок; *б* – пучок, несущий изображение; *O* – плоскость объекта; Л1 – фокусирующая оптика; Л2 – объектив; И – плоскость изображения на матрице камеры; *M* – часть зеркала, освещенная параллельным пучком; *M'* – изображение усиленного параллельного пучка; F_1 – фокусное расстояние; области усиления выделены зеленой заливкой

Рисунок 3.23 – Упрощенные диаграммы хода лучей в схемах с усилителем яркости

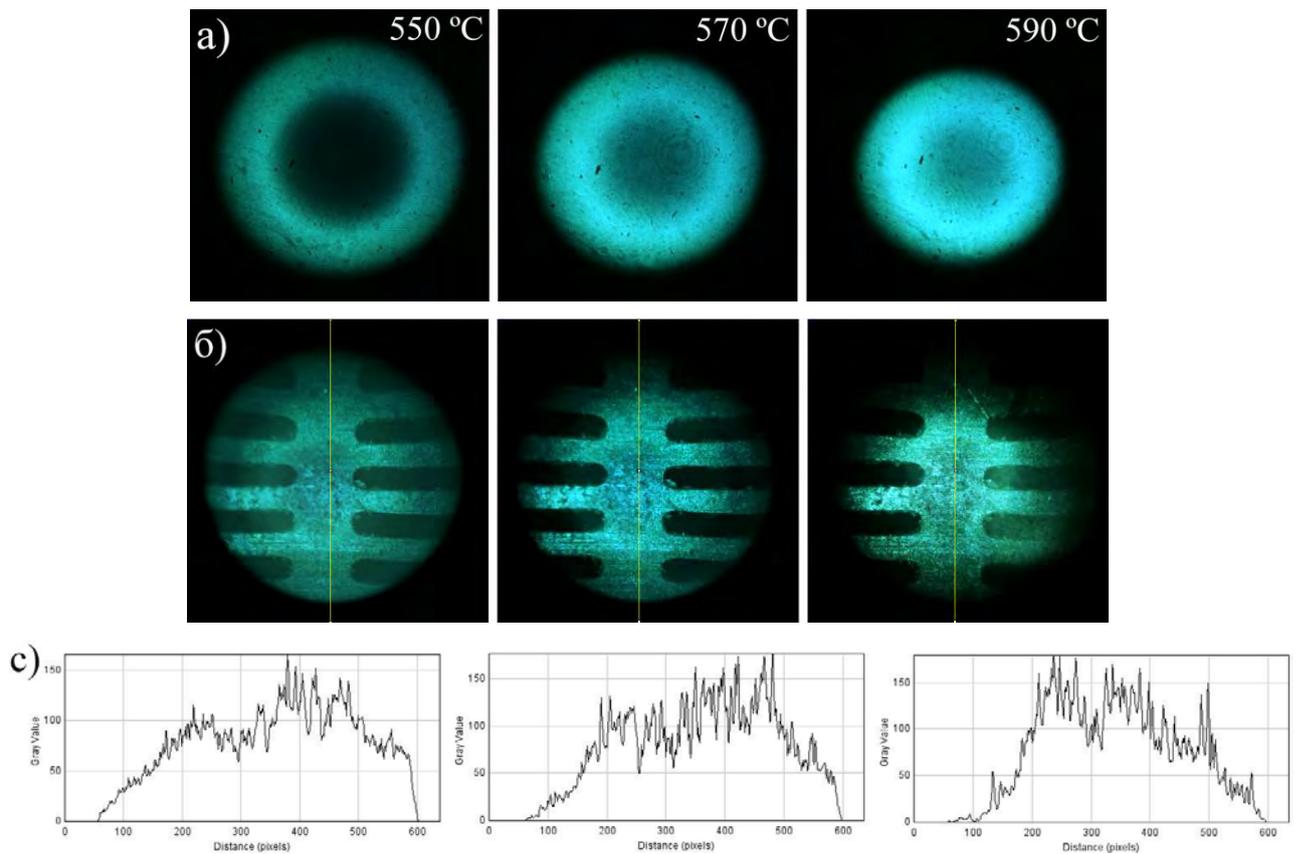


Рисунок 3.24 – Профили излучения усилителя яркости при разной температуре контейнеров с бромидом меди (*a*) и соответствующие им изображения тестового объекта (*б*) и распределения интенсивности изображений (*с*)

Представленные данные показывают, что кольцеобразное распределение излучения в параллельном пучке практически не влияет на радиальное распределение интенсивности изображений тестового объекта. Снижение контраста объекта обусловлено меньшим усилением среды (меньшей яркостью параллельного пучка). Значения температур, значительно выше использованных ранее (рисунок 3.8), свидетельствуют о практически полной выработке бромида в контейнерах.

3.5. Выводы по главе 3

1. Результаты исследования распределения усиления в активном элементе CuBr-лазера показали, что с уменьшением концентрации паров бромида (снижением температуры контейнеров) происходит расширение профиля усиления активной среды с появлением неоднородности усиления в осевой области ГРТ. Это наблюдается как в ГРТ малого диаметра, так и в ГРТ большого диаметра, и сопровождается увеличением мощности генерации и коэффициента усиления.

2. Введение примеси HBr является оправданным только в случае экстремально низкой концентрации бромида меди. В остальных случаях введение добавки HBr приводит к увеличению усиления по оси и обостряет профиль усиления, что не требуется при использовании активных элементов в качестве усилителей яркости в лазерных мониторах. При этом введение добавки требует повышения мощности накачки для обеспечения устойчивого разряда, что повышает требования к высоковольтному источнику накачки.

3. Исследование радиального распределения интенсивности в течение импульса излучения показало, что в первые 7–12 нс без добавки HBr и до 18 нс с добавкой HBr профиль имеет распределение близкое к Гауссову. К концу импульса генерации профиль становится выраженным кольцеобразным. Добавка HBr эффективно меняет ситуацию на оси только в начале импульса генерации. При использовании активной среды на парах бромида меди в качестве усиливающей в лазерных проекционных микроскопах и лазерных мониторах желательно

обеспечить наиболее плоскую вершину излучения. Поэтому оптимальным расстоянием, на котором следует располагать объект наблюдения в моностатическом лазерном мониторе (с одним активным элементом), является расстояние 1,2–2,2 м.

4. Установлено отличие в радиальном распределении двухпроходowego излучения усилителя яркости на парах бромида меди при распространении параллельного пучка и пучка, сформированного оптическими элементами лазерного монитора. Радиальная неоднородность усиления в центре ГРТ до 50–75 %, возникающая при уменьшении концентрации паров бромида меди, выравнивается в усиленном пучке, формирующем изображение объекта наблюдения в реальной схеме лазерного монитора. В целом, профиль луча, несущего изображение, выравнивается частично или полностью во всем диапазоне рабочих температур контейнеров с бромидом меди (455–560 °С) при расстояниях до объекта наблюдения до 4 м. Эта особенность позволяет эксплуатировать ГРТ усилителей яркости в лазерных мониторах практически до полной выработки рабочего вещества (бромида меди).

5. Диапазон наблюдения, который может обеспечить моностатический лазерный монитор, то есть с использованием одного усилителя яркости, ограничен 2–2,5 м, что необходимо учитывать при проектировании оптической системы. В этом диапазоне профиль луча имеет равномерное распределение. На большем расстоянии полного выравнивания профиля не происходит. Указанный диапазон обусловлен уменьшением коэффициента усиления во время импульса генерации и справедлив для типовых режимов работы усилителей яркости с длительностью импульса генерации 20–40 нс. В этом случае полностью отсутствует радиальная неоднородность на всем протяжении импульса генерации, которая наблюдается при усилении параллельного пучка.

Глава 4. Лазерный комплекс для скоростной визуализации и исследования параметров высокотемпературного горения

4.1. Техника скоростной видеорегистрации

Исследование оптических свойств горящих объектов, в частности нанопорошков металлов, возможно двумя основными способами: исследование собственного излучения объекта и исследование зондирующего излучения, отраженного от поверхности объекта. Когда объект сам является источником видимого света или других излучений, изменение спектра или яркости свечения объекта зависит от процессов, происходящих в объекте исследования. В случае горения нанопорошка металла собственное свечение характеризует в целом температуру и интенсивность свечения. Чем выше спектральная яркость, тем выше температура объекта. Исследование интегральной яркости дает информацию об интенсивности процесса, включая повышение температуры и увеличение области объекта, охваченной горением.

Информацию о поверхности под светящейся плазмой можно получить с использованием зондирующего излучения. В этом случае отраженный от поверхности объекта исследования свет дает информацию об отражающей способности поверхности, которая изменяется в ходе горения. Изменение коэффициента отражения может происходить в результате изменения других свойств, в частности механических. Например, при изменении шероховатости поверхности и изменении химического состава веществ на поверхности происходит изменение интенсивности отраженного света. При появлении жидкости на поверхности также будет изменяться коэффициент отражения, а значит, и интенсивность отраженного света.

Для исследования процессов горения высокоэнергетических материалов в данной работе используются методы визуализации на основе скоростной видеорегистрации с применением лазерной подсветки и лазерного мониторинга.

Предлагаются методики проведения экспериментов с использованием соответствующих схем для оценки параметров процессов. В основе технологии скоростной видеорегистрации быстропротекающих процессов лежит последовательная запись изображений в режиме реального времени с частотой кадров, сравнимой со скоростью изменения исследуемых процессов. Воспроизведение записанных последовательностей изображений осуществляется в более медленном масштабе времени, с удобной скоростью для восприятия и анализа человеком. В ходе выполнения исследований, представленных в данной работе, использовались три скоростные цифровые камеры: Fastec HiSpec 1, Photron Fastcam SA1 и Phantom Miro C110. В таблице 4.1 приведены их основные параметры. Частота регистрации 20000 кадров/с является максимальной и ограничена частотой работы усилителей яркости.

Таблица 4.1 – Характеристики цифровых камер

Название камеры	Fastec HiSpec 1	Photron Fastcam SA1	Phantom Miro C110
Цветность	цветная	монохромная	цветная
Максимальная частота съемки, кадров/с	112000	675000	29840
Размер пикселя, мкм	14×14	20×20	5,6×5,6
Максимальное разрешение при частоте съемки 1000 кадров/с, пиксель	814×814	1024×1024	1280×720
Разрешение при частоте съемки 20000 кадров/с, пиксель	< 144×144	512×512	128×32
Объем памяти, Гб	2	8	8
Максимальное время записи, мин	26	20	15
Минимальное время экспозиции, мкс	2,0	1,0	5,0

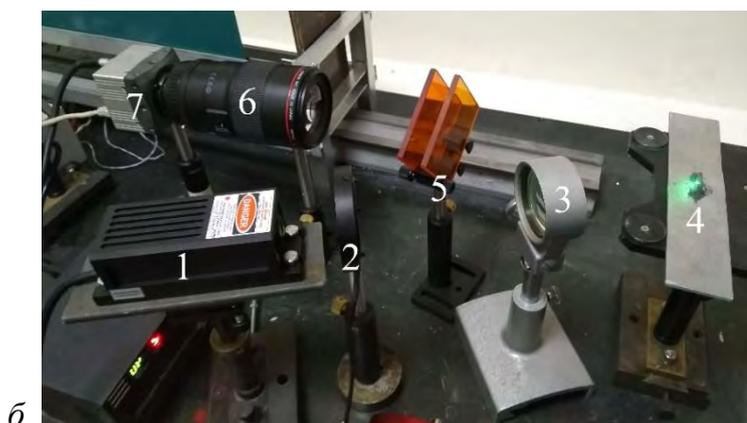
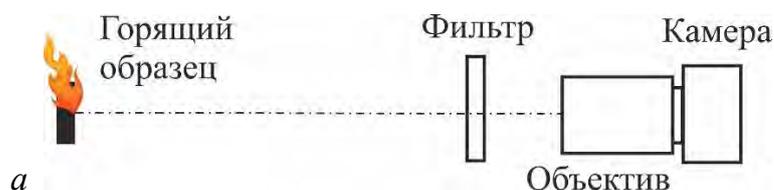
Принцип работы скоростных камер отличается от работы USB-камер, которые передают данные в персональный компьютер во время записи видео. Скоростные камеры записывают последовательность изображений во внутреннюю память, которая фактически ограничивает время записи. Поэтому при исследовании быстропротекающих процессов, таких как горение нанопорошков металлов,

разрешение изображений, скорость и продолжительность записи определяются объектом исследования и выбираются исходя из задач эксперимента. При записи видео с более высокой частотой кадров продолжительность записи ограничена объемом внутренней памяти видеокамеры и будет меньше, чем при записи видео с меньшей частотой кадров. Например, для камеры Phantom Miro C110 максимальное время записи при скорости 800 кадров/с и разрешении 1280×1024 пикселей (максимальном) составляет 5,1 с, при уменьшении скорости съемки до 200 кадров/с время записи при том же разрешении составляет 20,5 с. При уменьшении разрешения до 512×512 пикселей при скорости записи 800 кадров/с время записи составляет 23,9 с.

На рисунке 4.1, *а* показана упрощенная схема видеозаписи процесса горения с применением видеокамер. Так как кроме нейтрального светофильтра в данной схеме не применяется других средств подавления широкополосной фоновой засветки, мы называем такую регистрацию регистрацией в собственном свете. Как правило, в таких схемах используются макрообъективы для получения высокого увеличения и отдаления оптических приборов от высокотемпературного горящего объекта. В работе мы использовали макрообъективы Canon Macro Lens EF 100 mm и Canon Macro Lens EF 180 mm.

На рисунке 4.1, *б* представлена схема для регистрации горения в собственном свете с лазерным инициированием с использованием DPSS-лазера с длиной волны 532 нм. При работе с лазером LS-1-LN-532-200 применялся механический затвор Thorlabs SHB1, имеющий максимальное время открытия/закрытия 26 мс. Большинство исследованных нанопорошков воспламенялись при мощности DPSS-лазера 50–100 мВт при точном фокусировании пучка на образце, но в некоторых случаях инициирования не происходило. При мощности лазера 200 мВт инициирование происходило во всех случаях при работе со смесями, содержащими нанопорошок алюминия. Механическим затвором регулировались момент начала воздействия и продолжительность воздействия лазерного излучения на образец. Линза с фокусным расстоянием 94 мм применялась для фокусировки излучения.

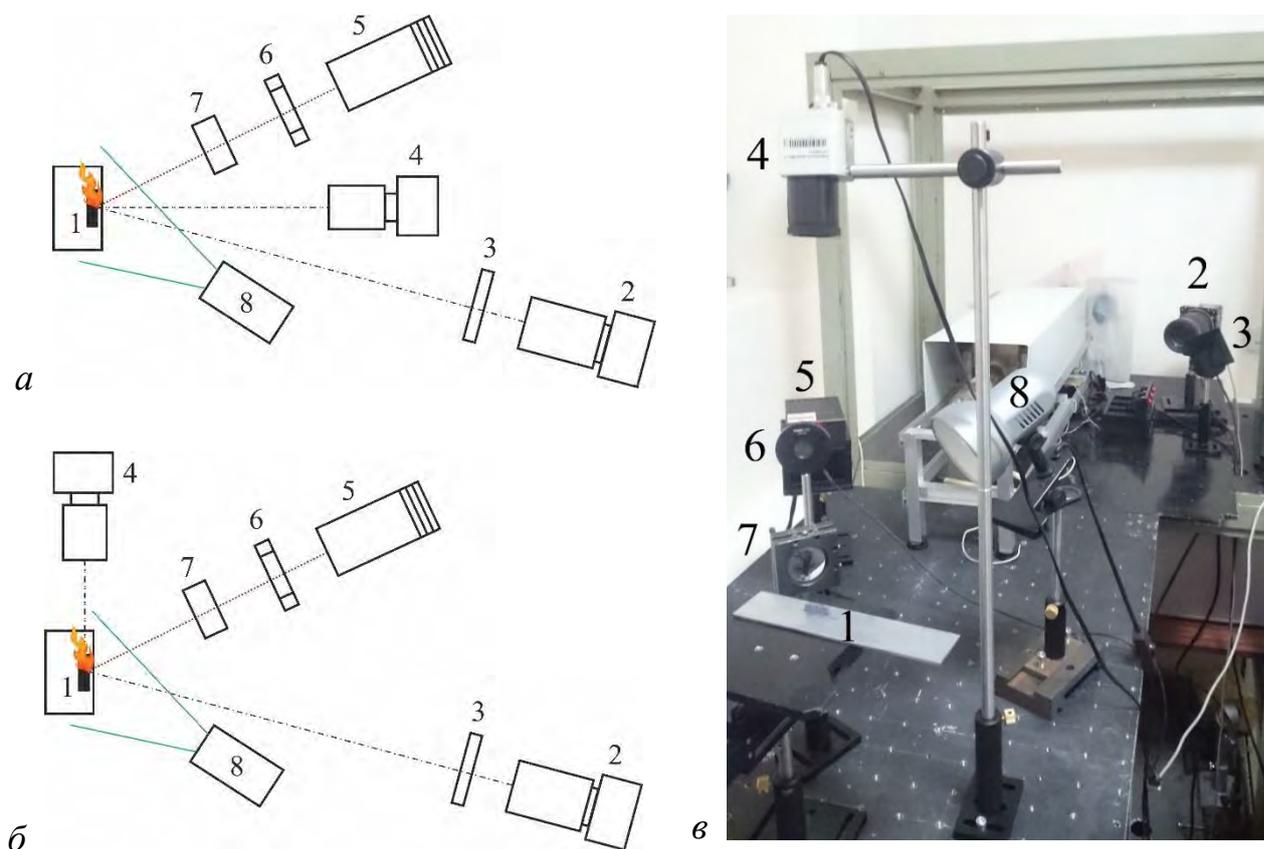
Полосовые фильтры ОС-12 и ОС-13 [340, 341] устанавливались перед объективом и обеспечивали регистрацию изображений в оранжево-красной области спектра для исключения засветки камеры относительно мощным иницирующим излучением. Сигнал с внешнего генератора, формируемый по нажатию кнопки оператором, подавался одновременно на вход начала записи TRIG-IN скоростной камеры и вход контроллера затвора. Таким образом, сначала включалась запись на камере, а затем происходило воздействие иницирующего излучения.



1 – иницирующий лазер 532 нм; 2 – механический затвор; 3 – линза; 4 – образец; 5 – полосовой фильтр; 6 – объектив Canon Macro Lens EF 100 mm; 7 – камера Fastec HiSpec 1

Рисунок 4.1 – Упрощенная (а) и реальная (б) схема скоростной видеозаписи горения нанопорошков металлов в собственном свете

В ряде экспериментов для оценки изменения температуры объекта во время горения нами применялась инфракрасная камера Optris PI 1M, позволяющая регистрировать тепловой профиль объекта в диапазоне температур от 575 до 1800 °С с частотой до 55 кадров/с. На рисунке 4.2 показаны схемы экспериментов. Исследования проводились при расположении ИК-камеры над образцом и спереди. Одновременно осуществлялась запись скоростной камерой Phantom Miro C110.

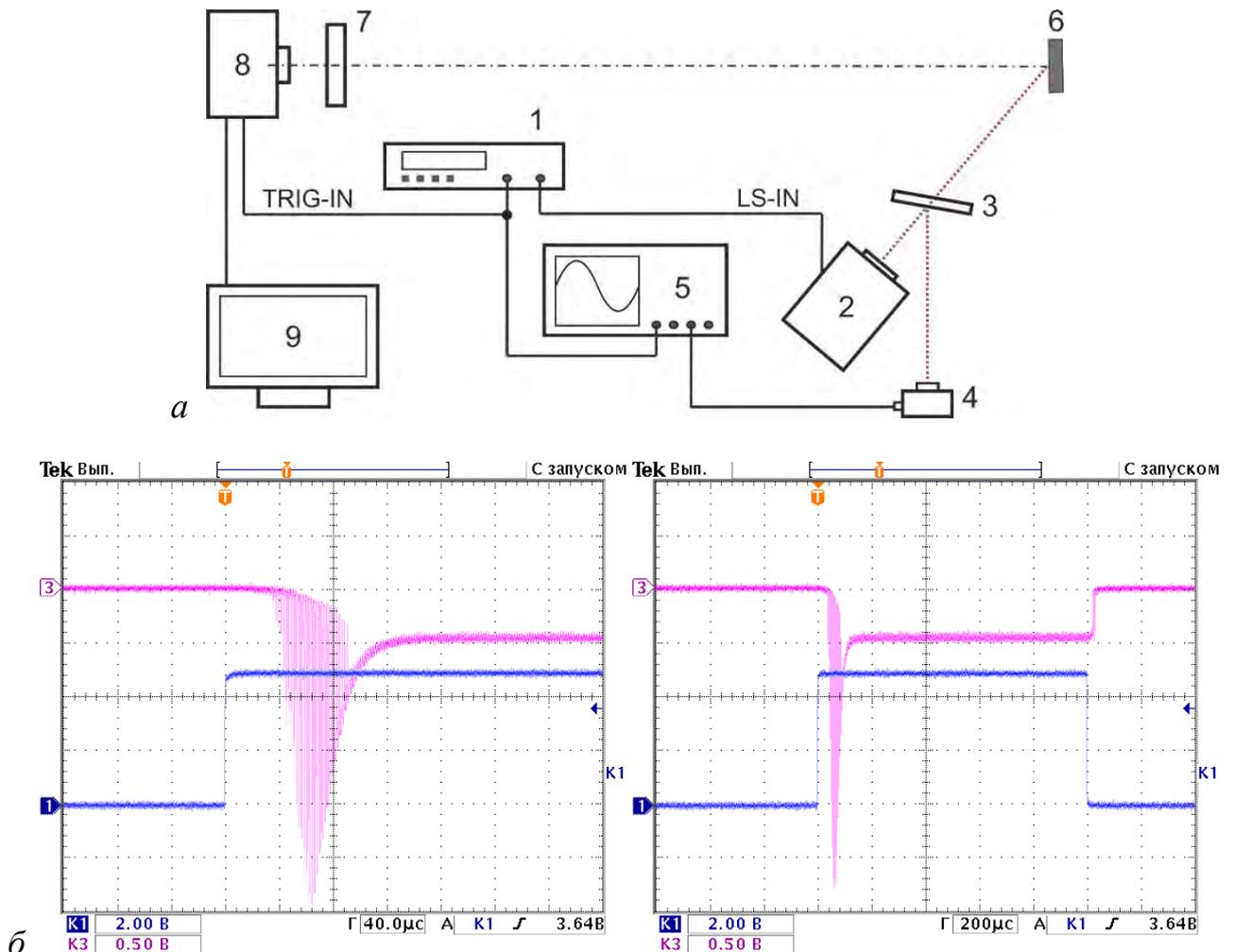


а – ИК-камера расположена спереди образца; *б, в* – ИК-камера расположена над образцом;
 1 – образец; 2 – скоростная камера; 3 – нейтральный светофильтр; 4 – ИК-камера; 5 –
 инициирующий лазер; 6 – механический затвор; 7 – линза; 8 – широкополосный осветитель

Рисунок 4.2 – Схемы исследования горения нанопорошка металла в собственном свете с лазерным инициированием с применением скоростной и ИК-камер

Инициирование является важным вопросом при исследовании процесса горения. В простейшем случае инициирование осуществляется открытым огнем (спичкой или газовой горелкой). Таким способом исследовалось горение в первых работах с микропорошками [125–131] и нанопорошками [285–287, 289] металлов. В последующих работах мы внедрили лазерное инициирование в технику исследования горения с применением лазерного монитора [290, 291]. Недорогими и простыми в эксплуатации являются твердотельные лазеры фирмы ООО «ЛаС»: LS-1-LN-532-200 – непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой и удвоением частоты (DPSS), с регулируемой мощностью от 5 до 200 мВт; LS-2-N-660-2000S – диодный лазер с регулируемой мощностью от 25 мВт до 2 Вт и внешней синхронизацией [342].

На рисунке 4.3, *а* показана схема для тестирования синхронизации камеры и инициирующего лазера LS-2-N-660-2000S.



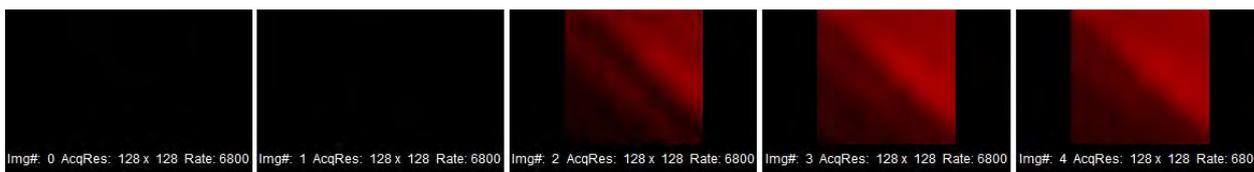
1 – генератор импульсов, 2 – лазер, 3 – светоделительная пластина, 4 – фотодиод, 5 – осциллограф, 6 – отражатель, 7 – фильтр, 8 – камера, 9 – компьютер, K1 – сигнал TRIG-IN, K3 – импульс излучения лазера (инвертированный)

Рисунок 4.3 – Схема для тестирования синхронизации (*а*) и диаграммы сигналов включения записи камеры и импульса инициирующего излучения (*б*) при разной развертке осциллографа

При работе с лазером LS-2-N-660-2000S импульсный сигнал требуемой длительности подается на вход разрешения. Особенностью работы этого лазера является наличие постоянного излучения мощностью 1 мВт в ждущем режиме, которое переключается на заданную максимальную мощность на время импульса на входе разрешения. Учитывая, что включение лазерного диода происходит с

микросекундными задержками, сравнимыми с временем включения записи скоростной камеры, при одновременной подаче сигнала с внешнего генератора необходимо гарантировать, что камера регистрирует начало воздействия, т.е. первые кадры не пропадают. Поэтому при работе с диодным лазером для формирования импульсов синхронизации использовался двухканальный цифровой генератор импульсов АКИП-3301, имеющий внешний запуск. Длительность импульсов генератора устанавливается независимо. Задержка импульсов по каналам задается в широких пределах.

На рисунке 4.3, *б* приведены диаграммы сигналов запуска записи камеры и импульса инициирующего лазера при нулевой задержке между каналами (сигналами TRIG-IN и LS-IN). Импульс излучения регистрировался фотодиодом Thorlabs DET10A/M с временем отклика 1 нс. Сигналы записывались осциллографом Tektronix TDS-3054C. Как следует из представленных осциллограмм, задержка излучения лазерного диода по отношению к синхроимпульсу составляет ~ 40 мкс, при этом имеет место переходный процесс длительностью ~ 80 мкс. На рисунке 4.4 приведены кадры скоростной видеозаписи при нулевой задержке между сигналами TRIG-IN и LS-IN равной 150 мкс. Так как первый кадр в обоих случаях пустой, запись камеры начинается до включения лазера. При задержке 150 мкс мы наблюдаем два пустых кадра.

*a**б*

a – нулевая задержка между сигналами TRIG-IN и LS-IN; *б* – задержка 150 мкс

Рисунок 4.4 – Кадры видеозаписи излучения диодного лазера со скоростью 6800 кадров/с

4.2. Техника скоростной визуализации с лазерной подсветкой

Подавление собственного излучения объекта исследования с помощью нейтрального или полосового светофильтра приводит к потере информации о менее нагретых частях поверхности. Чтобы исключить насыщение камеры от более яркого излучения, устанавливается более темный фильтр, соответственно, наблюдение областей поверхности с меньшей яркостью свечения становится затруднительным или невозможным. В ряде случаев это является приемлемым, в частности, когда исследуется максимально нагретая область образца, например, при лазерной сварке. В случае горения порошковых материалов, как правило, имеют место значительные перепады температур, достигающие тысяч градусов. В связи с этим видеорегистрация в собственном свете имеет ограниченную применимость.

Подсветка поверхности лазерным излучением с одновременной узкополосной фильтрацией дает возможность исследовать отраженный от поверхности свет. Очевидно, что интенсивность подсветки должна быть значительно выше интенсивности собственного свечения в диапазоне длин волн узкополосного светофильтра. В работе [128] с использованием лазера на парах бромида меди средней мощностью 4 Вт исследовался процесс горения смесей крупнодисперсных порошков металлов, таких как смеси микропорошков Ti-B-Cu и Ni-Al-CaCO₃. Активный элемент в работе [128] имел внутренний диаметр активной области 5 см и длину 90 см (ГРТ 2, таблица 2.3). При диаметре пучка ~1,5 см, в котором сосредоточена большая часть излучения, плотность мощности составляла 20–25 мВт/мм². При такой плотности мощности излучения воспламенения образцов не происходило. Схема эксперимента приведена на рисунке 4.5. В качестве фильтра использовался интерференционный светофильтр с максимумом пропускания на длине волны 532 нм и шириной полосы пропускания 10 нм.

Использование лазера на парах бромида меди в качестве источника подсветки имеет как преимущества, так и неудобства. В качестве преимуществ следует отметить большой естественный диаметр пучка, который не нужно расширять

специальной оптикой для освещения значительной поверхности образца. Кроме того, лазер на парах бромида меди работает в импульсно-периодическом режиме с высокой частотой следования импульсов, имея высокую энергию в импульсе генерации при относительно невысокой средней мощности. Высокая энергия в импульсе генерации (высокая спектральная яркость) является преимуществом при исследовании энергетических материалов. В то же время невысокая средняя мощность генерации не создает значительного воздействия на объект исследования, снижая риск неконтролируемого воспламенения.

В качестве негативных сторон работы с лазером на парах бромида меди следует отметить его значительные массогабаритные параметры, высокую стоимость и сложность эксплуатации по сравнению с твердотельными лазерами. В связи с этим перспективной задачей визуализации является разработка техники лазерной подсветки на основе недорогих коммерчески доступных твердотельных лазеров. Одним из таких лазеров является DPSS-лазер LS-1-LN-532-200. На рисунке 4.6 приведена схема визуализации горения нанопорошков металлов, аналогичная представленной на рисунке 4.5, в которой используется лазер LS-1-LN-532-200. Поскольку диаметр пучка лазера составляет 0,9 мм, для освещения всей поверхности образца мы использовали диффузор. Мощность излучения лазера в этой схеме составляла 50 мВт. Для отсекающего широкополосного излучения использовался интерференционный светофильтр производства с максимумом пропускания на длине волны 532 нм и шириной полосы пропускания 10 нм. Нейтральный светофильтр служил для исключения засветки камеры излучением на длине волны 532 нм. Модернизацией схемы с лазерной подсветкой на основе твердотельного лазера являлась схема с расширителем пучка, представленная на рисунке 4.7. В предложенной схеме мы установили расширитель луча x10 (Standa), чтобы обеспечить равномерное освещение поверхности образца. Используемый расширитель фирмы Standa предназначен для работы на длине волны 532 нм и позволяет расширять диаметр пучка от 1 до 12 раз.

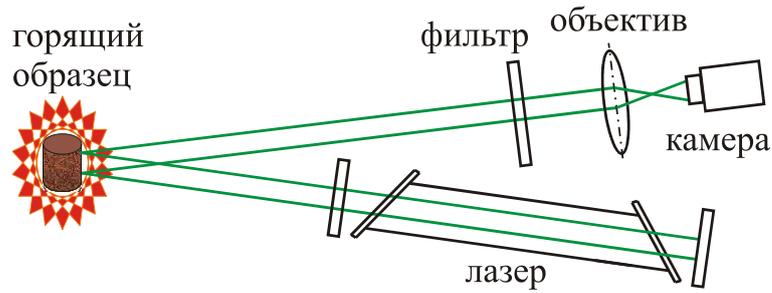
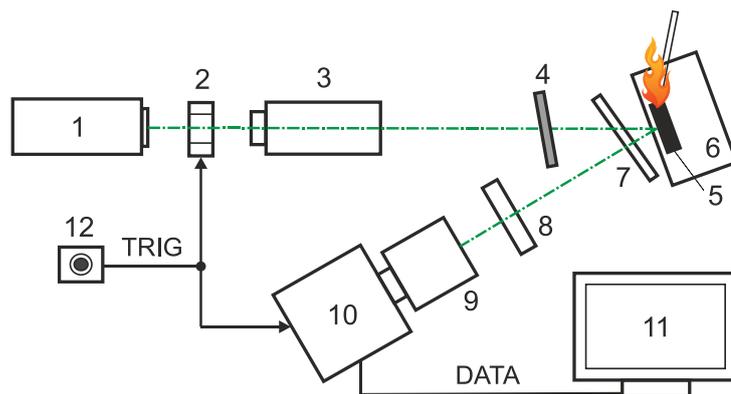


Рисунок 4.5 – Схема наблюдения процесса горения с применением лазерной подсветки [128]



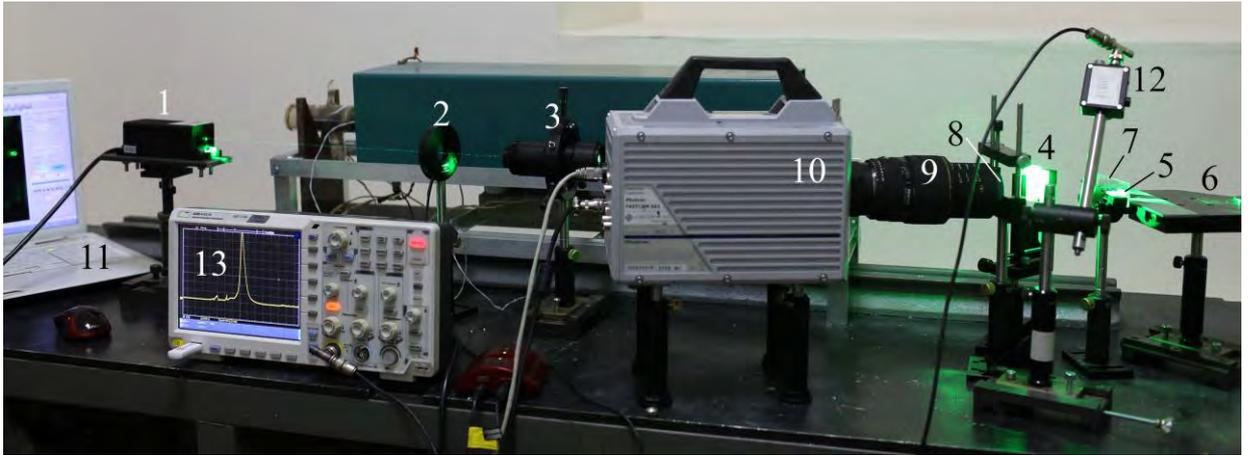
1 – лазер, 2 – механический затвор, 3 – диффузор, 4 – образец, 5 – нейтральный светофильтр, 6 – узкополосный светофильтр, 7 – объектив, 8 – скоростная камера

Рисунок 4.6 – Схема наблюдения горения микропорошков металлов с применением лазерной подсветки с использованием твердотельного лазера



1 – твердотельный лазер, 2 – механический затвор, 3 – расширитель пучка, 4 – диффузор, 5 – объект, 6 – предметный столик, 7 – защитная пластина, 8 – узкополосный фильтр 532 нм, 9 – объектив, 10 – скоростная камера, 11 – ПК, 12 – кнопка запуска регистрации

Рисунок 4.7 – Схема визуализации с использованием лазерной подсветки



1 – лазер, 2 – механический затвор, 3 – расширитель пучка, 4 – диффузор, 5 – объект, 6 – предметный столик, 7 – защитная пластина, 8 – узкополосный фильтр 532 нм, 9 – объектив, 10 – скоростная камера, 11 – ПК, 12 – фотодиод, 13 – осциллограф

Рисунок 4.8 – Внешний вид экспериментальной установки с применением лазерной подсветки и регистрации интенсивности свечения фотодиодом

В этой серии экспериментов мы использовали монохромную камеру Photron Fastcam SA1, которая работала в режиме внутренней синхронизации. Внешняя синхронизация в данном случае не требовалась, т.к. твердотельный лазер работал в непрерывном режиме. Механический затвор в данной схеме служил для удобства работы с образцами, чтобы лазерное излучение не освещало предметный столик в процессе подготовки образцов. В целях безопасности непосредственно перед образцом устанавливалась защитная стеклянная пластина. Инициирование осуществлялось открытым огнем. В дополнение к скоростной видеорегистрации в схеме устанавливались фотодиод Thorlabs DET10A/M и осциллограф АКПП-4122/10 для регистрации яркости свечения образца во время горения (рисунок 4.8).

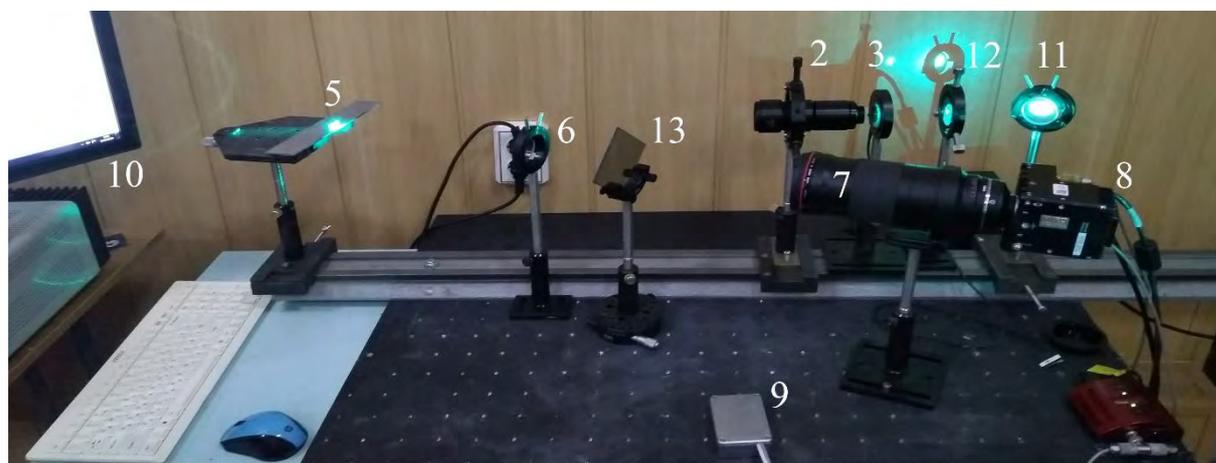
На рисунке 4.9 приведены три варианта схем с лазерной подсветкой с использованием скоростной камеры Phantom Miro C110 и двух лазеров: твердотельного LS-1-LN-532-200 и на парах бромида меди. Излучение лазера на парах бромида меди заводилось в схему поворотным зеркалом. Твердотельный лазер в схеме на рисунке 4.9, а имел постоянную мощность 200 мВт на длине волны 532 нм. Так как диаметр пучка на выходе лазера составлял менее 1 мм, в схеме устанавливался расширитель пучка и диффузор для освещения всего объекта.



а



б



в

1 – твердотельный лазер, 2 – расширитель пучка, 3 – затвор, 4 – диффузор, 5 – объект,
 6 – узкополосный фильтр, 7 – объектив, 8 – скоростная камера, 9 – кнопка запуска, 10 – ПК,
 11 – поворотное зеркало, 12 – диафрагма, 13 – нейтральный фильтр

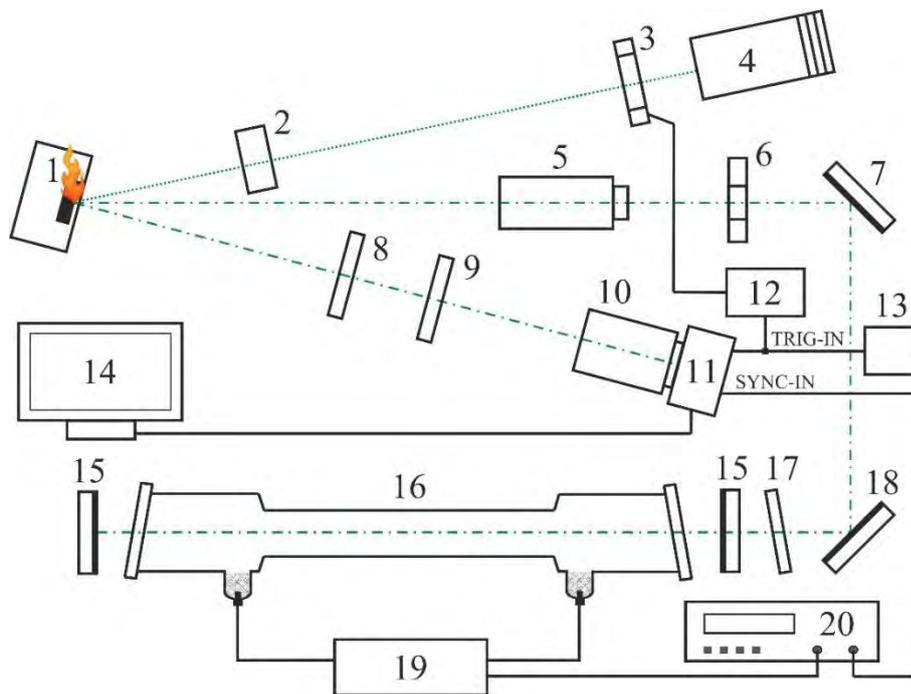
Рисунок 4.9 – Схемы с лазерной подсветкой с использованием скоростной камеры Phantom Miro C110 и твердотельного лазера (а) и лазера на парах бромида меди (б, в)

В схеме на рисунке 4.9, б для подсветки использовалось излучение CuBr-лазера на длине волны 510,6 нм, которое отфильтровывалось полосовым фильтром, установленным на выходе лазера. Подобно схеме на рисунке 4.9, а, в схеме на рисунке 4.9, б устанавливался диффузор. Расширитель пучка не устанавливался, так как диаметр пучка CuBr-лазера составлял ~10 мм. Мощность излучения, падающего на диффузор, составляла 380 мВт. В схеме на рисунке 4.9, в на пути излучения устанавливалась диафрагма диаметром 6 мм, которая отсекала боковые части диаграммы радиального распределения. Средняя мощность излучения после диафрагмы составляла 200 мВт. Расширитель пучка увеличивал диаметр луча до ~30 мм, что было достаточно для освещения объекта наблюдения. Достоинством данной схемы является отсутствие диффузора близости объекта наблюдения.

Излучение, регистрируемое скоростной камерой, отфильтровывалось на длине волны лазера подсветки. В схеме на рисунке 4.9, а полосовой фильтр 532 ± 5 нм имел максимальное пропускание 78 %. В схеме на рисунке 4.9, б полосовой фильтр 510 ± 5 нм имел максимальное пропускание 80 %. В схеме на рисунке 4.9, в для выравнивания яркости перед объективом камеры дополнительно устанавливался нейтральный светофильтр с пропусканием 52 %. Экспозиция камеры составляла 500 мкс для лазера 532 нм, и 500 и 250 нм для CuBr-лазера. При использовании CuBr-лазера скоростная камера имела внешнюю синхронизацию с импульсами излучения лазера, таким образом, камера регистрировала изображения, формируемые десятью или пятью импульсами подсветки. Технически, при использовании более мощного CuBr-лазера, длительность экспозиции может быть уменьшена до одного–двух импульсов.

Синхронизация обеспечивалась двухканальным генератором импульсов, как это показано на рисунке 4.10. Генератор формировал две синхронные последовательности импульсов с частотами 500 Гц и 20 кГц, которые подавались, соответственно, на вход синхронизации скоростной камеры (500 Гц) и вход внешнего запуска высоковольтного источника накачки лазера на парах бромида меди (20 кГц). Параметры синхроимпульсов задаются в широких пределах в

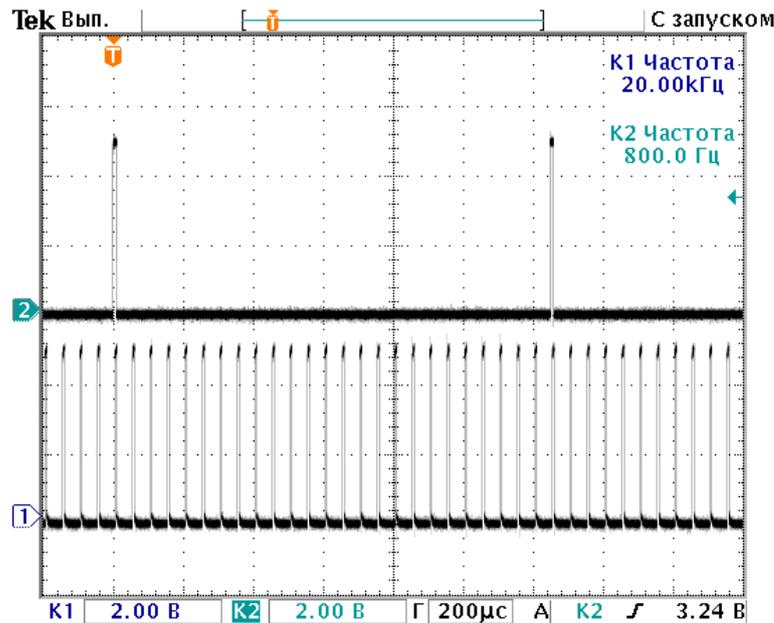
зависимости от требуемой скорости съемки. На рисунке 4.11 показан пример синхронизации работы лазера и цифровой камеры, в котором генератор формирует последовательности импульсов с частотами 800 Гц и 20 кГц [303]. Применение генератора синхроимпульсов АК ИП-3301 (или АКТАКОМ AWG-4122) обеспечивает более устойчивую синхронизацию по сравнению с делителем частоты на основе интегральных логических микросхем.



1 – объект, 2 – линза, 3 – затвор, 4 – инициирующий лазер, 5 – расширитель пучка, 6 – диафрагма, 7, 18 – поворотные зеркала, 8, 17 – фильтры 510 нм, 9 – нейтральный фильтр, 10 – объектив, 11 – скоростная камера, 12 – контроллер затвора, 13 – кнопка запуска исследования, 14 – ПК, 15 – резонатор, 16 – ГРТ, 19 – источник накачки, 20 – генератор синхроимпульсов

Рисунок 4.10 – Схема исследования с лазерной подсветкой от CuVr-лазера и лазерным инициированием

Для исследования лазерного инициирования с использованием лазерной подсветки в схеме на рисунке 4.12 в качестве инициирующего лазера могут использоваться лазеры LS-1-LN-532-200 или LS-2-N-660-2000S. Инициирование начинается с открытия механического затвора, одновременно начинается запись изображений.



К1 – синхроимпульсы высоковольтного генератора; К2 – синхроимпульсы скоростной камеры

Рисунок 4.11 – Осциллограммы импульсов задающего генератора

4.3. Лазерный монитор с синхронной регистрацией изображений

Традиционная схема лазерного монитора состоит из усилителя яркости (активного элемента лазера на парах меди или бромида меди), скоростной камеры, объектива, формирующего изображение, и согласующих оптических элементов (рисунок 4.12). Изображение проецируется либо на экран (рисунок 4.12, а), либо напрямую на матрицу цифровой камеры (рисунок 4.12, б, в). В ряде случаев для удобства размещения оптических элементов используется схема с поворотным зеркалом (рисунок 4.12, в). Принцип его работы заключается в следующем.

Сверхизлучение усилителя яркости освещает область объекта наблюдения через объектив 1. Объектив 1 является элементом, формирующим изображение, от него зависит размер области наблюдения и увеличение. В традиционных схемах лазерного монитора, как правило, используются объективы или линзы с фокусным расстоянием до 10 см. Отраженный свет несет информацию о поверхности объекта, усиливается за счет прохождения через усилитель яркости и проецируется на экран или матрицу камеры. Нейтральный фильтр, установленный на выходе усилителя, блокирует широкополосное излучение горения нанопорошка алюминия и свечение

газового разряда в ГРТ. Фильтр необходимо использовать в случае прямого проецирования усиленного изображения на матрицу камеры из-за высокой чувствительности камеры. При проецировании на экран необходимости использования фильтра нет.

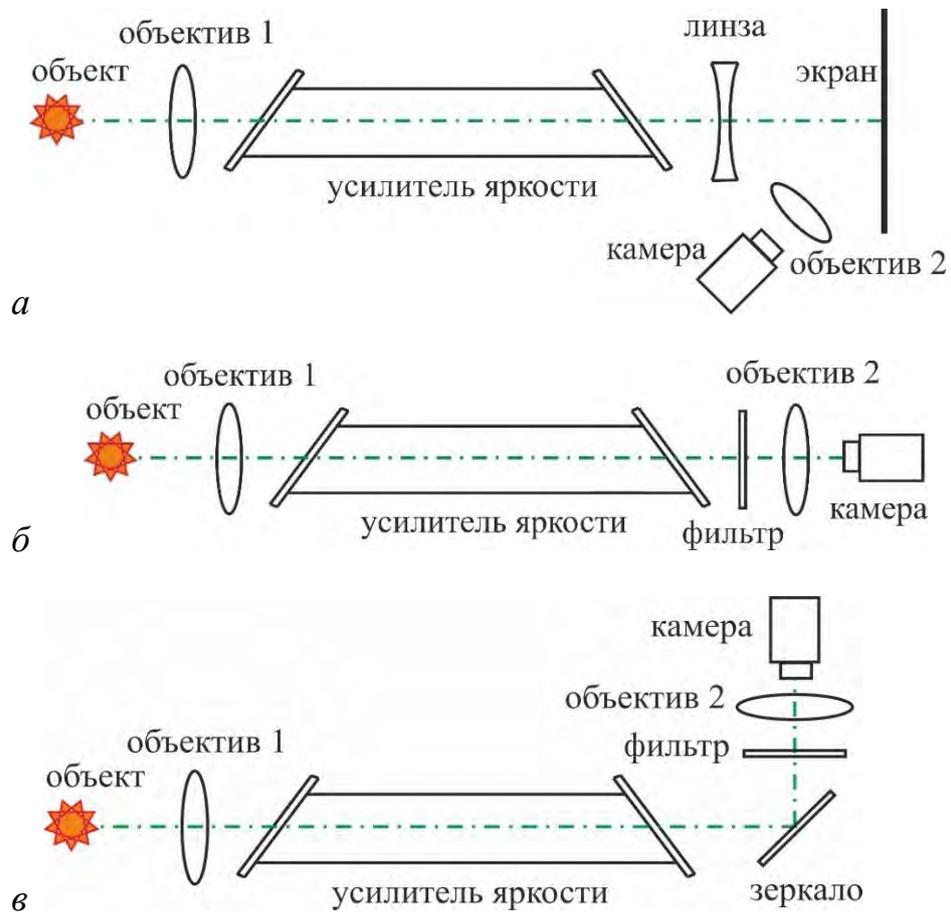
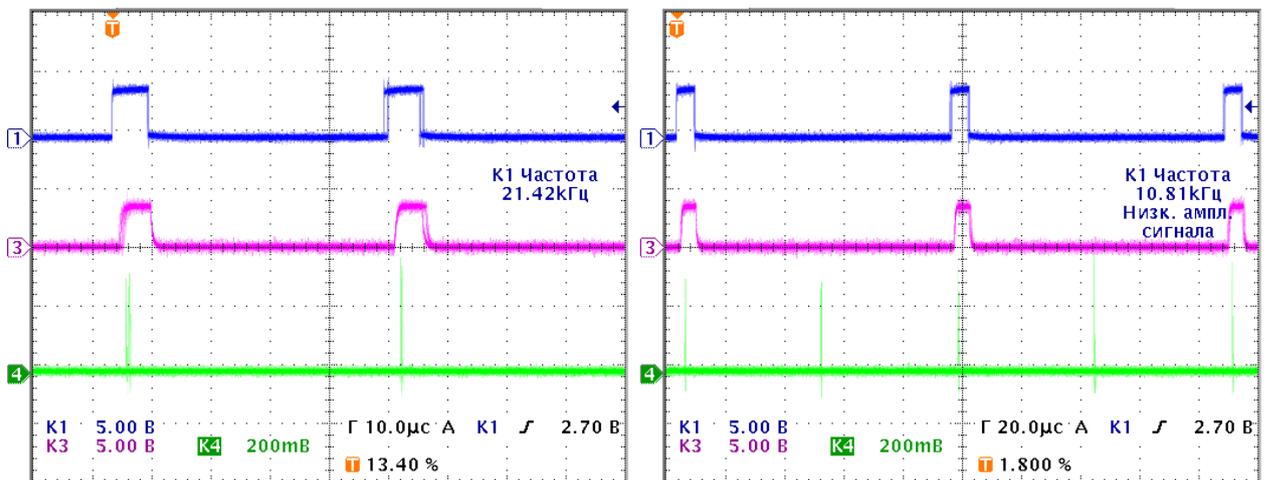


Рисунок 4.12 – Традиционная схема лазерного монитора с проецированием изображения на экран (а) и матрицу цифровой камеры (б, в)

В первых работах с использованием лазерного монитора изображение объекта проецировалось на экран, при этом камера записывала изображение с экрана [125, 126]. Регистрация объектов в работах [125, 126] осуществлялась с помощью камер Casio EX-FH20 и MotionPro X3. Существенным улучшением регистрации изображений по сравнению с первой работой [125] стало внедрение покадровой регистрации изображений [126–133]. Разработанная система позволяет получать изображение от одиночного импульса сверхсветимости усилителя яркости, что уменьшает искажения, связанные с нестабильностью разряда от импульса к

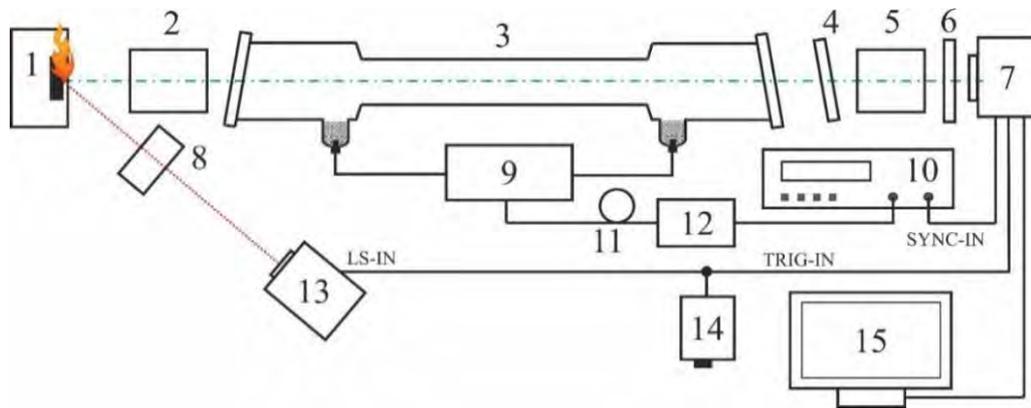
импульсу и вибрацией элементов схемы. Схемы лазерного монитора с покадровой регистрацией изображений с проецированием изображения на экран и матрицу цифровой камеры рассмотрены в патентах [132, 133]. Синхронизация камеры осуществлялась путем деления частоты следования импульсов, поступающих с задающего генератора высоковольтного источника накачки CuBr-лазера. Делитель частоты был выполнен на основе цифровых логических элементов. На рисунке 4.13 представлены осциллограммы работы схемы синхронизации при различной частоте съемки (камера Fastec HiSpec 1): регистрируется изображение от каждого импульса сверхсветимости (рисунок 4.13, а) и от каждого второго импульса сверхсветимости (рисунок 4.13, б).



К1 – синхроимпульсы на входе SYNC-IN камеры; К2 – импульсы экспозиции на выходе SYNC-OUT камеры; К3 – импульсы сверхсветимости

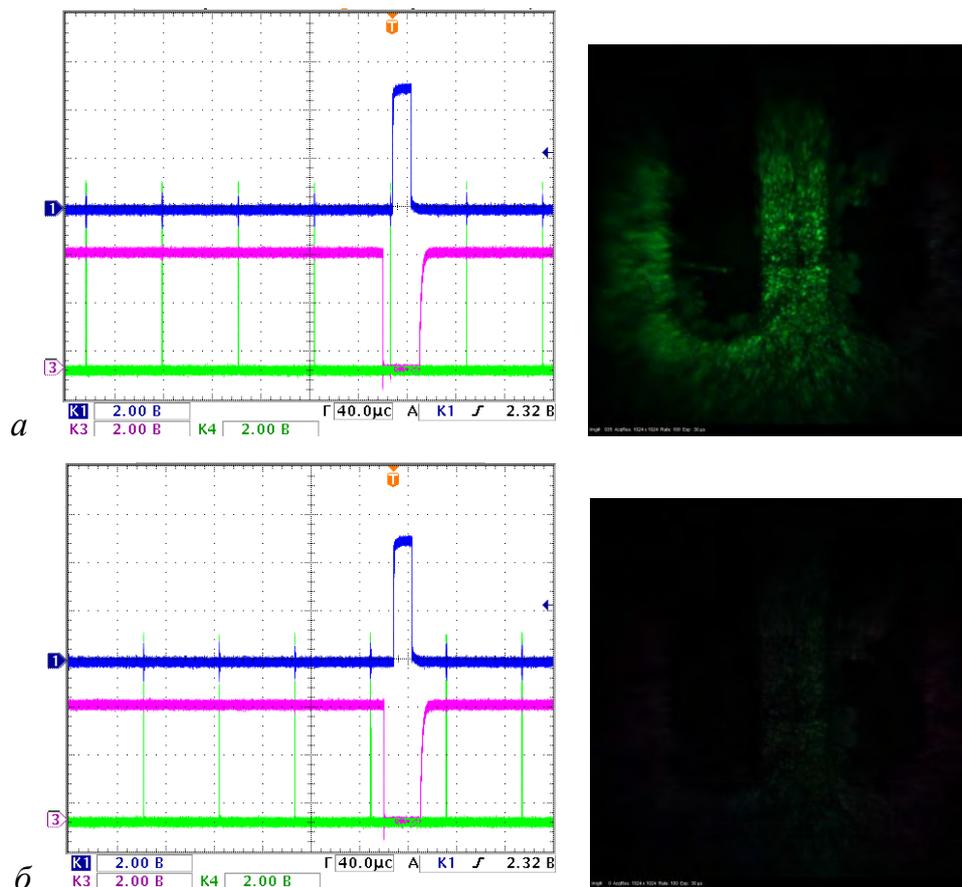
Рисунок 4.13 – Осциллограммы импульсов синхронизации и сверхсветимости усилителя яркости при различных частотах съемки

Альтернативным способом реализации моноимпульсного режима регистрации является использование двухканального цифрового генератора [303], как это показано на рисунке 4.14. По умолчанию задержка между каналами нулевая. При необходимости точной синхронизации импульсов накачки и открытия электронного затвора камеры генераторы импульсов АКПП-3301 и АКТАКОМ AWG-4122 позволяют вводить задержку между каналами.



1 – объект, 2, 5 – объективы, 3 – усилитель яркости, 4, 6 – светофильтры, 7 – коростная камера,
8 – линза, 9 – источник накачки, 10 – задающий генератор, 11 – оптоволоконно, 12 –
оптоволоконный передатчик, 13 – инициирующий лазер, 14 – ждущий мультивибратор, 15 – ПК

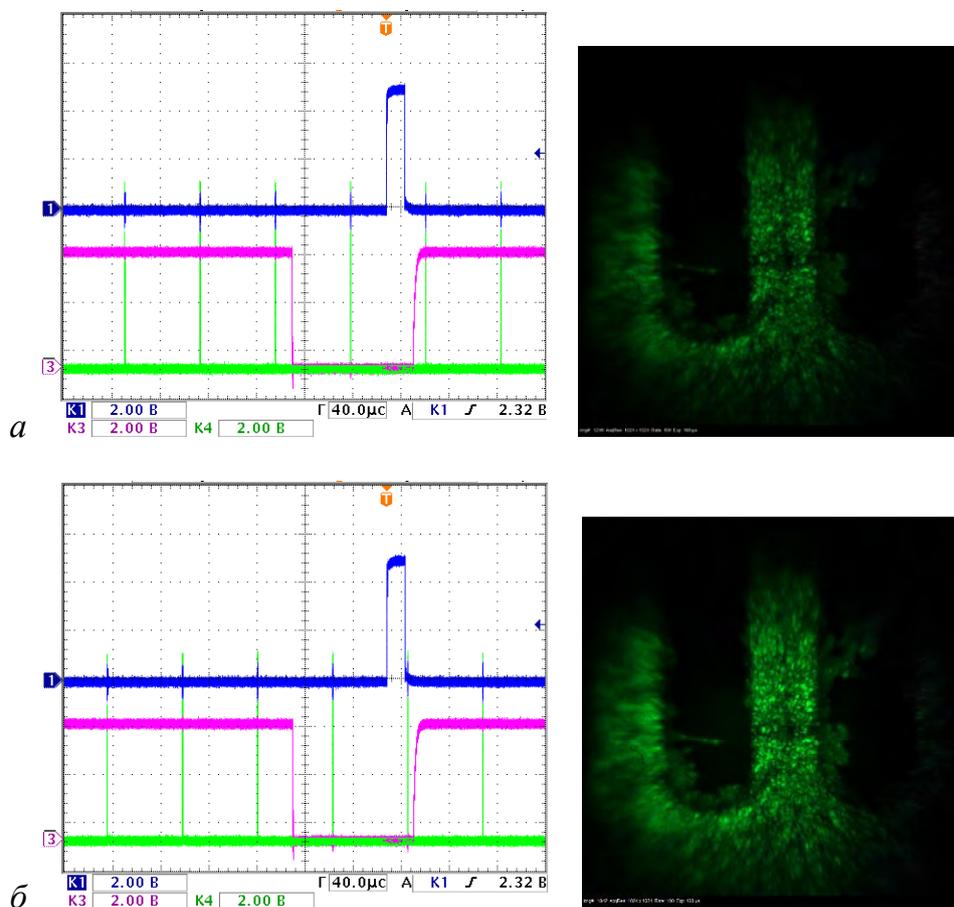
Рисунок 4.14 – Схема лазерного монитора с покадровой регистрацией изображений с синхронизацией от генератора импульсов



а – попадает 1 импульс; *б* – не попадает ни одного

Рисунок 4.15 – Осциллограммы импульсов экспозиции камеры (3) и сверхсветимости усилителя яркости (4) и соответствующие кадры лазерного монитора

Синхронизация цифровой камеры и усилителя яркости является полезной не только в моноимпульсном режиме регистрации, когда изображение формируется одним импульсом сверхсветимости, но и в случае, когда кадр цифровой записи изображения формируется несколькими импульсами сверхсветимости усилителя яркости. Синхронизация позволяет обеспечить одинаковое экспонирование объекта. На рисунках 4.15–4.17 показаны реальные ситуации при асинхронной работе камеры и усилителя яркости, когда в экспозицию камеры попадает разное количество импульсов.

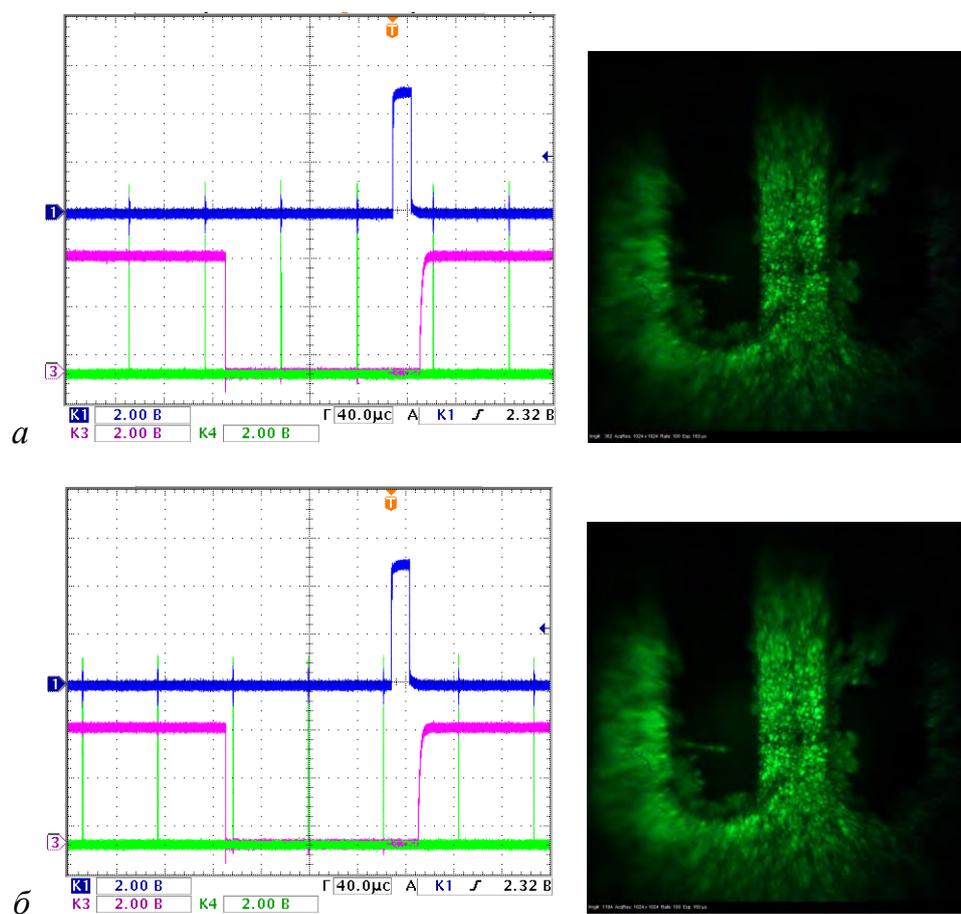


а – попадает 1 импульс; *б* – попадает 2 импульса

Рисунок 4.16 – Осциллограммы импульсов экспозиции камеры (3) и сверхсветимости усилителя яркости (4) и соответствующие кадры лазерного монитора

Очевидно, что наличие синхронизации при многоимпульсной съемке обеспечивает примерно одинаковую яркость изображений статических объектов. Отличие в этом случае может быть вызвано только нестабильностью разряда и

генерации от импульса к импульсу. Длительность экспозиции и момент прихода импульса излучения не влияют на яркость изображения при одинаковом количестве импульсов, попавших в экспозицию камеры. Таким образом, синхронная работа скоростной камеры и усилителя яркости являются ключевым условием получения достоверных изображений поверхности объекта наблюдения, яркость которых будет определяться только нестабильностью энергии генерации и усиления от импульса к импульсу.



a – попадает 2 импульса; *б* – попадает 3 импульса

Рисунок 4.17 – Осциллограммы импульсов экспозиции камеры (3) и сверхсветимости усилителя яркости (4) и соответствующие кадры лазерного монитора

При исследовании динамических объектов, таких как горящие нанопорошки металлов, максимальная четкость изображений будет в моноимпульсном режиме. Данный режим обеспечивает минимальное экспонирование объекта исследования, равное длительности импульса излучения усилителя яркости (20–35 нс), даже при

длительности экспозиции скоростной камеры, существенно превышающей эти значения (таблица 4.1).

4.4. Пространственное разрешение лазерного монитора

Лазерный монитор представляет собой лазерный проекционный микроскоп, который предназначен, прежде всего, для получения изображений мелких объектов со значительным увеличением ($\times 10$ и более). Элементом, определяющим увеличение системы, дальность наблюдения и область зрения, является объектив l (рисунок 4.12).

В работе [126] экспериментально получено пространственное разрешение 0,83 мкм при наблюдении дифракционной решетки 1200 штрихов/мм с использованием объектива $\times 15$ от микроскопа Биолам 10М (рисунок 4.18). Использовался усилитель яркости на основе CuBr-лазера с апертурой газоразрядной трубки 1,5 см при длине активной области 40 см. В случае практической реализации такое наблюдение возможно при исследовании горения тонких слоев и пленок нанопорошков металлов, при котором выделение энергии будет незначительным и не приведет к повреждению объектива.

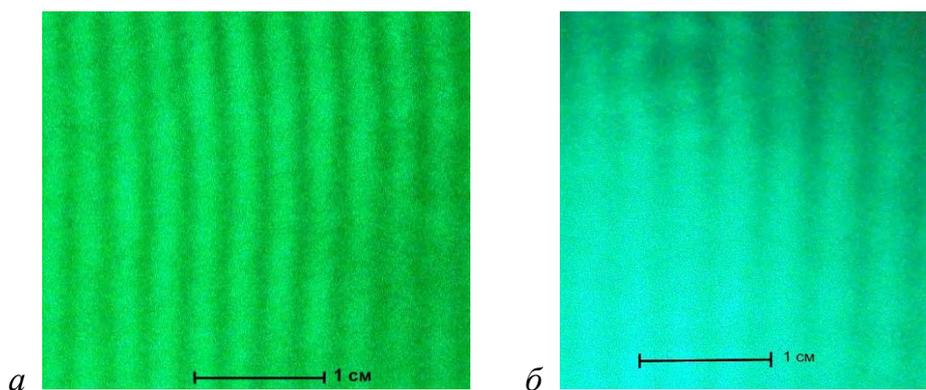


Рисунок 4.18 – Изображения дифракционных решеток 600 штрихов/мм (а) и 1200 штрихов/мм (б), полученные с помощью лазерного монитора [126]

В работе [131] оценка пространственного разрешения лазерного монитора проводилась путем визуализации оптических миср с известными характерными

размерами. Для калибровки лазерного монитора в работе [286] нами использовалась микроскопическая калибровочная линейка с расстоянием между штрихами 10 мкм. Изображение линейки представлено на рисунке 4.19, *а*. В экспериментах в работе [286] использовалась ГРТ с длиной активной области 40 см и внутренним диаметром 1,5 см. В ряде экспериментов для калибровки использовалась камера Горяева, которая представляет собой прозрачный стеклянный параллелепипед с бороздами и нанесённой микроскопической сеткой. Размеры малых делений клетки сетки составляют 50 мкм, а больших – 200 мкм. Изображение сетки камеры Горяева представлено на рисунке 4.19, *б*.

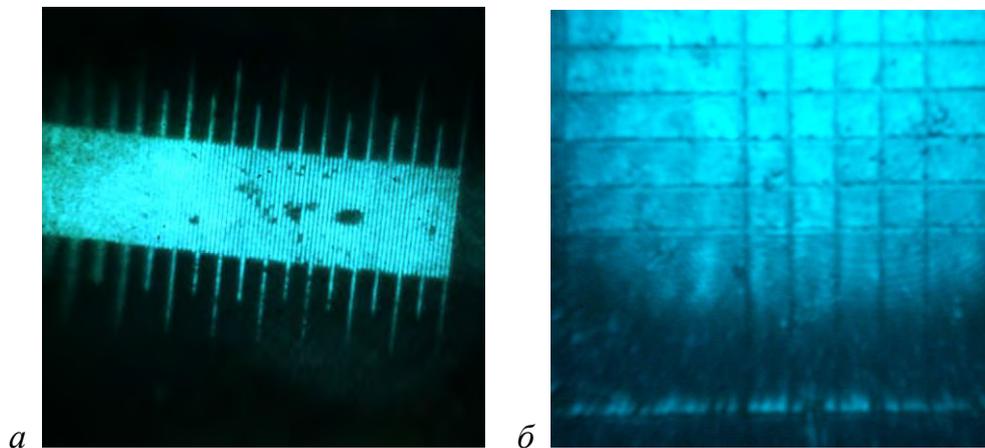


Рисунок 4.19 – Изображения калибровочной линейки (*а*) и камеры Горяева (*б*), полученные с использованием лазерного монитора

Угловое разрешение линзы с фокусным расстоянием F определяется как

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (4.1)$$

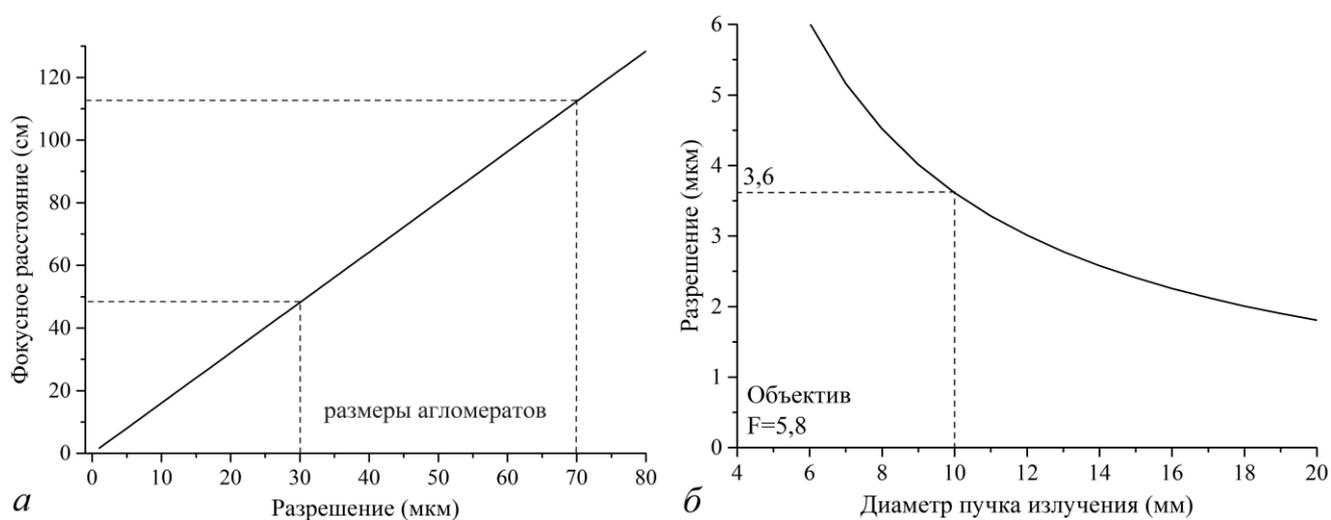
где D – апертура линзы. В лазерном мониторе изображение формируется излучением усилителя яркости, диаметр которого фактически ограничивает угловое разрешение системы. Поэтому в расчетах мы принимаем $D=d$, где d – диаметр пучка излучения, измеренный на месте установки линзы (объектива). Для ГРТ диаметром 15 мм $d \approx 10$ мм. Плоскость наиболее четкого изображения в лазерном мониторе находится вблизи фокусного расстояния, поэтому пространственное разрешение системы Δl будет определяться как

$$\Delta l = \frac{1,22\lambda F}{d} \quad (4.2)$$

При известном диаметре пучка излучения усилителя яркости фокусное расстояние, обеспечивающее требуемое пространственное разрешение системы:

$$F = \frac{\Delta l \cdot d}{1,22\lambda} \quad (4.3)$$

На рисунке 4.20 приведены зависимости фокусного расстояния системы от требуемого разрешения и разрешения системы от диаметра пучка излучения при использовании короткофокусного объектива Гелиос 44М.



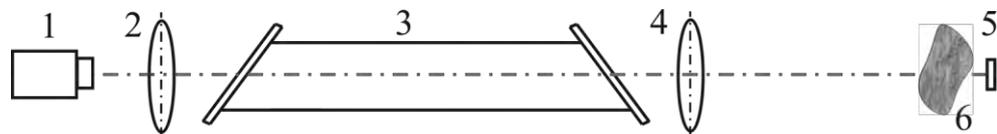
a – функция фокусного расстояния от разрешения; *b* – функция разрешения от диаметра пучка излучения для объектива с фокусным расстоянием 5,8 см (Гелиос 44М)

Рисунок 4.20 – Разрешение лазерного монитора

Согласно данным электронной микроскопии, представленным на рисунке 5.11, а также в работе [286], при горении нанопорошка алюминия образуются агломераты с линейными размерами 30–70 мкм. Следовательно, пространственное разрешение системы визуализации должно быть меньше, чем эти величины. Поэтому фокусное расстояние системы и дальность наблюдения с использованием лазерного монитора будут определяться размерами агломератов, образующихся в процессе горения. В данной работе мы ограничили дальность наблюдения 50 см для обеспечения пространственного разрешения ~30 мкм.

4.5. Лазерный монитор с увеличенной дальностью наблюдения для исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения

Традиционная схема лазерного монитора с коротким фокусным расстоянием (рисунок 4.12) имеет недостаток, вызванный необходимостью размещения объектива вблизи объекта. Такая схема не подходит для визуализации процессов, сопровождающихся разлетом продуктов сгорания, из-за риска выхода из строя объектива. Продукты сгорания, нагретые до температуры более 2000 °С, создают на поверхности объектива загрязнения, которые практически невозможно удалить без повреждения объектива. Проблема дистанционного наблюдения может быть решена путем увеличения фокусного расстояния оптического элемента, формирующего изображение, например, путем установки длиннофокусной линзы, как это схематично показано на рисунке 4.21.

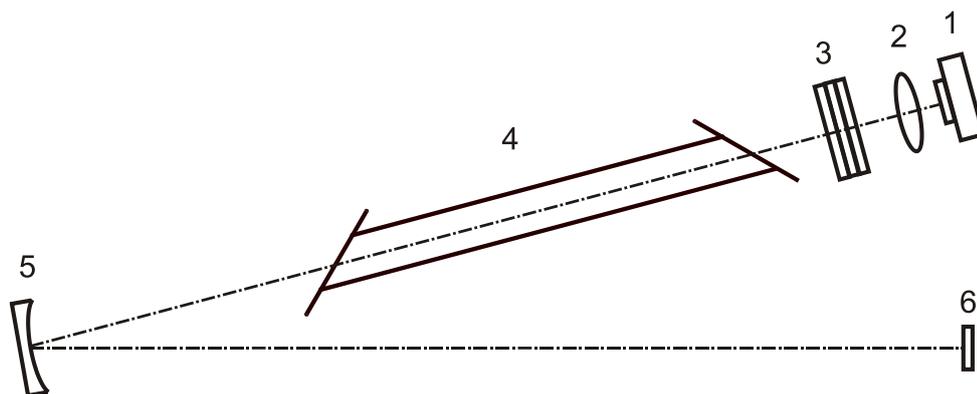


1 – камера, 2 – согласующий объектив, 3 – усилитель яркости, 4 – длиннофокусная линза, 5 – поверхность объекта наблюдения, 6 – источник фоновой засветки

Рисунок 4.21 – Схематичное изображение длиннофокусного лазерного монитора

Увеличение расстояния до объекта визуализации возможно с применением длиннофокусных линз. В отличие от линз, сферические зеркала проще в изготовлении и, кроме того, они не имеют хроматической aberrации. В работе [284] мы впервые применили вогнутые зеркала для формирования изображения объекта вместо традиционных собирающих линз или объективов. На рисунках 4.22, 4.24 показаны варианты схем лазерного проекционного микроскопа (лазерного монитора) для визуализации удаленных объектов на основе сферических зеркал. В дальнейшем мы будем называть подобные схемы зеркальными схемами формирования изображения. В схеме на рисунке 4.22 мы использовали вогнутые зеркала с радиусами кривизны 1 и 3 м, что позволяло наблюдать объекты,

удаленные на расстояние 1 и 3 м соответственно. Расстояние между выходным окном ГРТ и зеркалом составляло 1 м. ГРТ имела диаметр 5 см и длину 90 см. На рисунке 4.23 показаны изображения стальной линейки, полученные с использованием этой схемы. Поле зрения в данной схеме составляет ~ 10 мм для зеркала с радиусом кривизны $R_C = 1$ м и ~ 35 мм для зеркала с $R_C = 3$ м.



1 – камера, 2 – объектив, 3 – фильтры, 4 – усилитель яркости, 5 – вогнутое зеркало, 6 – объект

Рисунок 4.22 – Схема лазерного проекционного микроскопа с одним вогнутым зеркалом

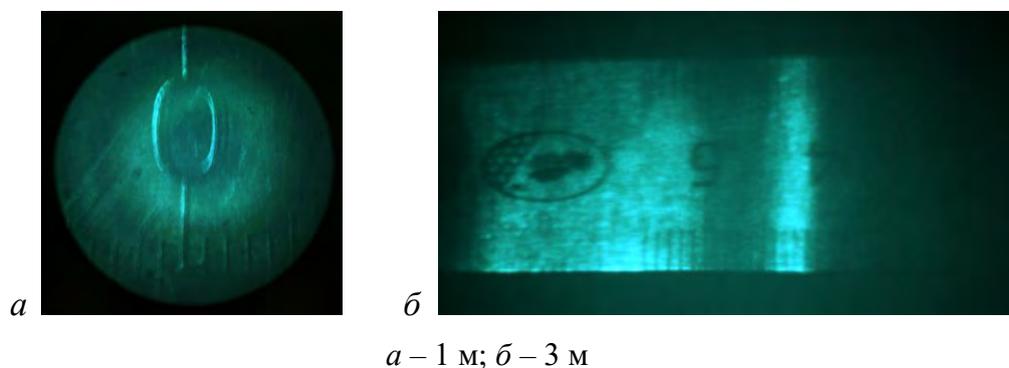
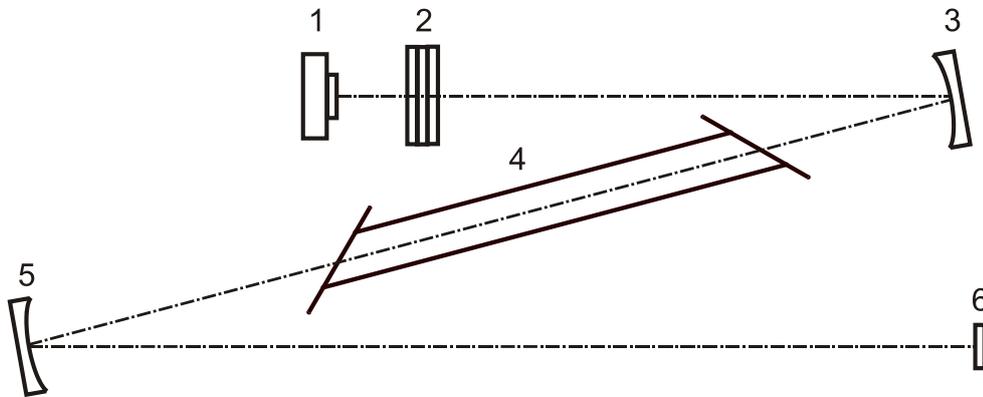


Рисунок 4.23 – Изображения, полученные с зеркалами разного радиуса кривизны

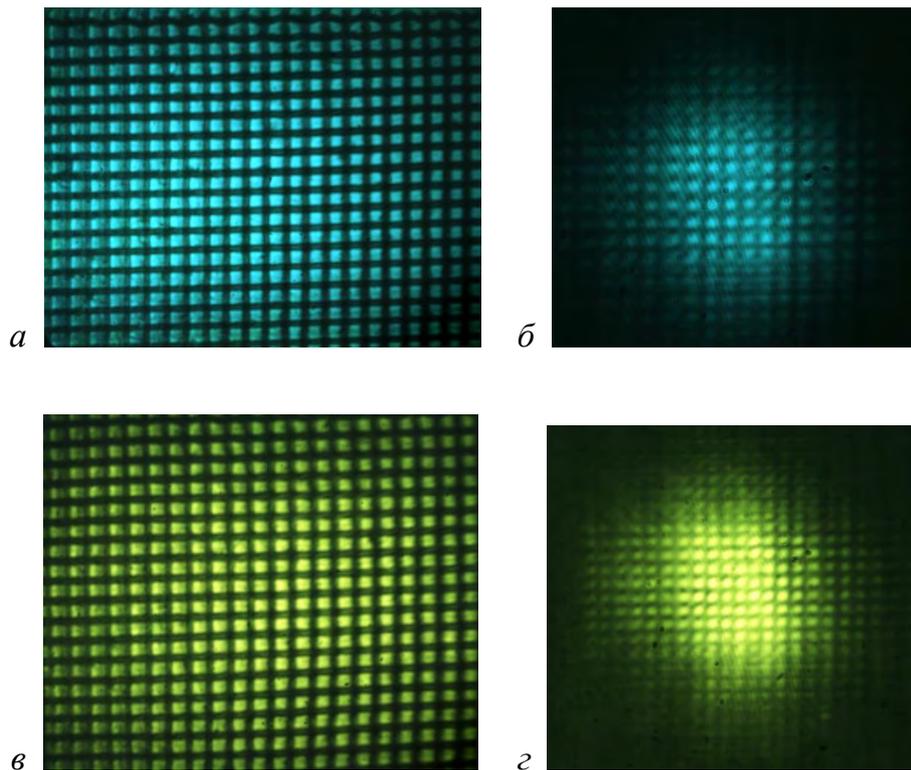
Схема лазерного монитора с двумя вогнутыми зеркалами (рисунок 4.24) позволила отдалить цифровую камеру от усилителя яркости. В некоторых случаях необходимо уменьшить электромагнитное влияние разряда на стабильность синхронизации камеры. В представленной схеме формирующее зеркало 5 имело радиус кривизны 1 и 3 м, зеркало 3 имело радиус кривизны 3 м. Расстояние между выходными окнами ГРТ и зеркалами составляло 0,3 м. Мы использовали два вогнутых зеркала с радиусами кривизны $R_C = 1$ и 3 м, что позволяло наблюдать

объекты, удаленные на расстояние 1 и 3 м, соответственно. В качестве усилителя яркости использовалась ГРТ диаметром 2,5 см и длиной 40 см.



1 – камера, 2 – фильтры, 3 и 5 – вогнутые зеркала, 4 – усилитель яркости, 6 – объект

Рисунок 4.24 – Схема лазерного проекционного микроскопа с двумя вогнутыми зеркалами



$R_C = 1$ м (а, в); $R_C = 3$ м (б, г); длина волны визуализации $\lambda = 510,6$ нм (а, б); $\lambda = 578,2$ нм (в, г)

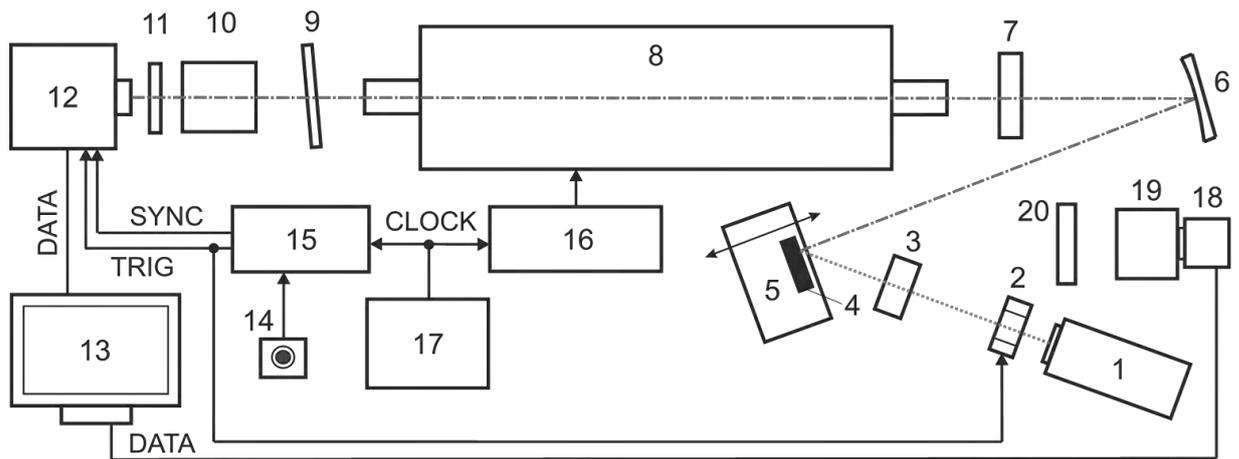
Рисунок 4.25 – Изображения металлической сетки

На рисунке 4.25 показаны результаты визуализации металлической сетки (размер 0,5 мм) с использованием схемы лазерного проекционного микроскопа на

основе двух вогнутых зеркал отдельно на длинах волн 510,6 и 578,2 нм. Представленные результаты показали возможность применения зеркальной схемы лазерного проекционного микроскопа (лазерного монитора), в которой вместо традиционных собирающих линз или объективов используются вогнутые зеркала. Схема может содержать как два, так и одно вогнутое зеркало. Показано, что поле зрения проекционной системы уменьшается с увеличением радиуса кривизны зеркала, образующего изображение (зеркало между усилителем и объектом).

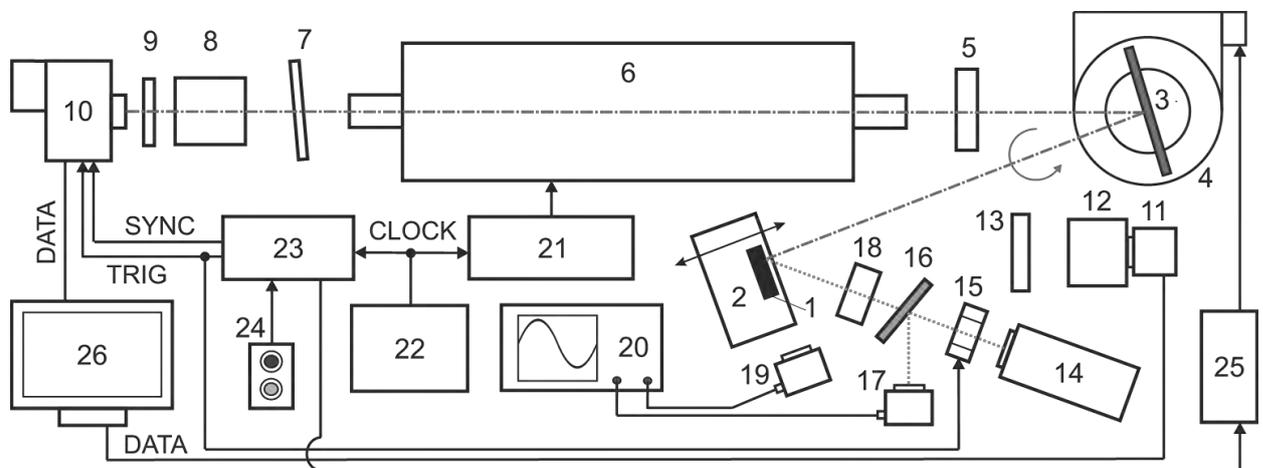
Схема лазерного монитора для дистанционного наблюдения горения высокоэнергетических материалов показана на рисунке 4.26 [288]. По сравнению с традиционной схемой, в предлагаемой схеме объектив, формирующий изображение и расположенный вблизи объекта, заменен на длиннофокусное зеркало. При использовании вогнутого зеркала с радиусом кривизны 3 м область наблюдения составляет около 3 см в диаметре. Поскольку образцы нанопорошка в данной работе имеют высоту 4 мм, между усилителем яркости и вогнутым зеркалом была установлена собирающая линза с $F=1$ м на расстоянии 10–15 см от выходного окна ГРТ и 30 см до вогнутого зеркала. Это позволило нам получить область наблюдения диаметром 6–8 мм на расстоянии 50 см от объекта до вогнутого зеркала с пространственным разрешением 25 мкм.

Общий вид процесса горения записывался USB-камерой ELP-USBFHD01M-MFV. Запись изображений лазерного монитора в схеме осуществлялась с помощью скоростной камеры с внешней синхронизацией. Видеозапись включалась внешним триггером одновременно с открытием механического затвора иницирующего лазера. Частота кадров устанавливалась равной 500–1200 кадров/с, чтобы обеспечить компромисс между разрешением изображений и временем записи. Таким образом, система позволяла регистрировать максимальную скорость процессов до 9,6 м/с (8 мм×1200 кадров/с), с временным разрешением до 0,8 мс. Потенциально, лазерный монитор с ЧСИ усилителя яркости 20 кГц обеспечивает частоту съемки до 20000 кадров/с. В этом случае скоростная камера регистрирует изображение, формируемое каждым импульсом излучения усилителя яркости.



1 – твердотельный лазер, 2 – механический затвор, 3, 7 – линзы, 4 – нанопорошок, 5 – предметный столик, 6 – вогнутое зеркало, 8 – усилитель яркости, 9, 20 – нейтральные фильтры, 10, 19 – объективы, 11 – узкополосный фильтр, 12 – скоростная камера, 13 – ПК, 14 – кнопка, 15 – схема синхронизации, 16 – высоковольтный источник накачки, 17 – генератор синхроимпульсов, 18 – USB-камера

Рисунок 4.26 – Схема лазерного монитора для дистанционного наблюдения процессов высокотемпературного горения



1 – объект исследования, 2 – линейный транслятор, 3 – вогнутое зеркало, 4 – поворотная платформа, 5, 18 – линзы, 6 – усилитель яркости, 7 – нейтральный светофильтр, 8, 12 – объектив, 9, 13 – узкополосный фильтр, 10 – скоростная цифровая камера, 11 – USB-камера, 14 – твердотельный лазер, 15 – оптический затвор, 16 – светоделительная пластина, 17, 19 – фотодиоды, 20 – осциллограф, 21 – тиратронный генератор, 22 – генератор, 23 – блок синхронизации, 24 – кнопки, 25 – контроллер, 26 – ПК

Рисунок 4.27 – Схема лазерного монитора с поворотной платформой для дистанционного наблюдения процессов высокотемпературного горения

Так как горение распространяется вдоль образца, интерес представляет перемещение области наблюдения за фронтом горения. Для решения данной задачи мы модифицировали схему дистанционного наблюдения. Ключевым усовершенствованием устройства стало расположение вогнутого зеркала на поворотной платформе с регулируемой угловой скоростью. Схема устройства представлена на рисунке 4.27 [292]. На устройство получен патент [343].

В схеме присутствовали фотодиоды, которые регистрировали момент начала инициирования (фотодиод 17), одновременно регистрируя яркость собственного свечения горящего образца (фотодиод 19). Использовались скоростные фотодиоды Thorlabs DET10A/M со временем нарастания 1 нс. Осциллографом Tektronix TDS3054C регистрировались осциллограммы импульсов излучения усилителя яркости с высоким временным разрешением. Осциллограф АКПП-4122/10 записывал огибающие сигнала фотодиодов со временем сканирования до 2 с/дел.

В экспериментальной установке использовалась поворотная платформа Zolix RAP200. Поворотная платформа приводилась в действие гибридным биполярным шаговым двигателем с шагом $1,8^\circ$ через червячную передачу с отношением 180:1. На обмотки двигателя подавалось напряжение с драйвера Yako YKC2405m. Блок синхронизации разработан на основе микроконтроллера ATMEGA328p. Управление вращением осуществляется двумя кнопками и потенциометром. При нажатии кнопки «вперед» контроллер подает импульсы на тактирующий вход PU+ и логическую единицу на вход направления DR+ (при нажатии кнопки «назад» на входе DR+ логический ноль). Скорость вращения платформы регулировалась изменением частоты подачи импульсов на тактирующий вход посредством потенциометра, подключенного к встроенному АЦП микроконтроллера. Для повышения точности регулировки скорости переключался режим микрошага драйвера двигателя, что позволяло достичь большей плавности движения. Драйвер шаговых двигателей YKC2405m поддерживает деление шага до 1/256, т.е. до 51200 шагов на оборот или до 9216000 шагов на один поворот платформы.

Эксперименты в этой схеме проводились с двумя ГРТ: диаметром 1,5 см,

длиной 50 см и диаметром 3 см, длиной 60 см. Накачка активной среды осуществлялась тиратронным генератором импульсов с частотой 20 кГц. В экспериментах использовалась скоростная камера Phantom Miro C110. Тестирование работы сканирующего лазерного монитора осуществлялось с использованием стальной линейки с нанесенными делениями. На рисунке 4.28 показаны кадры формирования изображения процесса вращения платформы со скоростью 0,16 °/с под углом 1,15°. Поскольку угол падения луча на линейку незначительно меняется в процессе поворота платформы, яркость изображений также меняется. В случае нормального падения излучения, сфокусированного зеркалом 3 (рисунок 4.27), изображение линейки имеет наибольшую яркость (рисунок 4.28, в). Когда платформа вращается, яркость изображения уменьшается. Однако структура поверхности имеет высокий контраст при перемещении зоны наблюдения в диапазоне ~2 см.

Используя продукты сгорания нанопорошка алюминия в качестве тестового объекта, мы оценили глубину резкости как расстояние по оптической оси линзы между плоскостями объектов, внутри которых объекты выглядят субъективно четкими [344]. Глубину резкости определяли путем перемещения объекта вдоль оптической оси системы с помощью линейного транслятора 2 на рисунке 4.27. На рисунке 4.29 показаны изображения объекта на разных расстояниях от нулевой позиции, соответствующей субъективно четкому изображению. Нулевое положение соответствовало расстоянию 50 см от фокусного зеркала. При расстояниях ± 4 см изображения размываются, в то время как при расстояниях ± 2 см остаются четкими, что свидетельствует о возможности работы предложенной дистанционной схемы с достаточно большой глубиной резкости. Это имеет принципиальное значение при исследовании поверхности горящих нанопорошков металлов, т.к. она существенно деформируется при горении.

Применение схемы сканирования с поворотной платформой имеет преимущество в том, что образец нанопорошка остается неподвижным на предметном столике и на него не воздействуют вибрации от движения шагового

двигателя и платформы в процессе сканирования. Кроме того, за счет поворота обеспечивается достаточно большая скорость сканирования (25 град/с, или 22 см/с, в рассмотренной выше конфигурации оптической схемы). При достаточно плотной формовке образца вибрации практического влияния оказывать не будут, поэтому можно осуществлять линейное сканирование с использованием линейного транслятора. Например, линейный транслятор Standa 8MT30-50 имеет перемещение 50 мм, разрешение 1,25 мкм, скорость хода до 2,5 мм/с, что подходит для исследования смесей с небольшой скоростью горения.

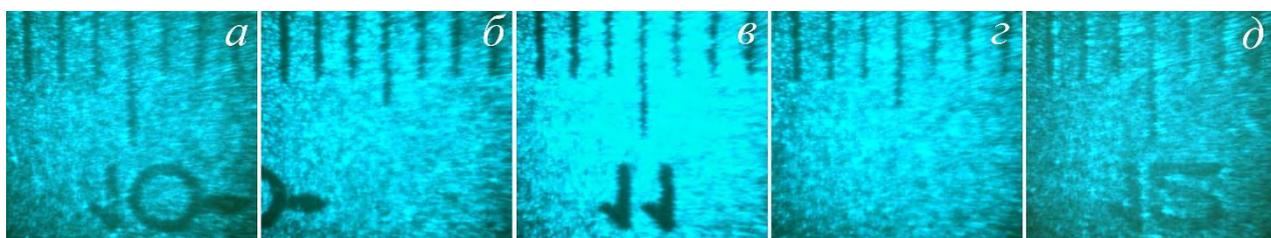


Рисунок 4.28 – Изображение металлической линейки с использованием лазерного монитора с поворотной проекционной системой

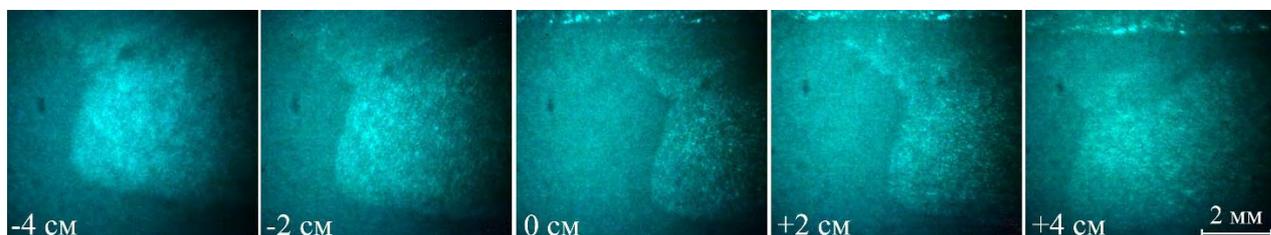
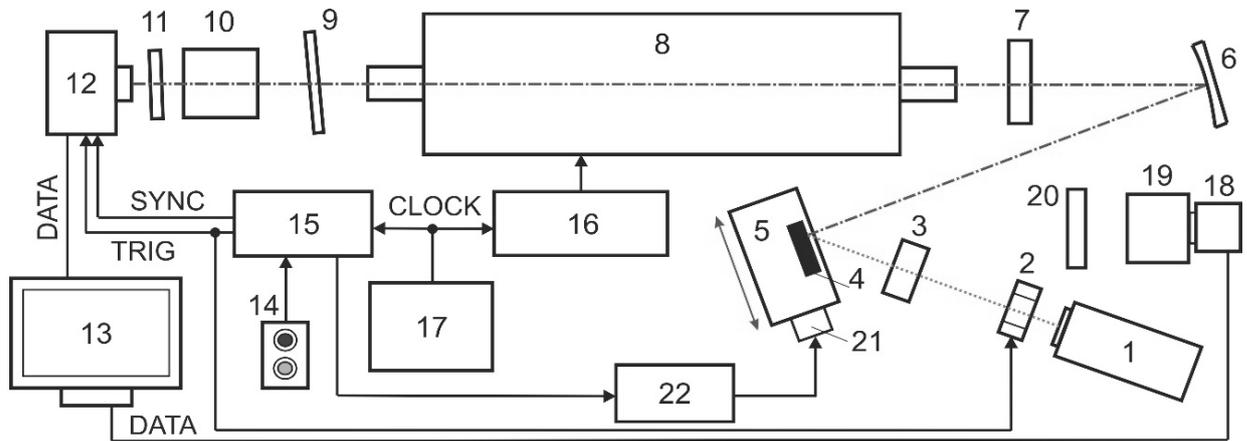


Рисунок 4.29 – Изображение объекта на разных расстояниях от нулевой позиции

На рисунке 4.30 приведена схема с линейным транслятором 8MT30-50, оснащенный контроллером шагового двигателя и программным обеспечением, которое позволяет управлять транслятором с персонального компьютера. Недостатком системы является невозможность внешнего управления контроллером в соответствии с требуемыми задачами синхронизации. В связи с этим использовалась схема управления, разработанная для поворотной платформы Zolix RAP200. Программным управлением достигалась требуемая скорость движения линейного транслятора. На рисунке 4.31 приведены графики скорости движения платформы, закрепленной на линейном трансляторе, для случаев, когда

шаговый двигатель управлялся штатным и разработанным нами контроллерами. Задавались режимы работы: с рекомендуемой скоростью 2,5 мм/с, а также режимы с максимальной скоростью, реализуемые при использовании штатного и разработанного контроллеров.



1 – твердотельный лазер, 2 – оптический затвор, 3, 7 – линзы, 4 – нанопорошок, 5 – предметный столик, 6 – вогнутое зеркало, 8 – усилитель яркости, 9, 20 – нейтральные фильтры, 10, 19 – объективы, 11 – узкополосный фильтр, 12 – скоростная камера, 13 – ПК, 14 – кнопки, 15 – схема синхронизации, 16 – высоковольтный источник накачки, 17 – генератор синхроимпульсов, 18 – USB-камера, 21 – шаговый двигатель, 22 – контроллер

Рисунок 4.30 – Схема лазерного монитора с линейным транслятором

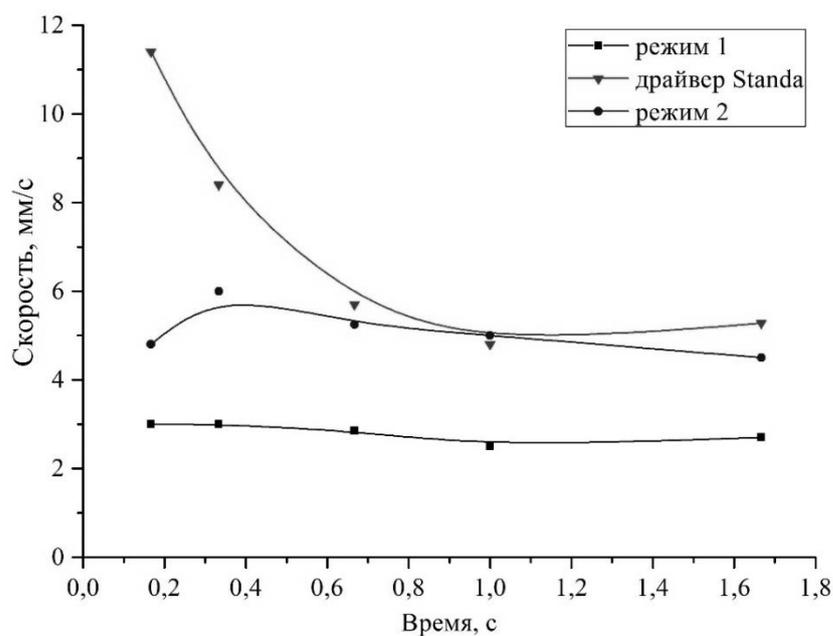


Рисунок 4.31 – Графики скорости движения линейного транслятора

На рисунке 4.32 приведены изображения металлической линейки с использованием лазерного монитора с линейной и поворотной сканирующими проекционными системами. Использовался усилитель яркости с внутренним диаметром активной области 3 см и длиной 60 см. Полученные изображения показывают, что в пределах 2 см, типичной длины образца, поворотная и линейная сканирующие системы дают визуально одинаковые изображения.

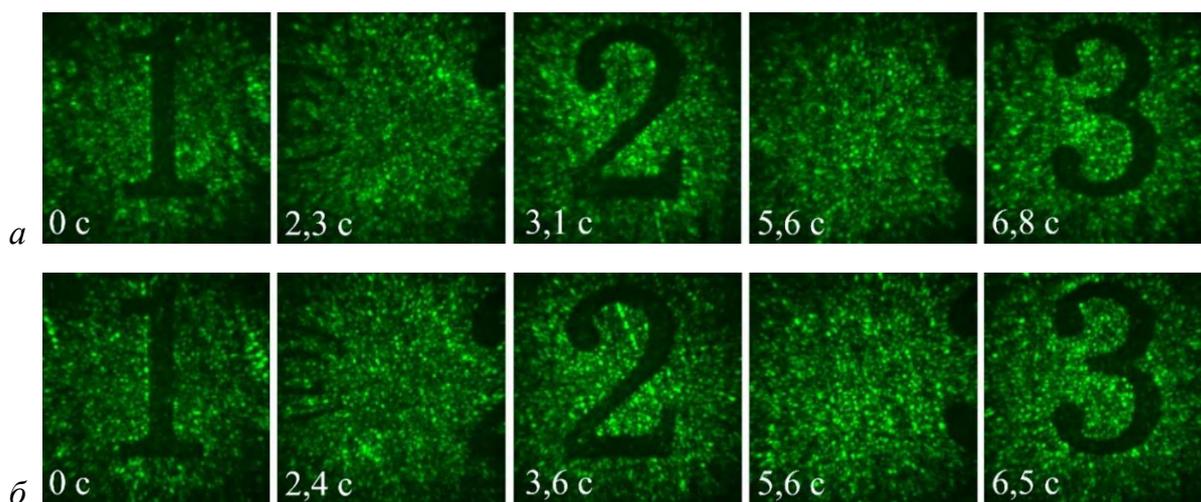


Рисунок 4.32 – Изображение металлической линейки с использованием лазерного монитора с линейным транслятором (а) и поворотной платформой (б)

4.6. Получение количественных характеристик процесса горения с использованием лазерного монитора

Принцип действия лазерного монитора (традиционная моностабильная схема) заключается в освещении объекта наблюдения узкополосным сверхизлучением усилителя яркости с последующим узкополосным усилением излучения, отраженного от объекта, той же активной средой. Таким образом, интенсивность выходного сигнала усилителя яркости, т.е. яркость изображений, регистрируемых скоростной камерой, коррелирует с интенсивностью света, отраженного от объекта наблюдения. В случае горения нанопорошков металлов святающийся над поверхностью горящего образца плазменный слой является прозрачным для излучения усилителя яркости, и фактически яркость изображений лазерного

монитора коррелирует с коэффициентом отражения поверхности объекта исследования. Следовательно, цифровая обработка видео изображений, полученных с помощью лазерного монитора, дает возможность анализировать изменения оптических свойств образцов при сгорании, т.е. получать с помощью лазерного монитора не только качественную, но и количественную информацию о структурных изменениях поверхности. На рисунке 4.33 приведена характерная кривая яркости изображений лазерного монитора, демонстрирующая возможности количественной оценки процесса горения нанопорошка металла, в частности нанопорошка алюминия. Значения интенсивности изображений рассчитывались с использованием программного продукта Matlab. На диаграмме выделены затемнением временные интервалы, соответствующие прохождению первой и второй волн горения через область наблюдения.

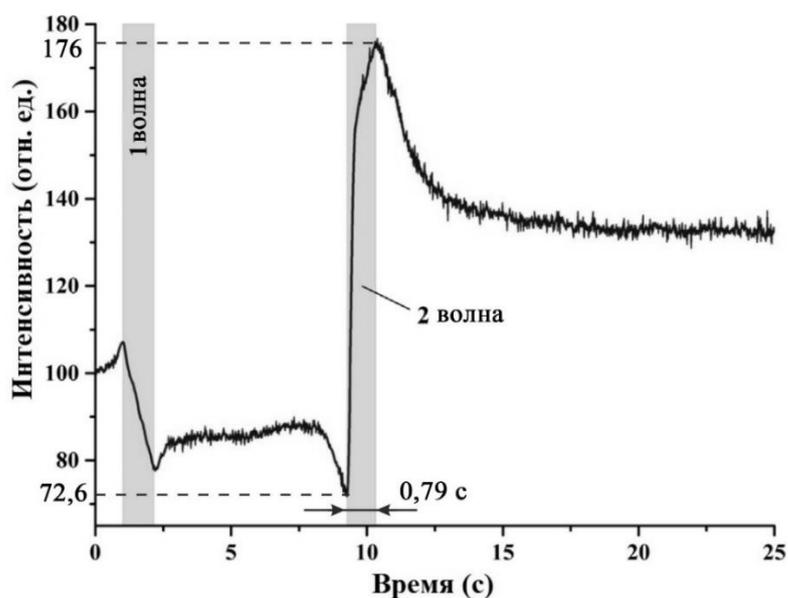


Рисунок 4.33 – Временная зависимость яркости изображений лазерного монитора при сгорании нанопорошка алюминия в воздухе

Согласно записанной последовательности изображений, первая волна горения прошла область, наблюдаемую лазерным монитором, в интервале времени между 1,0 и 2,1 с. Экстремум зависимости через ~10 с вызван второй высокотемпературной волной горения. После того, как вторая волна горения прошла область наблюдения, интенсивность изображений уменьшается. Эта стадия

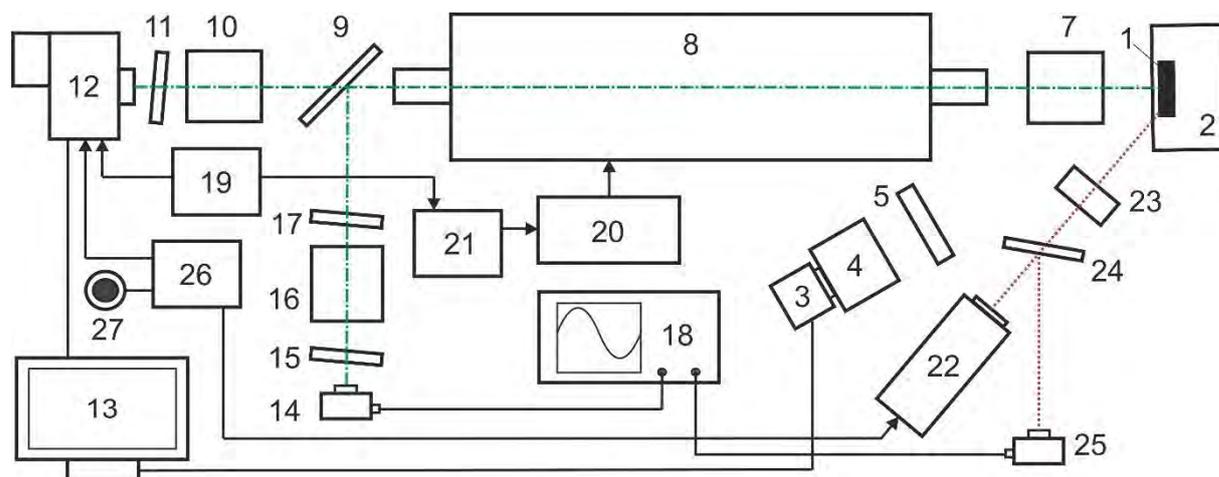
соответствует стадии охлаждения образца. В течение этого временного интервала на диаграмме наблюдается снижение интенсивности сигнала лазерного монитора примерно на 20 %. Экспоненциальное уменьшение интенсивности выходного сигнала лазерного монитора, соответствующее уменьшению коэффициента отражения поверхности образца, свидетельствует о том, что процессы кристаллизации происходят на этой стадии. Сравнивая интенсивности сигнала лазерного монитора в начале и в конце процесса горения, мы пришли к выводу, что коэффициент отражения продуктов сгорания увеличился примерно на 30 % по сравнению с исходными реагентами. Максимальное изменение коэффициента отражения поверхности горящего образца нанопорошка, определенное на основании яркости изображений лазерного монитора, составило до 2,5 раз при скорости нарастания до 180 %/с. Таким образом, средняя яркость изображений может использоваться как характеристический параметр при исследовании процессов горения нанопорошков.

Одной из практических задач визуализации горения высокоэнергетических материалов является получение информации об объекте исследования непосредственно во время протекания процесса или сразу по окончании процесса. Традиционный лазерный монитор обеспечивает скоростную видеозапись процесса в режиме реального времени, при котором скорость записи цифровой камеры соответствует скорости процесса горения. Существенным недостатком современных скоростных камеры является запись изображений в собственную встроенную память, поэтому в процессе видеозаписи получить изображения для обработки не представляется возможным. Таким образом, рассчитать значения средней яркости изображений лазерного монитора возможно только после переноса изображений из встроенной памяти скоростной камеры в персональный компьютер. Существуют видеокамеры, которые позволяют получать отдельные кадры в процессе съемки. Такие камеры в совокупности с мощным вычислительным устройством позволяют обрабатывать изображения в режиме реального времени, однако скорость их работы ограничивается 60 кадрами в секунду. Для исследования

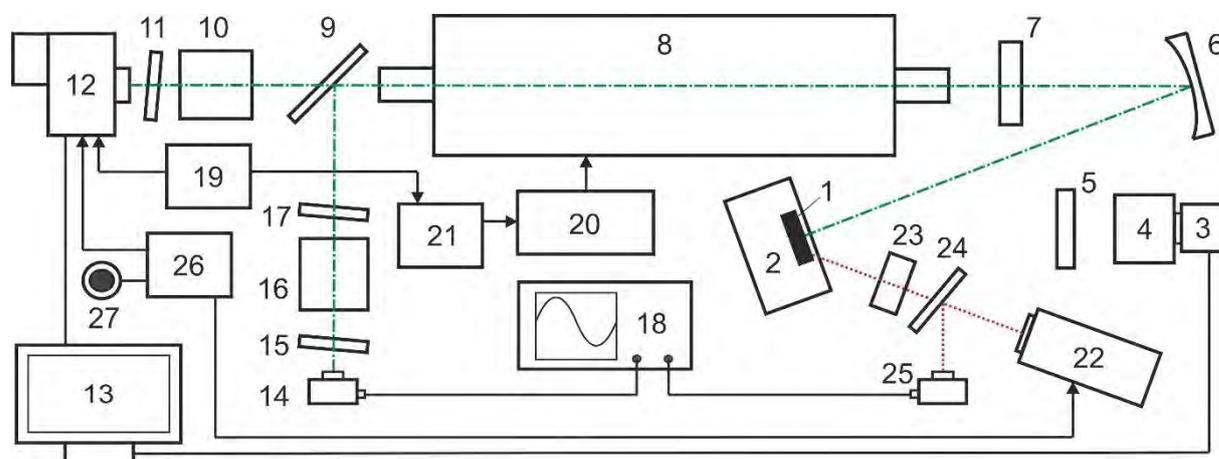
процессов горения такие системы не подходят.

В связи с этим нами предлагается способ аппаратной оценки изменения коэффициента отражения поверхности на основе быстродействующего фотодиода и осциллографа [293, 303, 345–347]. На рисунке 4.34 приведены улучшенные схемы лазерных мониторов с применением скоростных фотодиодов Thorlabs DET10A/M. В лазерном мониторе на рисунке 4.34, *а* объект наблюдения освещался усиленным спонтанным излучением усилителя яркости через объектив с фокусным расстоянием 80 мм, который обеспечивал область наблюдения диаметром $\sim 0,7$ мм. Формируемое отраженным от объекта излучением и усиленное усилителем яркости изображение проецировалось на скоростную камеру (Phantom Miro C110) объективом через нейтральный светофильтр и полосовой фильтр с полосой пропускания 510 ± 5 нм. Изображения, зарегистрированные скоростной камерой, передавались в компьютер для хранения и анализа. Часть излучения, отраженного от расположенного под углом 45° фильтра, проецировалась на фотодиод (Thorlabs DET10A/M) с помощью объектива через светофильтр и диффузор. Сигнал с фотодиода подавался на осциллограф (АКИП-4122/10). Такое решение позволило получать информацию о поверхности объекта в процессе горения сразу, не применяя последующую цифровую обработку изображений, записанных скоростной камерой.

Лазерный монитор на рисунке 4.34, *б* представляет собой оптическую систему на основе вогнутого зеркала и согласующей линзы для дистанционного наблюдения горения нанопорошков металлов. Назначение элементов и принцип работы схемы аналогичен схеме на рисунке 4.34, *а*, за исключением части схемы, формирующей изображение объекта. Оптическая схема обеспечивает область наблюдения диаметром от 3,5 до 8 мм на расстоянии 0,5 м от зеркала. Для записи процесса горения нанопорошка в собственном свете использовали USB-камеру (ELP-U8BFHD01M-MFV) с макрообъективом (Canon Macro Lens EF 100 mm).



а



б

1 – образец нанопорошка, 2 – предметный столик, 3 – USB-камера, 4 – объектив, 5 – полосовой светофильтр, 6 – вогнутое зеркало, 7 – объектив (а) или линза (б), 8 – усилитель яркости, 9 – нейтральный светофильтр, 10 – объектив, 11 – фильтр на длину волны 510 нм, 12 – скоростная камера, 13 – ПК, 14 – фотодиод, 15 – диффузор, 16 – объектив, 17 – нейтральный светофильтр, 18 – осциллограф, 19 – генератор импульсов, 20 – высоковольтный источник накачки, 21 – оптический преобразователь, 22 – диодный иницирующий лазер, 23 – линза, 24 – светоделительная пластина, 25 – фотодиод, 26 – ждущий мультивибратор, 27 – кнопка

Рисунок 4.34 – Лазерные мониторы с традиционной (а) и зеркальной (б) схемами построения изображений

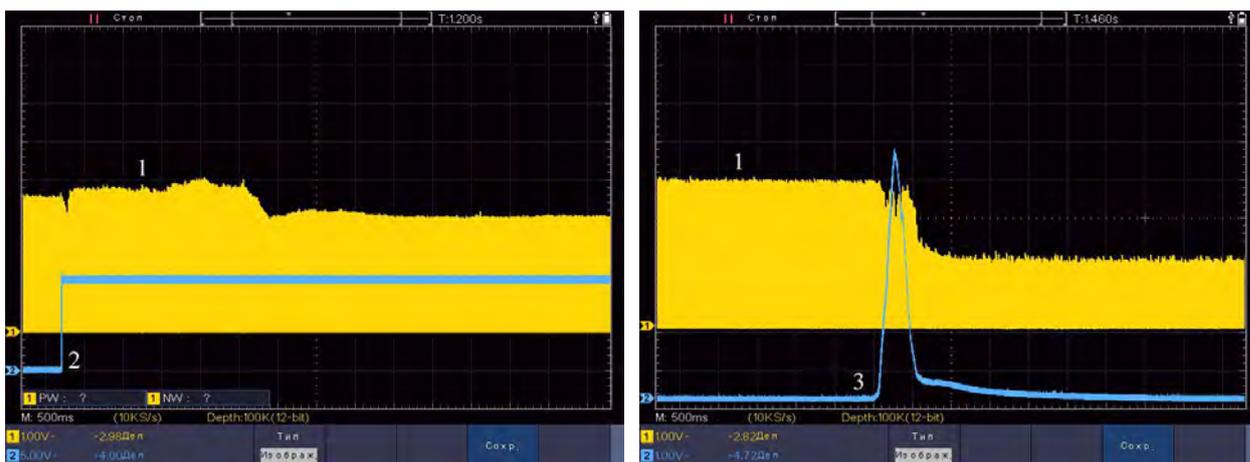
Инициирование горения осуществлялось диодным лазером с длиной волны 660 нм, мощностью генерации в непрерывном режиме 2 Вт и внешней синхронизацией. Часть излучения отводилась кварцевой пластиной для

регистрации момента начала инициирования фотодиодом. Длительность импульса инициирующего лазера задавалась внешним ждущим мультивибратором и составляла 0,3 с. Формирование синхроимпульса запускалось оператором путем нажатия кнопки. Синхроимпульс подавался одновременно на вход синхронизации лазера и на вход начала записи скоростной камеры. Таким образом, инициирование горения и запись данных на скоростной камере начинались одновременно.

Режим работы усилителя яркости оптимизировали по концентрации паров рабочего вещества и мощности накачки, с целью обеспечения наиболее равномерного профиля усиления и малой мощности излучения, падающей на поверхность объекта наблюдения. В экспериментах значение средней мощности составляло 22 мВт для ГРТ диаметром 3 см и 14 мВт для ГРТ диаметром 1,5 см, что не приводило к неконтролируемому инициированию процесса горения.

Характерные сигналы фотодиодов для экспериментов со смесью $\text{nanoAl-Fe}_2\text{O}_3$, полученные с использованием фотодиода, показаны на рисунке 4.35 [293]. Сигнал фотодиода изменяется в процессе горения из-за изменения отражательной способности поверхности. Рост сигнала усилителя яркости (кривая 1) соответствует увеличению отражения от поверхности; снижение соответствует уменьшению отражения. Таким образом, можно качественно и количественно дифференцировать различные смеси уже на стадии горения, сравнивая интенсивность сигнала усилителя яркости. В дальнейшем сигнал может быть отфильтрован от постоянной компоненты и нормализован для детального анализа.

В дополнение к регистрации средней яркости изображений лазерного монитора численной характеристикой процесса горения является яркость свечения горящего образца. На рисунке 4.36 показана установка, в которой скоростным фотодиодом Thorlabs DET10A/M регистрируется собственное свечение образца. Кривая 3 на рисунке 4.35, б соответствует сигналу фотодиода, расположенного над образцом. В работе [293] нами применялась традиционная схема лазерного монитора, в которой объект располагался на расстоянии 8 см от объектива, формирующего изображение, и 23 см от выходного окна усилителя яркости.



а

б

а – нанопорошок Al; б – смесь наноAl-Fe₂O₃; 1 – излучение усилителя яркости (фотодиод 14 на рисунке 4.34); 2 – инициирующее излучение (фотодиод 25 на рисунке 4.34); 3 – полная яркость горящего образца

Рисунок 4.35 – Осциллограммы сигналов фотодиодов



1 – инициирующий лазер, 2 – механический затвор, 3 – линза, 4 – образец, 5 – фотодиод, 6 – объектив, 7 – осциллограф, 8 – усилитель яркости

Рисунок 4.36 – Схема одновременной регистрации яркости собственного свечения образца фотодиодом и изображений поверхности лазерным монитором

В схеме на рисунке 4.34, б (дистанционная схема) объект располагался на расстоянии 50 см от фокусирующего зеркала и 92 см от выходного окна усилителя яркости. Соответственно, интенсивность отраженного от объекта света, вернувшегося в усилитель яркости, в дистанционной схеме существенно меньше,

чем в короткофокусной схеме, что может стать причиной значительной погрешности при проведении количественного анализа выходного излучения усилителя яркости.

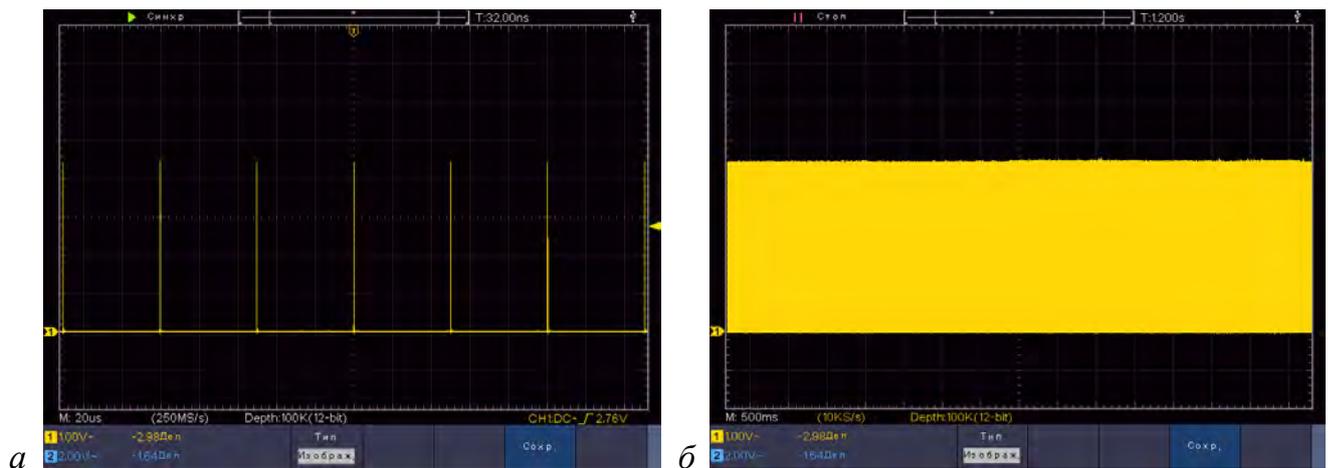
Для оценки погрешности, вносимой усилителем яркости в измерения средней яркости изображений, в схеме на рисунке 4.34, б регистрировался сигнал фотодиода, соответствующий яркости изображений статического объекта – алюминиевой пластины, установленной в плоскости наиболее четкого изображения лазерного монитора. На рисунке 4.37 приведены осциллограммы сигнала фотодиода для этого случая, которые отражают, что изменение излучения, регистрируемого фотодиодом, соответствующее яркости изображений усилителя яркости, составляет 2,2 %.

На рисунке 4.38 приведены осциллограммы сигналов, регистрируемых фотодиодом при исследовании горящих образцов порошков наноAl и смеси $\text{наноAl}+\text{наноFe}$. Очевидно, что изменение сигнала при исследовании поверхности нанопорошков многократно превышает изменение сигнала при наблюдении статического объекта. Таким образом, сигнал фотодиода используется нами как информативный параметр при исследовании процесса горения. Наблюдение осциллограмм на экране осциллографа позволяет анализировать поверхность порошков в реальном времени без последующей обработки изображений.

Возможность получения не только визуальной, но и количественной информации об объекте исследования является важной характеристикой системы диагностики. В данной работе продемонстрирована возможность количественной оценки процесса горения металлических нанопорошков с использованием в качестве информативного параметра средней яркости изображений лазерного монитора. В ходе дальнейшей работы функциональные возможности лазерного мониторинга были расширены за счет использования метода цифровой корреляции изображений лазерного монитора для получения дополнительной количественной информации о процессе горения нанопорошков металлов [301].

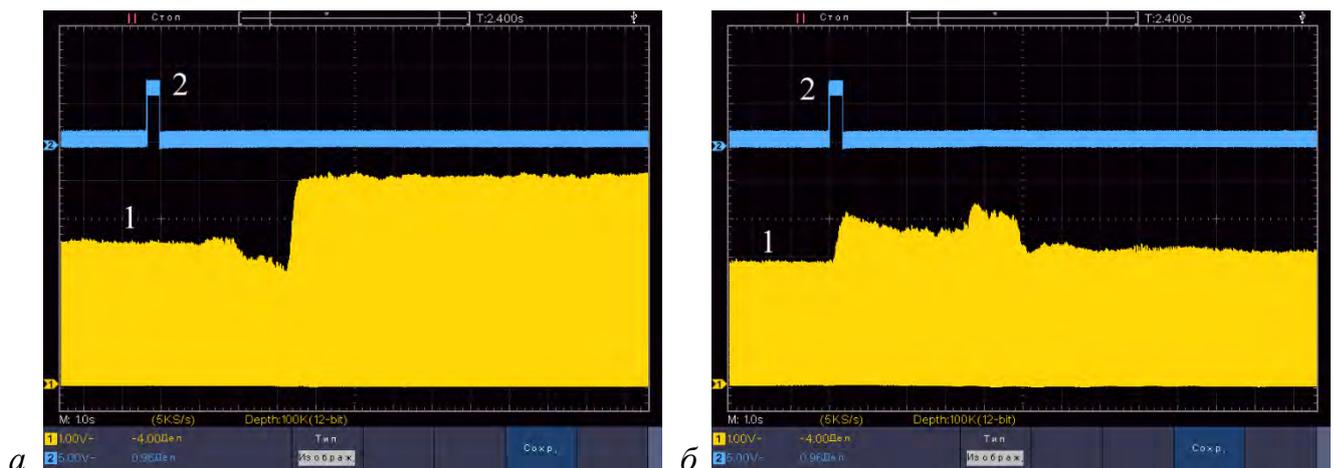
Изображения поверхности нанопорошка алюминия, полученные с помощью лазерного монитора, сохраняются в виде последовательности графических файлов.

При скорости съемки 800 кадров/с время между кадрами составляет 1,25 мс. Изображения на лазерном мониторе являются монохромными, так как формирование изображения происходит на длине волны, генерируемой усилителем яркости 510,6 нм. Таким образом, они преобразуются в оцифрованные изображения в оттенках серого без потери информации и могут быть проанализированы как двумерные массивы.



a – развертка осциллографа 20 мкс/дел.; *б* – 500 мс/дел.

Рисунок 4.37 – Осциллограммы сигнала фотодиода в схеме на рисунке 4.34, *б* при установке неподвижной алюминиевой пластины в качестве объекта исследования



Горение nanoAl инициировалось с края образца, горение смеси nanoAl+nanoFe инициировалось в центре. Визуализация с помощью лазерного монитора велась в центре в обоих случаях

Рисунок 4.38– Осциллограммы сигнала фотодиода в схеме на рисунке 4.34, *б* при исследовании образцов порошков nanoAl (*a*) и смеси nanoAl+nanoFe (*б*)

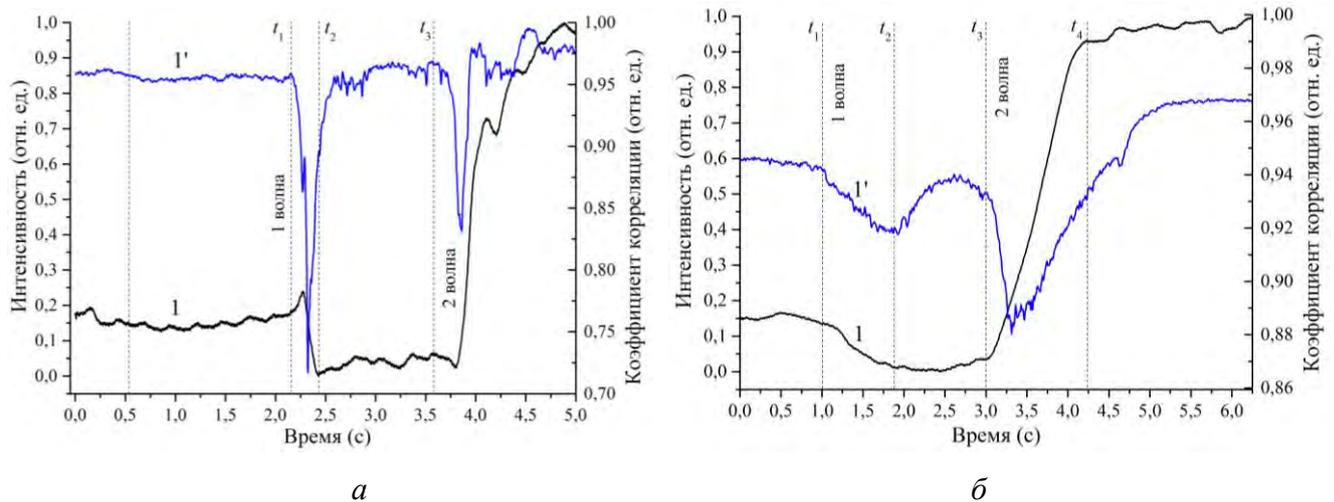
Схожесть двух изображений определялась с использованием корреляционной формулы:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \cdot [g(x_i, y_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ([f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2) \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ([g(x_i, y_j) - \bar{g}]^2)}}, \quad (4.4)$$

где \bar{f} – средняя интенсивность предыдущего изображения; $f(x_i, y_j)$ – интенсивность пикселей предыдущего изображения в точке $x_i y_j$; \bar{g} – средняя интенсивность текущего изображения; $g(x_i, y_j)$ – интенсивность пикселей текущего изображения в точке $x_i y_j$.

Для оценки изменения структуры поверхности зоны наблюдения в процессе горения рассчитывался коэффициент корреляции двух соседних изображений лазерного монитора. Предыдущее изображение служило референтным для последующего. Чем быстрее изменяется поверхность и чем значительнее эти изменения, тем меньшее значение коэффициента корреляции будет между соседними изображениями лазерного монитора.

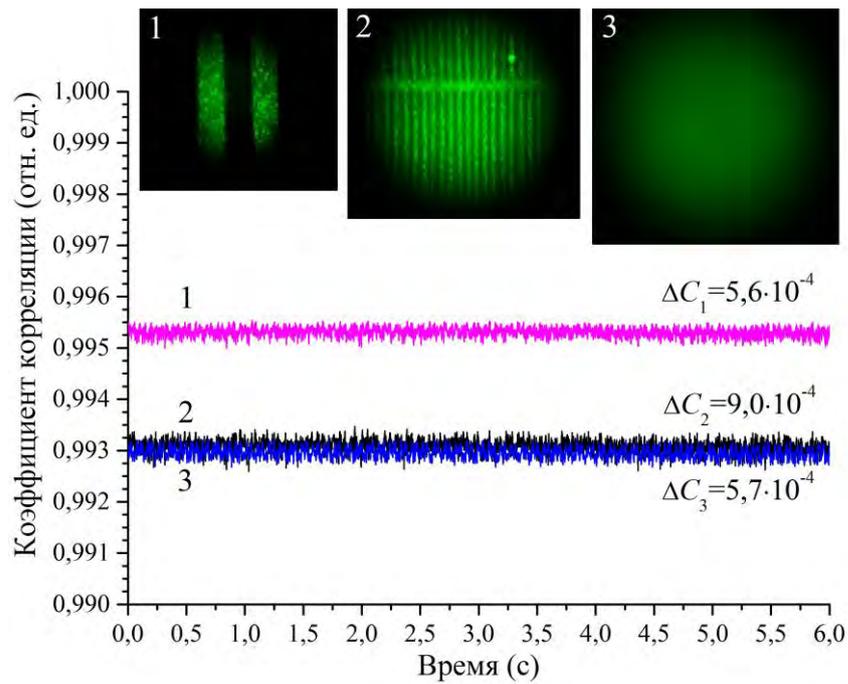
Средняя яркость изображений рассчитывалась путем усреднения яркости пикселей изображения. После расчета средней яркости всех изображений видеопоследовательности минимальное значение средней яркости вычиталось из всех значений. Затем кривая нормализовалась. Эти действия проводились с целью визуализации изменения интенсивности изображения лазерного монитора, следовательно, и коэффициента отражения поверхности исследуемого образца. На рисунке 4.39 показаны графики средней яркости изображения и коэффициента корреляции для образцов nanoAl, полученные для традиционной и зеркальной схем лазерного монитора. Как следует из графиков, изменение коэффициента корреляции в целом соответствует изменению яркости изображений. Стадии горения, обозначенные кривыми коэффициента корреляции, соответствуют стадиям, обозначенным кривыми средней яркости.



t_1 – начало первой волны горения в зоне наблюдения; t_2 – окончание первой волны горения; t_3 – начало второй волны горения; t_4 – окончание второй волны горения

Рисунок 4.39 – Средняя интенсивность (1) и коэффициент корреляции (1') изображений поверхности образцов нанопорошка алюминия при наблюдении с использованием лазерного монитора на рисунках 4.34, а (а) и 4.34, б (б)

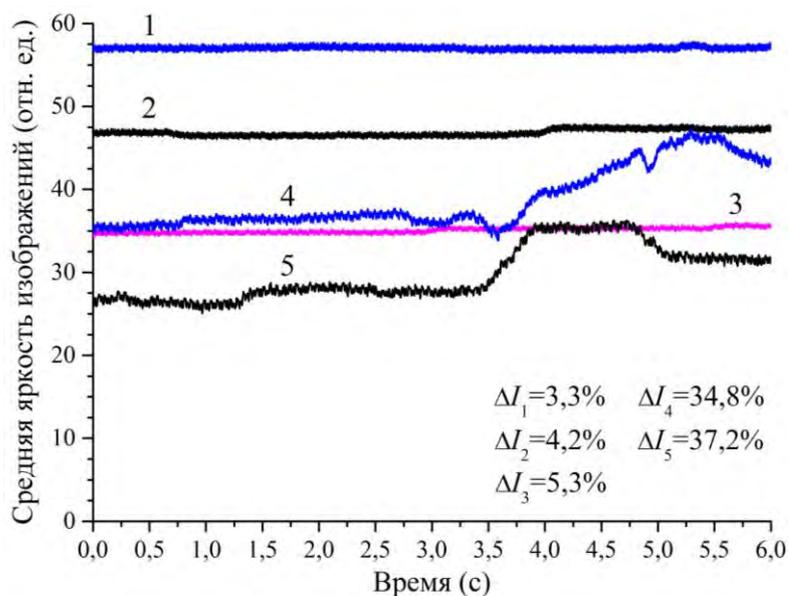
Достоверность результатов, полученных при анализе средней яркости и коэффициента корреляции изображений лазерного монитора, зависит от стабильности работы усилителя яркости. В статьях [57, 126, 348] отмечается, что нестабильность работы активного элемента и колебания усиливающей среды приводят к геометрическому искажению изображений лазерного монитора и колебаниям яркости изображений. Причинами нестабильности могут быть колебания температурного режима ГРТ и контейнеров с бромидом меди, а также нестабильность работы источника высоковольтных импульсов накачки. Режим работы усилителя яркости в данной работе оптимизировался с целью получения наиболее равномерного профиля излучения и наименьших флуктуаций выходной мощности. После оптимизации записывались последовательности изображений тестового объекта (неподвижной медной сетки) для обеих схем лазерного монитора, а также свержизлучение усилителя яркости. Для этих последовательностей рассчитывались коэффициенты корреляции изображений и средняя яркость аналогично тому, как это делалось для реальных объектов – nanoAl и смеси nanoAl - nanoFe . Результаты расчетов приведены на рисунках 4.40 и 4.41.



- 1 – изображение медной сетки с использованием лазерного монитора на рисунке 4.34, а;
 2 – изображение медной сетки с использованием лазерного монитора на рисунке 4.34, б;
 3 – сверхизлучение (без объекта). ΔC – разница между максимальным и минимальным значениями коэффициента корреляции

Рисунок 4.40 – Временные зависимости коэффициента корреляции изображений лазерного монитора для тестового объекта

Согласно представленным данным (рисунок 4.40), флуктуации коэффициента корреляции изображений лазерного монитора, вызванные нестабильностью работы усилителя яркости, составляют меньше 0,001. Диапазон изменения коэффициента корреляции при исследовании горения нанопорошка алюминия составляет более 0,05. Таким образом, коэффициент корреляции изображений лазерного монитора применим в качестве параметра, характеризующего изменение поверхности образца. Диапазон его изменения дает возможность качественной оценки динамики изменения поверхности во время горения. Колебания средней яркости изображений лазерного монитора (рисунок 4.41), вызванные нестабильностью работы усилителя яркости, составляют 3,3–5,3 % относительно среднего значения, что значительно меньше по сравнению с изменением средней яркости изображений реального объекта исследования (до 37 %).



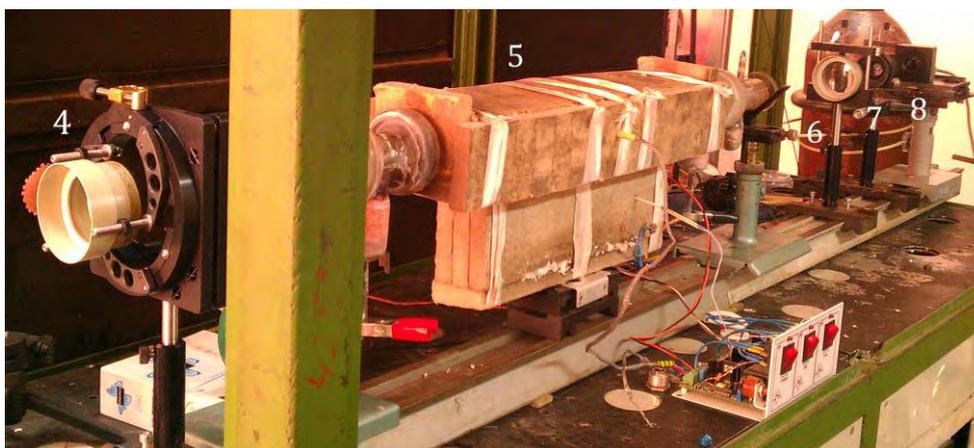
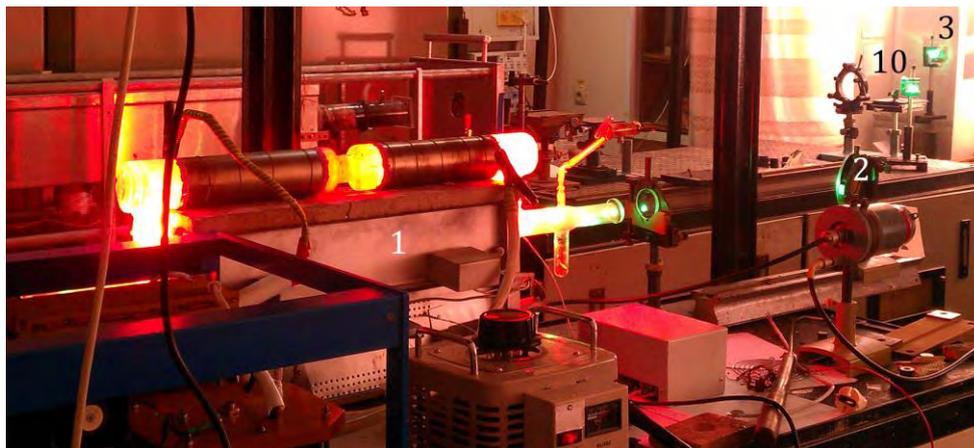
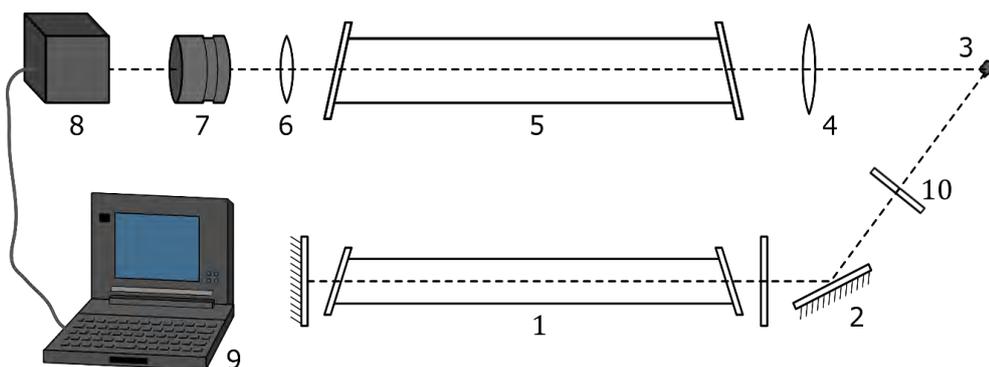
1 – медная сетка (схема на рисунке 4.34, а); 2 – медная сетка (схема на рисунке 4.34, б); 3 – сверхизлучение; 4 – образец наноAl-наноFe (схема на рисунке 4.34, а); 5 – образец наноAl-наноFe (схема на рисунке 4.34, б); ΔI – разница между максимальным и минимальным значениями средней яркости изображений

Рисунок 4.41 – Средняя яркость изображений лазерного монитора

4.7. Лазерный монитор с независимой подсветкой

Синхронизованная работа двух активных элементов позволяет реализовать лазерный монитор с расширенными функциями. Одной из таких функций является независимая подсветка объекта излучением. На наш взгляд, лазерный монитор с независимой подсветкой (бистатический лазерный монитор) является перспективным инструментом для исследования нанопорошков металлов, которые поглощают практически весь падающий свет и легко воспламеняются.

На рисунке 4.42 представлен прототип схемы бистатического лазерного монитора, который обсуждался в работах [329, 330]. В качестве генератора использовался лазер на парах бромида меди 1 с емкостной накачкой со средней мощностью генерации 0,58 Вт (0,27 Вт на длине волны 510,6 нм и 0,31 Вт на длине волны 578,2 нм) и диаметром пучка 14 мм. С помощью поворотного зеркала 2 луч направлялся на объект исследования 3. Отражённый от объекта свет с помощью линзы 4 с фокусным расстоянием 100 см направлялся в усилитель яркости 5.



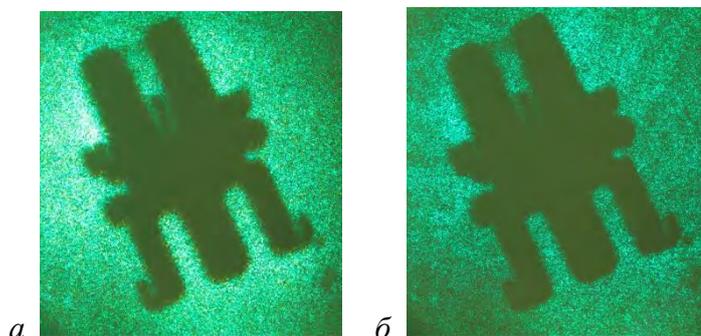
1 – лазер подсветки, 2 – поворотное зеркало, 3 – объект исследования, 4, 6 – линзы, 5 – усилитель яркости, 7 – объектив, 8 – цифровая камера, 9 – ПК

Рисунок 4.42 – Схема и фотографии бистатического лазерного монитора [329, 330]

Расстояние от объекта до линзы 4 составляло 265 см. Расстояние от линзы 4 до усилителя яркости 5 составляло 15 см, а длина самой ГРТ усилителя яркости – 95 см. Для фокусирования полученного пучка на матрице цифровой камеры (Fastec HiSpec 1) применялась система из второй линзы ($F = 25$ см) 6 и объектива «Гелиос-44М» 7, расстояние между которыми составляло 15 см. Расстояния от объектива 7

до камеры 8 и от линзы 6 до усилителя яркости 5 составляли соответственно 15 и 25 см. Все расстояния были подобраны эмпирически.

На рисунке 4.43 показаны изображения тестового объекта (фигурки, вырезанные в стальной пластинке) при отключенном усилителе яркости при подсветке суммарным пучком, содержащим излучение на обеих длинах, и пучком, содержащим излучение только на длине волны 510,6 нм. Между зеркалом 2 и объектом 3 устанавливался полосовой светофильтр 10 с полосой пропускания 510 ± 5 нм и коэффициентом пропускания 80 % на длине волны 510 нм. Из представленных данных следует, что изображение, формируемое излучением на обеих длинах волн, менее четкое, что проявляется в виде желтоватого ободка по краям объекта. Поэтому в последующих экспериментах с лазерным монитором устанавливался полосовой светофильтр перед скоростной камерой для блокирования излучения на длине волны 578,2 нм.



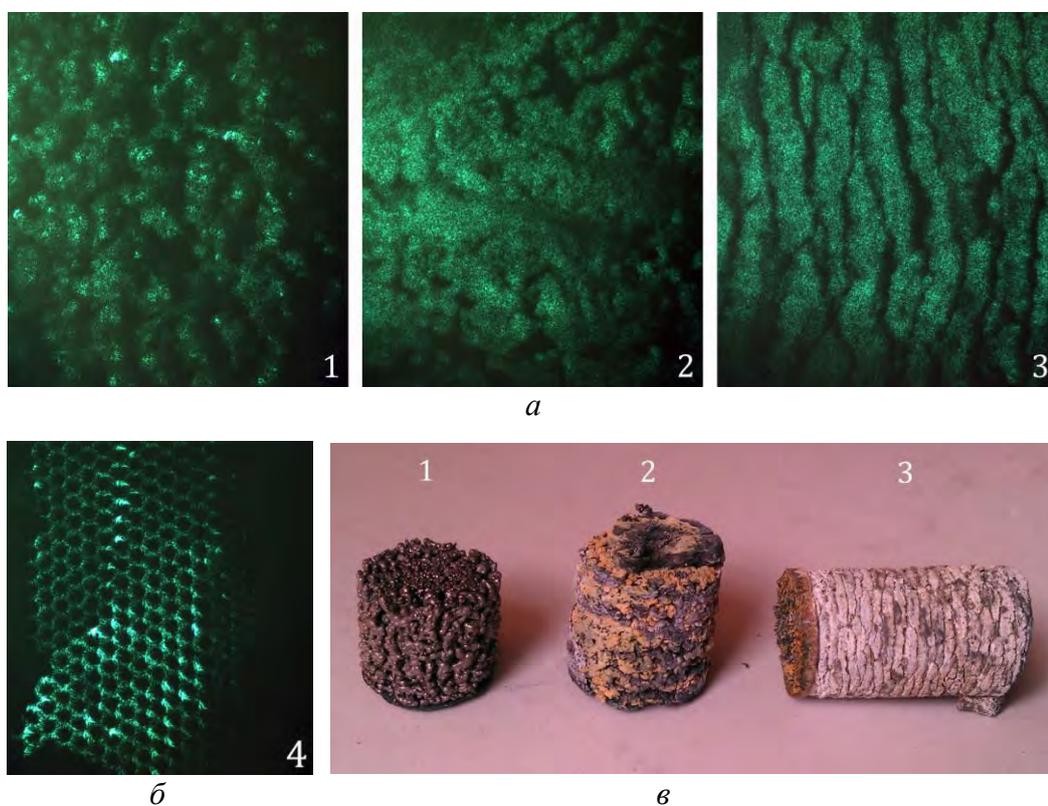
а – подсветка суммарным излучением 510,6 и 578,2 нм; *б* – подсветка излучением 510,6 нм

Рисунок 4.43 – Изображения тестовых объектов в схеме на рисунке 4.42 при выключенном усилителе яркости

Альтернативным способом получения изображения на одной длине волны усилителя яркости является оптимизация режима работы активного элемента [296]. Оптимизировалась температура внешней стенки ГРТ, температура контейнеров с бромидом меди и мощность накачки, что позволяло практически полностью подавить излучение на длине волны 578,2 нм без применения полосового фильтра.

С использованием схемы на рисунке 4.42 были получены изображения

различных объектов при выключенном усилителе яркости, которые приведены на рисунке 4.44. Как видно из представленных изображений, одного только излучения генератора уже достаточно для регистрации объекта наблюдения с использованием скоростной видеокамеры. Таким образом, интенсивность отражённого от объекта излучения достаточно высокая для снятия инверсии в активной среде усилителя яркости и, как следствие, усиления оптического сигнала. Следовательно, отраженный от объекта свет в рассмотренной оптической схеме будет усиливаться усилителем яркости.



1 – Ni+Al; 2 – FeTiO₃+Al; 3 – FeTiO₃+SiO₂+Si+Al+C; 4 – металлическая сетка

Рисунок 4.44 – Изображения тестовых объектов в схеме на рисунке 4.42 при выключенном усилителе яркости (а, б) и фотография образцов сгоревших смесей крупнодисперсных порошков, сделанная обычным фотоаппаратом (в)

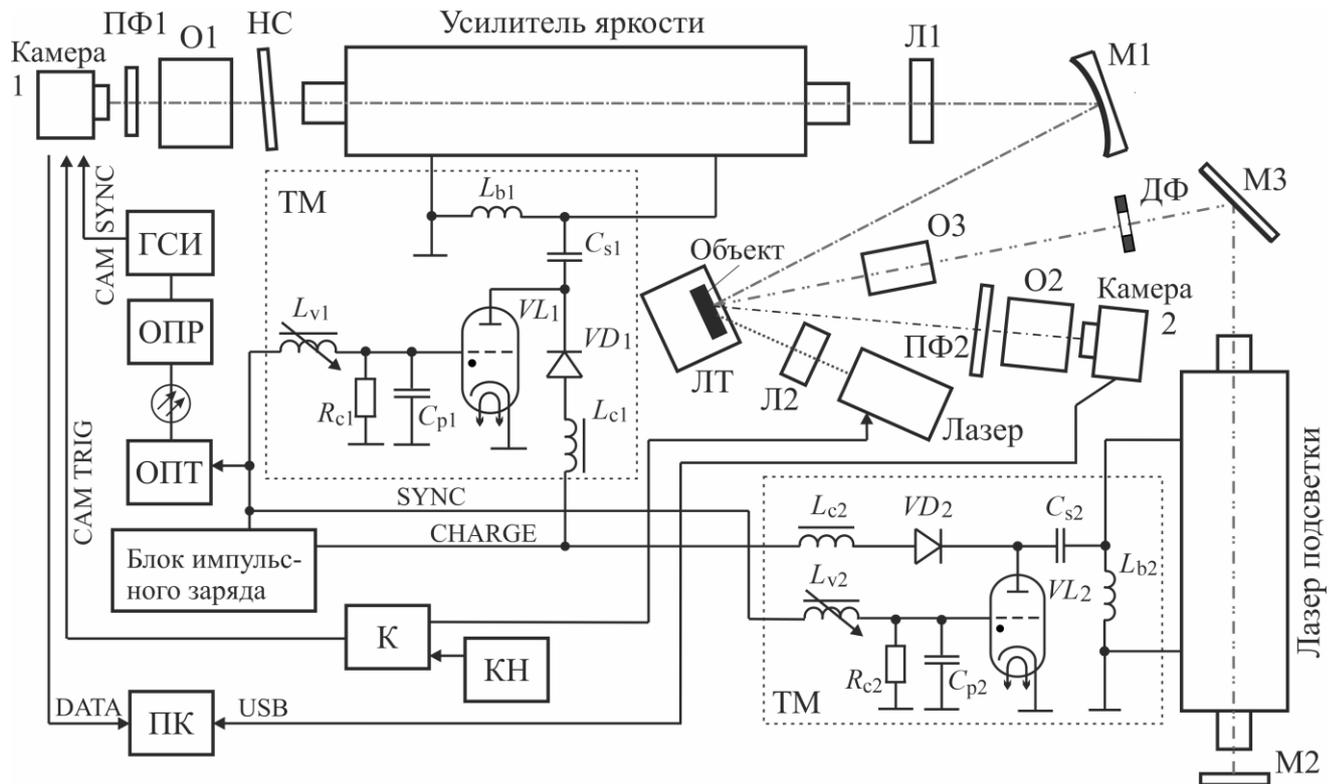
Во второй главе (раздел 2.3) отмечается необходимость прецизионной синхронизации излучения генератора и усилителя яркости в схеме бистатического лазерного монитора. С использованием разработанной на начальном этапе работ по диссертации схемы синхронизации (рисунок 2.8, а) проведён эксперимент с

включенным усилителем яркости [330]. Усиленное изображение наблюдалось в некоторых импульсах асинхронно. Получить устойчивое усиленное изображение не удалось.

На рисунке 4.45 приведена разработанная схема лазерного монитора с независимой подсветкой. Варианты этой схемы рассмотрены в работах [297, 298, 349]. Изображение объекта исследования формировалось схемой, состоящей из вогнутого зеркала с радиусом кривизны 3 м и собирающей линзы с фокусным расстоянием 1 м. Область наблюдения составляла 6 мм в диаметре при расстоянии 50 см от вогнутого зеркала до объекта. Плотность мощности излучения усилителя яркости в области наблюдения составляла 0,53 мВт/мм². В качестве усилителя яркости использовалась ГРТ № 6. В качестве лазера подсветки использовалась ГРТ № 5. Излучение лазера подсветки освещало объект наблюдения через диафрагму диаметром 7 мм и расширитель пучка, которым варьировалась область освещения от 7 до 70 мм. Плотность мощности подсветки в области наблюдения усилителя яркости составляла 5,2 мВт/мм² при диаметре пучка 7 мм. Освещение объекта исследования и усиление отраженного света синхронизовались за счет регулирования моментов включения двух тиратронов в схеме возбуждения. Пунктиром обозначены компоненты схемы накачки, размещенные в одном блоке.

Оптимальный временной интервал между импульсами запуска тиратронов определялся экспериментально по максимуму интенсивности изображения камеры 1 и зависел от взаимного расположения лазера подсветки и усилителя яркости. На рисунке 4.46 показаны изображения тестового объекта (медной сетки), полученные в схеме на рисунке 4.45 при различной задержке между импульсами излучения усилителя яркости и лазера подсветки. Как следует из представленных изображений, при оптимальной задержке излучения усилителя яркости по отношению к излучению лазера подсветки (5–10 нс) достигается максимальный контраст изображений и наибольшее снижение интенсивности фонового излучения. При задержке –5–0 нс и 15–20 нс также наблюдается увеличение яркости и

контрастности изображений. Таким образом, основным техническим результатом применения лазерного монитора с независимой подсветкой является повышение яркости и контрастности изображений поверхности, что принципиально важно при визуализации поверхности с малым коэффициентом отражения, такой как поверхность нанопорошка металла или смеси нанопорошков металлов.



М1 – вогнутое зеркало, М2 – плоское зеркало, Л1, Л2 – собирающие линзы, НС – нейтральный светофильтр, О1–О2 – объективы, О3 – расширитель пучка, ПФ1, ПФ2 – полосовые фильтры, ДФ – диафрагма, ОПТ – оптический передатчик, ОПР – оптический приемник, ГСИ – генератор синхроимпульсов, ПК – персональный компьютер, К – контроллер, КН – кнопка, VL₁, VL₂ – тиратроны, C_{s1}, C_{s2} – накопительные конденсаторы, VD₁, VD₂ – зарядные диоды, L_{b1}, L_{b2} – шунтирующие индуктивности, L_{v1}, L_{v2} – ферровариометры, R_{c1}, R_{c2} – согласующие резисторы, C_{p1}, C_{p2} – обостряющие конденсаторы, ТМ – тиратронный модуль

Рисунок 4.45 – Схема лазерного монитора с независимой подсветкой

На рисунке 4.47 показаны изображения поверхности нанопорошков до начала горения и после окончания горения, полученные с использованием традиционного и бистатического лазерных мониторов. Использование лазера подсветки позволило

увеличить яркость и контрастность изображений, формируемых лазерным усилителем яркости и регистрируемых первой цифровой камерой. На изображениях, полученных с независимой подсветкой, видны детали, которые сложно различимы на изображениях моностатического лазерного монитора.

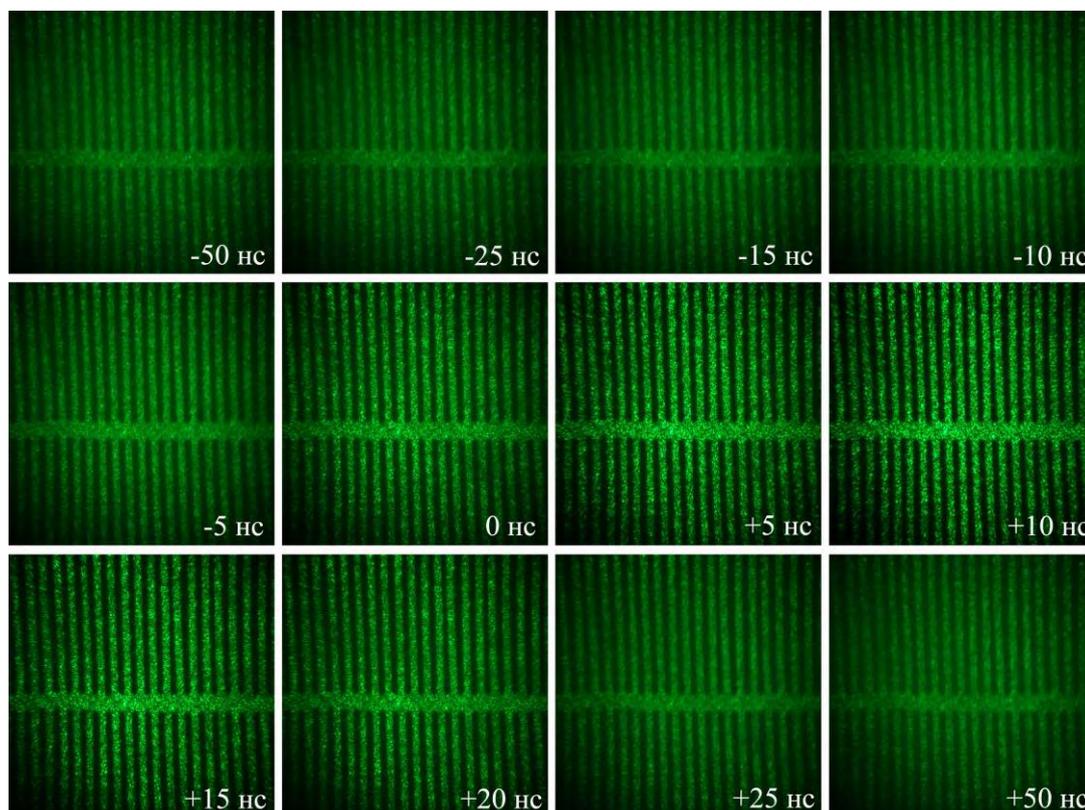


Рисунок 4.46 – Изображения тестового объекта при различной задержке между импульсами излучения усилителя яркости лазера подсветки

Для оценки контраста изображений воспользуемся формулой Майкельсона, приведенной в аналитической статье [350]:

$$k = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (4.5)$$

где L_{\max} – максимальная, L_{\min} – минимальная яркость изображения. Расчет выполнялся для области образца, исключая подложку и фон. Для изображений, представленных на рисунке 4.47, контраст изображений поверхности нанопорошка увеличился при независимом освещении в 1,54 раза для исходной смеси наноAl-наноFe и в 1,33 раза для продуктов сгорания. Для нанопорошка алюминия

увеличение контраста составило 1,4 и 1,3 раза, соответственно. При этом яркость изображений увеличилась до 21 %.

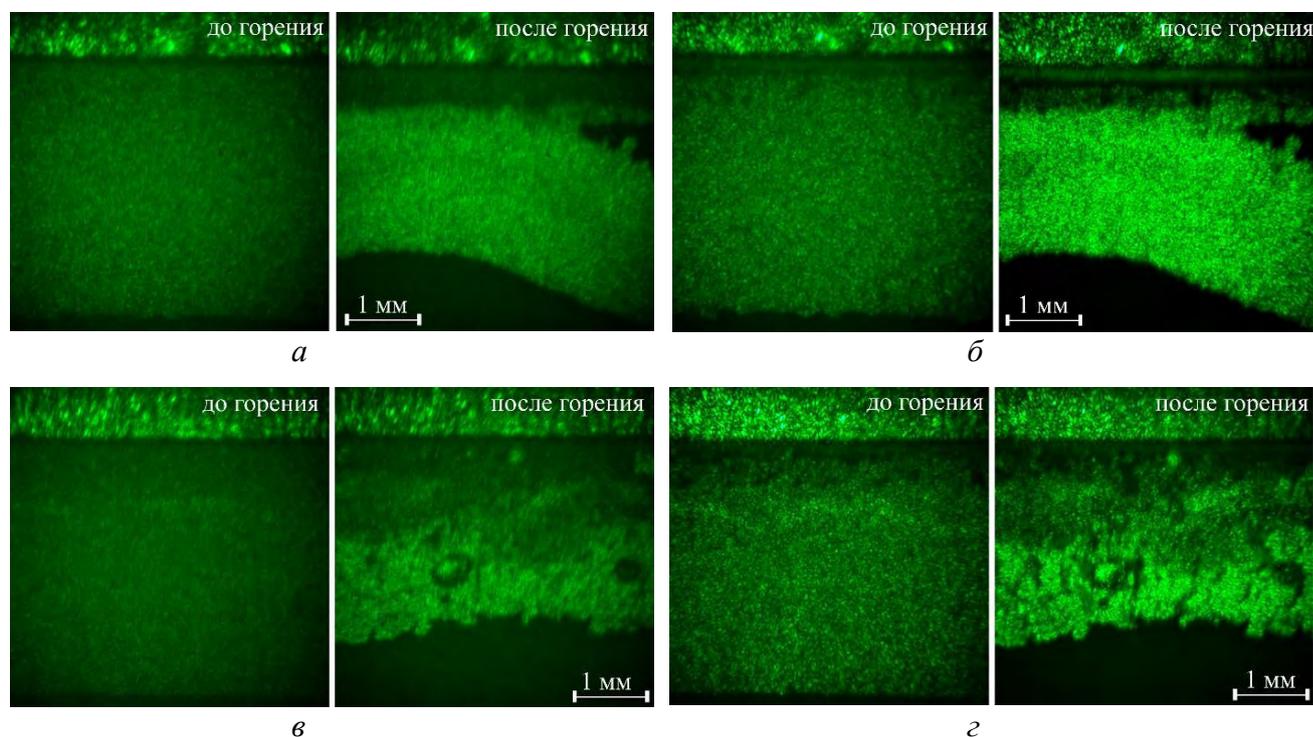


Рисунок 4.47 – Изображения поверхности nanoAl (*а, б*) и смеси nanoAl - nanoFe (*в, г*) до начала горения и после окончания горения, полученные с использованием лазерного монитора с самосопряженной подсветкой (*а, в*) и с независимой подсветкой (*б, г*)

При работе с легковоспламеняющимися высокоэнергетическими материалами мощность подсветки должна быть минимальной при сохранении эффекта увеличения контраста. На рисунках 4.48 и 4.49 приведены изображения тестового объекта (медной сетки), исходного нанопорошка алюминия и продуктов сгорания, полученные при различной мощности подсветки.

Диаметр луча лазера подсветки может отличаться от диаметра области наблюдения лазерного монитора, как это показано на рисунке 4.48 (диаметр луча лазера подсветки – 6 мм, диаметр области наблюдения ~8 мм). Поэтому влияние подсветки следует оценивать не по средней мощности лазерного луча, а по плотности мощности подсветки в области наблюдения. На рисунке 4.50 представлены зависимости средней яркости изображений от плотности мощности подсветки в бистатическом лазерном мониторе при визуализации тестового объекта

(расчет выполнен для освещенной области) и нанопорошка алюминия. Из представленных данных следует, что средняя яркость изображений медной сетки имеет степенную зависимость от плотности мощности подсветки, которая характеризуется резким ростом до плотности мощности подсветки ~ 1 мВт/мм² (средняя мощность 50 мВт), после чего рост замедляется. Яркость изображений нанопорошка алюминия и продуктов сгорания в исследованном диапазоне от 0 до 270 мВт возрастает практически линейно.

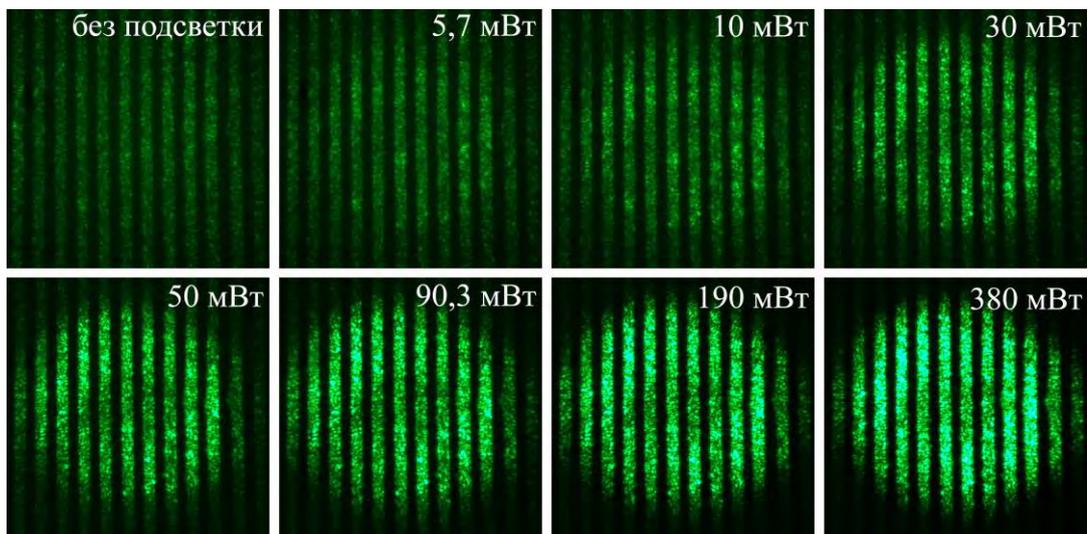


Рисунок 4.48 – Изображения тестового объекта при различной мощности подсветки в бистатическом лазерном мониторе

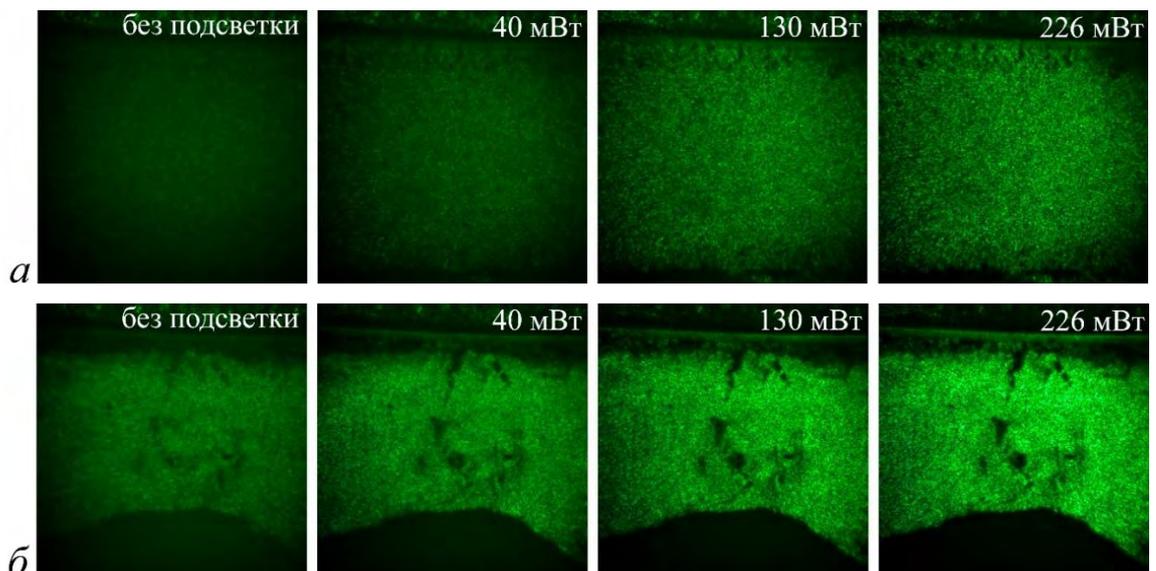
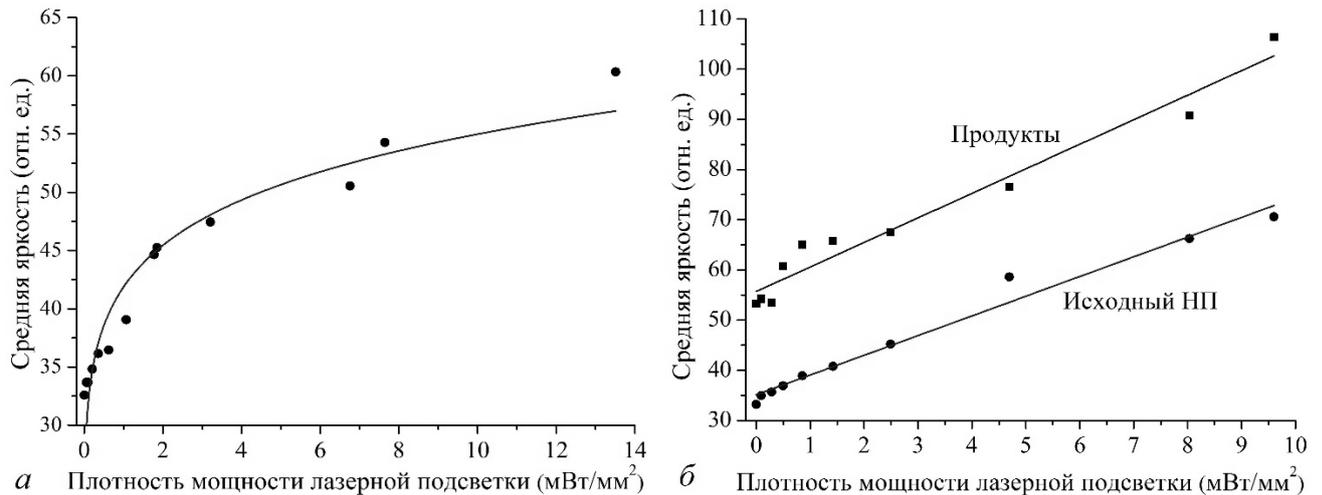
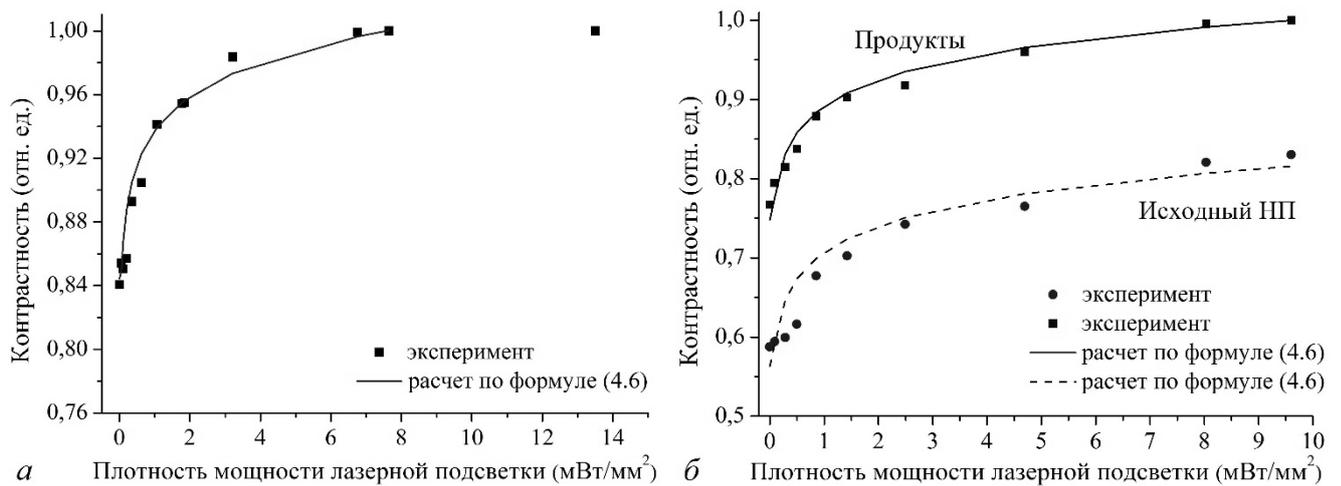


Рисунок 4.49 – Изображения исходного нанопорошка алюминия (а) и продуктов сгорания (б) при различной мощности лазера подсветки



a – медная сетка; *б* – нанопорошок алюминия (исходный и продукты сгорания)

Рисунок 4.50 – Зависимости средней яркости изображений лазерного монитора от плотности мощности лазерной подсветки



a – медная сетка; *б* – нанопорошок алюминия (исходный и продукты сгорания)

Рисунок 4.51 – Зависимости контраста изображений лазерного монитора от плотности мощности лазерной подсветки

На рисунке 4.51 представлены зависимости контраста изображений от плотности мощности подсветки в бистатическом лазерном мониторе при визуализации тестового объекта (расчет выполнен для освещенной области) и нанопорошка алюминия. В случае визуализации медной сетки функция контраста изображений имеет нелинейный характер с резким нарастанием в интервале до 3,2 мВт/мм² (100 мВт), при этом при подсветке ~7,6 мВт/мм² (200 мВт) наблюдается насыщение. Контрастность изображений нанопорошка алюминия имеет быстрый

рост в диапазоне плотности мощности подсветки до $\sim 2,5$ мВт/мм². Насыщение контраста наблюдается при величине мощности подсветки $\sim 7,6$ мВт/мм² (200 мВт) в случае визуализации продуктов сгорания. При визуализации исходного порошка насыщение не достигается. Мы полагаем, этот факт обусловлен отсутствием фона на изображениях исходного нанопорошка и его присутствием на изображениях продуктов сгорания.

На основании зависимостей на рисунке 4.51 установлена закономерная связь контраста изображений поверхности в бистатическом лазерном мониторе с интенсивностью независимой подсветки в диапазоне малых значений мощности подсветки, которая выражается функцией:

$$k = a + b \cdot \ln \left(\frac{p}{p_{\text{оп}}} \right), \quad (4.6)$$

где p – плотность мощности подсветки; $p_{\text{оп}}$ – плотность мощности подсветки, при которой может быть достигнут предельный контраст; b – интенсивность роста k с увеличением плотности мощности; a – предельный контраст. Предельный контраст стремится к единице в случае наличия фона на изображении, например, в случае сетки или продуктов сгорания нанопорошка. При отсутствии фона, как в случае исходного нанопорошка, $a = \text{const}$ и, предположительно, определяется отражательной способностью поверхности объекта исследования.

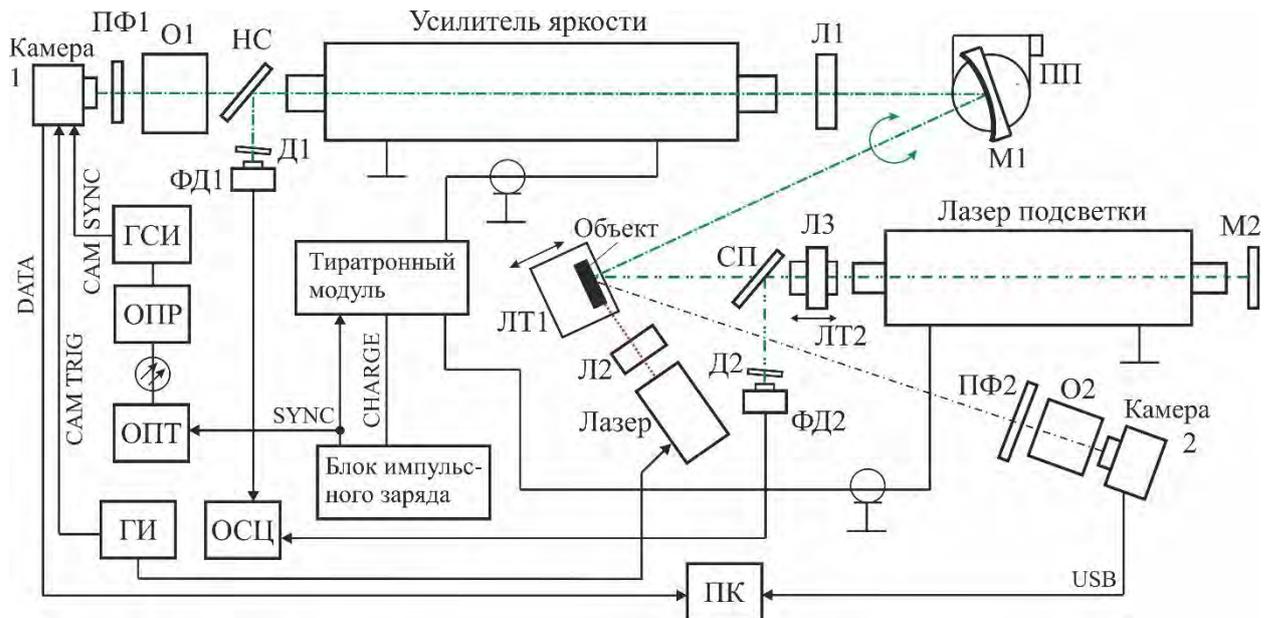
Использование лазера подсветки позволяет совместить в одной системе визуализации функции лазерного мониторинга и видеозаписи с лазерной подсветкой путем применения полосового светофильтра (ПФ2 на рисунке 4.45), пропускающего излучение на длине волны подсветки (510,6 нм), достаточное по интенсивности для регистрации второй цифровой камерой. Размер области подсветки регулируется расширителем пучка в диапазоне от размера области наблюдения первой камерой до ширины объекта исследования. Подобная возможность с применением одного активного элемента отмечалась нами в работе [303]. Освещенность объекта исследования лазером подсветки изменяется путем настройки температурных параметров лазера подсветки независимо от работы

усилителя яркости или путем установки нейтральных светофильтров.

В работе [144] использовался бистатический лазерный монитор для визуализации горения крупнодисперсных пористых композитных материалов. Подсветка объекта наблюдения осуществлялась лазером с нестабильным телескопическим резонатором и мощностью излучения 8,2 Вт. Очевидно, что применение лазера настолько высокой мощности непригодно для исследования легковоспламеняющихся нанопорошков металлов с высоким поглощением света, т.к. возможно самопроизвольное инициирование горения. При этом высокое качество пучка, формируемого нестабильным телескопическим резонатором [144], не востребовано для решения задачи визуализации поверхности нанопорошка ввиду относительно небольшого расстояния до объекта наблюдения.

В схеме лазерного монитора, предложенного в данной работе (рисунок 4.45), независимая подсветка формируется с использованием лазера с одним зеркалом резонатора. Зеркало $M2$, установленное с одной стороны лазера подсветки, позволяет сформировать неполный резонатор, который значительно увеличивает угловую расходимость излучения и формирует на поверхности объекта исследования спеклы малых размеров. Малые размеры спеклов вносят незначительные искажения изображений и незначительно влияют на пространственное разрешение всего устройства.

Применение однопроходowego излучения усилителя яркости в качестве излучения подсветки позволило использовать ГРТ с небольшим активным объемом и малой мощностью, требуемой для ее накачки. Сопоставимые параметры лазера подсветки и усилителя яркости обеспечили возможность использования одного источника заряда накопительных емкостей для возбуждения двух активных элементов, что снизило стоимость и массогабаритные параметры всей системы. На рисунке 4.52 приведен бистатический лазерный монитор, в котором поворотное зеркало лазера подсветки отсутствует, а функцию согласования диаметра области наблюдения и диаметра области подсветки выполняет линза $L3$ ($F=1$ м).



М1 – вогнутое зеркало, ПП – поворотная платформа, М2 – плоское зеркало, Л1–Л3 – собирающие линзы, ЛТ1, ЛТ2 – линейные трансляторы, НС – нейтральный светофильтр, СП – светоделительная пластина, О1, О2 – объективы, ПФ1, ПФ2 – полосовые фильтры, Д1, Д2 – диффузоры, ФД1, ФД2 – фотодиоды, ОПТ – оптический передатчик, ОПР – оптический приемник, ГСИ – генератор синхроимпульсов, ГИ – ждущий генератор, ОСЦ – осциллограф

Рисунок 4.52 – Схема лазерного монитора с независимой подсветкой

Диаметр освещаемой области варьируется путем перемещения линзы *Л3* вдоль оптической оси лазера подсветки. Совмещение оптических осей лазера подсветки и зеркала *М1* осуществляется путем поворота зеркала *М1*. В схеме присутствуют фотодиоды для регистрации излучения активных элементов и настройки синхронизации. Сигналы с фотодиодов выводятся на осциллограф. Для включения записи скоростной камеры и излучения инициирующего лазера используется двухканальный генератор импульсов, например, АК ИП-3301.

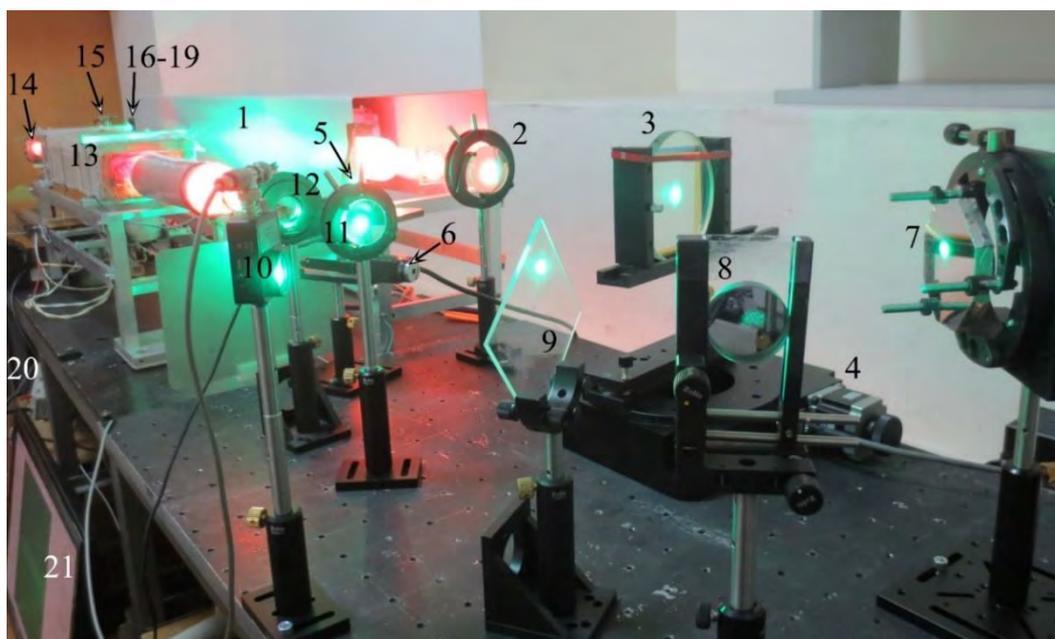
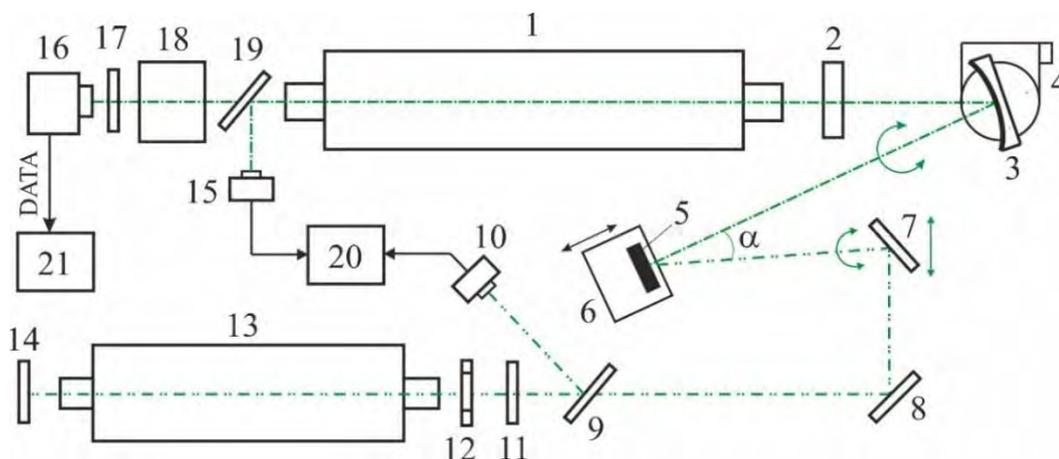
На рисунке 4.53 приведена фотография экспериментальной установки, соответствующая схеме на рисунке 4.52. Расположение компонентов бистатического лазерного монитора оптимизируется в зависимости от задач эксперимента. На рисунке 4.54 приведены схема и фотография экспериментальной установки, в которой усилитель яркости и лазер подсветки расположены параллельно рядом друг с другом.



1 – усилитель яркости, 2 – лазер подсветки, 3 – блок импульсного заряда, 4 – тиратронный модуль, 5 – объект, 6 – линза Л1, 7 – зеркало М1, 8 – линза Л3, 9 – инициирующий лазер, 10 – ждущий генератор импульсов

Рисунок 4.53 – Фотография экспериментальной установки к схеме на рисунке 4.52

Особенностью экспериментальной установки на рисунке 4.54 является использование емкостной ГРТ в качестве активного элемента лазера подсветки. Плотность мощности подсветки в области наблюдения составляла $8,5 \text{ мВт/мм}^2$ при диаметре пучка 6 мм. Луч лазера подсветки в схеме на рисунке 4.54 заводится двумя поворотными зеркалами, которые позволяют изменять угол α в диапазоне от 20 до 80 градусов. С использованием схемы на рисунке 4.54 проведено исследование влияния угла α между лучами лазера подсветки и усилителя яркости на контрастность изображений. На рисунке 4.55 показаны изображения тестового объекта при различном угле α . На рисунке 4.56 приведена зависимость контраста изображений от угла α . Из полученных данных следует, что оптимальным с точки зрения интенсивности и равномерности профиля излучения являются углы 20–30°. При этом внешняя подсветка дает увеличение яркости, контрастности и равномерности интенсивности изображений в диапазоне до 70°. Таким образом, в бистатическом лазерном мониторе не наблюдается высокой чувствительности усиления к углу освещения поверхности.

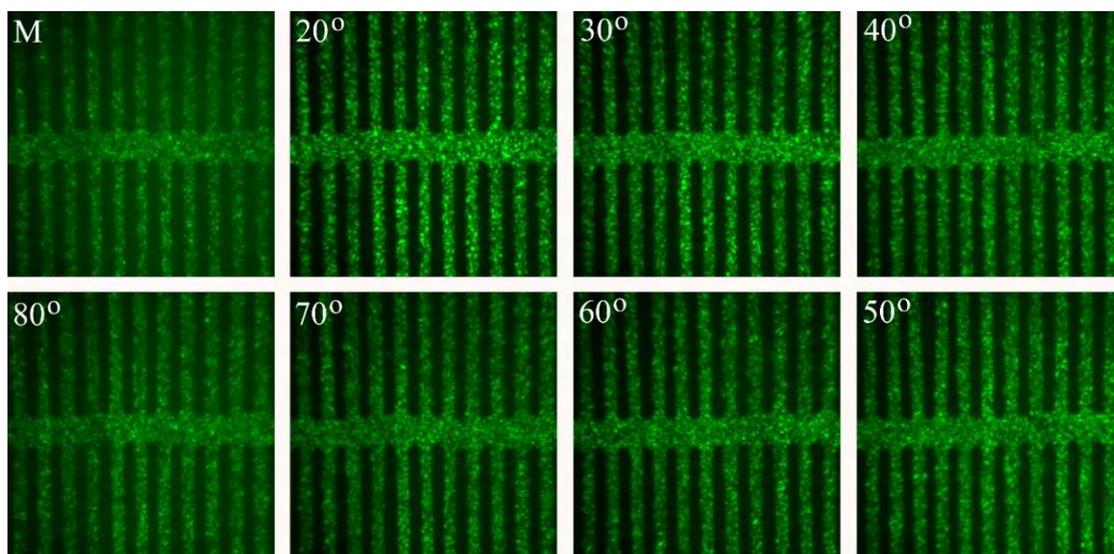


1 – усилитель яркости (традиционная ГРТ), 2 – линза, 3 – вогнутое зеркало, 4 – поворотная платформа, 5 – объект, 6 – линейный транслятор, 7, 8 – поворотные зеркала, 9 – кварцевая пластина, 10, 15 – фотодиоды, 11 – диафрагма, 12 – механический затвор, 13 – лазер подсветки (емкостная ГРТ), 14 – плоское зеркало, 16 – скоростная камера, 17 – фильтр 510 ± 5 нм, 20 – осциллограф, 21 – ПК

Рисунок 4.54 – Бистатический лазерный монитор с емкостной ГРТ

На рисунке 4.57 показаны изображения поверхности нанопорошка алюминия до начала горения и после окончания горения, полученные с использованием установки на рисунке 4.54 с выключенной и включенной лазерной подсветкой. Как и при подсветке от ГРТ с традиционной накачкой, контрастность изображений поверхности нанопорошка металла значительно повышается с подсветкой на длине волны усиления 510,6 нм от лазера на парах бромида меди с емкостной накачкой.

Для изображений на рисунке 4.57 максимальная яркость увеличилась в 1,7 раза при лазерном освещении исходного нанопорошка алюминия и в 1,3 раза для продуктов сгорания. Максимальный контраст (Майкельсона) увеличился с 0,64 (исходный порошок) и 0,78 (продукты) без подсветки до 1,0 в обоих случаях с лазерной подсветкой, т.е. в 1,56 и 1,28 раз, соответственно. Таким образом, лазерная подсветка дала увеличение контрастности изображений поверхности нанопорошка металла до 50%.



М – подсветка отсутствует (затвор I_2 закрыт)

Рисунок 4.55 – Изображения тестового объекта при различном угле α между лучами усилителя яркости лазера подсветки

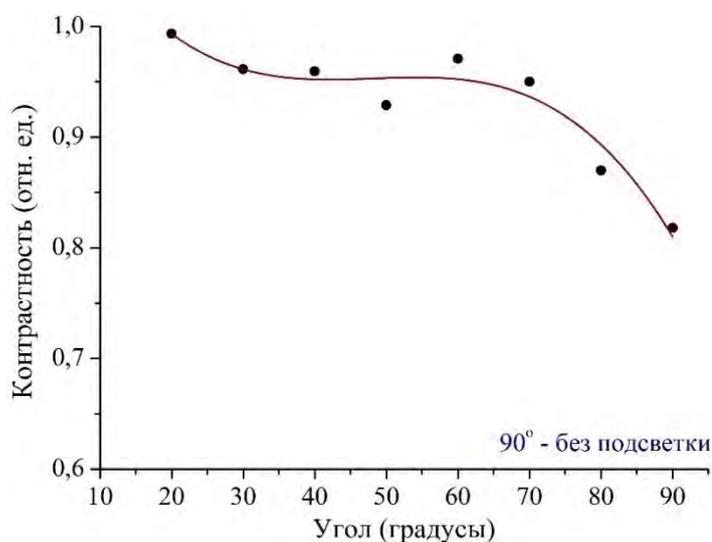
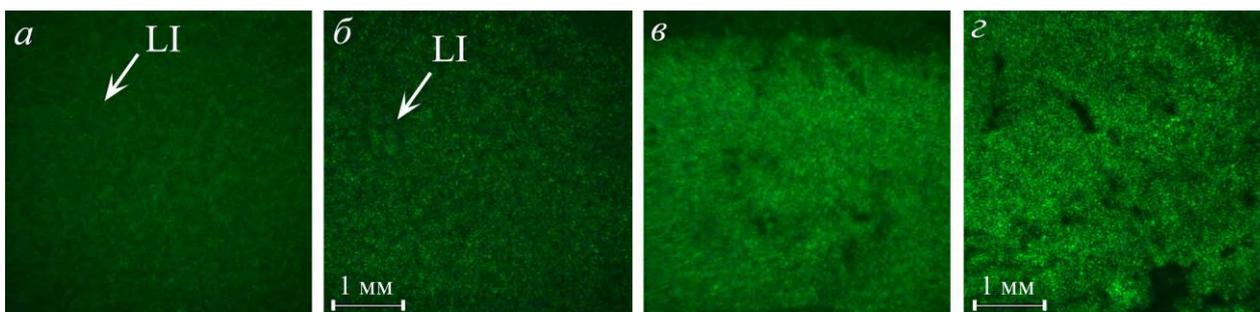


Рисунок 4.56 – Контрастность изображений на рисунке 4.55

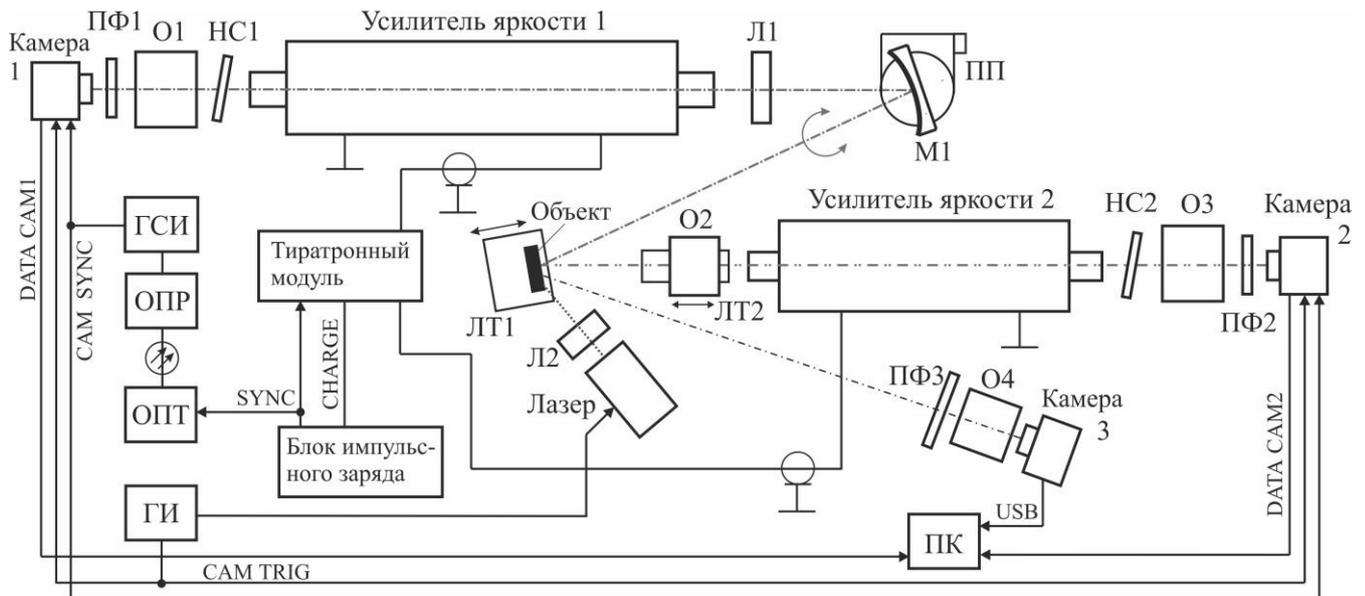


a, б – начало лазерного инициирования; *в, г* – продукты сгорания; *a, в* – наблюдение без независимой подсветки; *б, г* – с подсветкой; LI – область лазерного инициирования

Рисунок 4.57 – Изображения поверхности nanoAl

4.8. Двухканальный лазерный монитор

Синхронизованная работа двух активных элементов позволяет реализовать двухканальный лазерный монитор, обеспечивающий практически одновременное (в пределах одного межимпульсного интервала) наблюдение горения образца в одной области с различным увеличением и пространственным разрешением или одновременно в двух различных областях с одинаковым или различным увеличением и пространственным разрешением. На рисунке 4.58 показан такой лазерный монитор. Варианты подобной реализации рассмотрены в работах [299, 300]. В работе двухканального лазерного монитора следует различать два случая, когда исследуется одновременно одна область образца с разным увеличением и разные области образца одновременно. Если исследуется одна область образца с различным увеличением, на основании данных, представленных на рисунке 4.46, для исключения взаимного влияния излучения усилителей яркости рассогласование импульсов излучения должно составлять более 25 нс. В этом случае импульс сверхизлучения первого усилителя яркости оканчивается к моменту появления инверсии населенностей и излучения второго усилителя яркости. Таким образом, с использованием предложенного метода регистрации можно исследовать одну и ту же область объекта с временным разрешением до 25 нс. В случае, если области наблюдения усилителей яркости не пересекаются, требования к задержке нет и усилители яркости могут работать как с задержкой, так и одновременно.

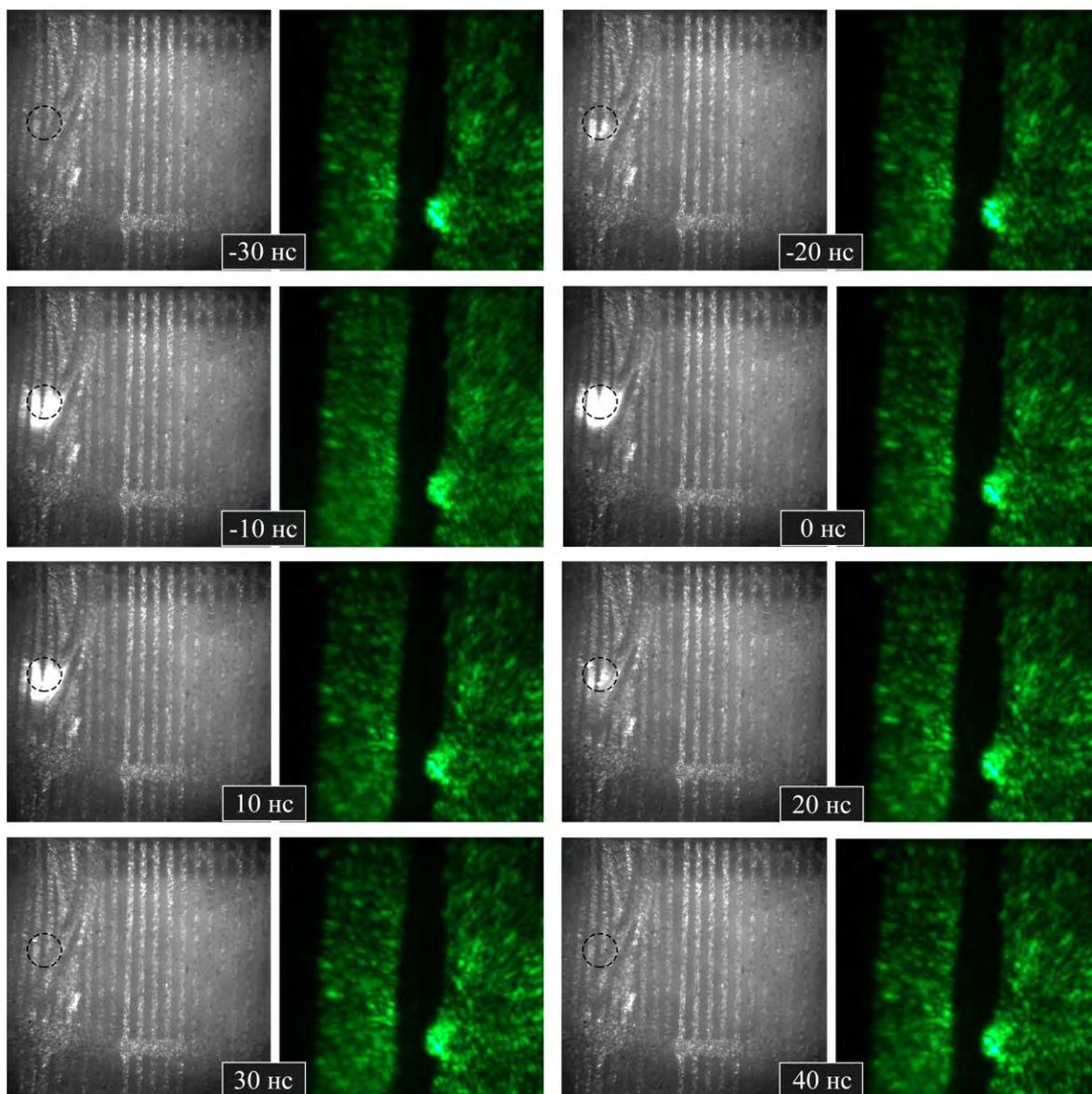


М1 – вогнутое зеркало, ПП – поворотная платформа, Л1, Л2 – собирающие линзы, ЛТ1, ЛТ2 – линейные трансляторы, НС1, НС2 – нейтральные светофильтры, О1–О3 – объективы, ПФ1–ПФ3 – полосовые фильтры, ОПТ – оптический передатчик, ОПР – оптический приемник, ГСИ – генератор синхроимпульсов, ГИ – ждущий генератор импульсов, ПК – компьютер

Рисунок 4.58 – Схема двухканального лазерного монитора

Изображение в схеме на рисунке 4.58 формировалось линзой $F=50$ см. Изображения записывались двумя скоростными камерами Phantom Miro C110 (цветная) и Photron Fastcam SA1 (монохромная), работающими с разрешением 1024×1024 пикселей и частотой 500 Гц. Синхронизация обеих камер осуществлялась одними и теми же сигналами CAM SYNC и CAM TRIG, формируемыми генератором синхроимпульсов. В качестве объектов исследования использовались тестовые объекты (стальная линейка и медная сетка с шагом 0,3 мм) и реальные объекты – навески смесей нанопорошков алюминия и железа nanoAl-наноFe и $\text{nanoAl-микроAl-наноFe}$ и нанопорошок алюминия без примеси.

На рисунке 4.59 показаны изображения тестового объекта (медной сетки), полученные в одной области наблюдения с разным увеличением, с использованием схемы на рисунке 4.58. Камера 1 – Photron Fastcam SA1 (черно-белая), камера 2 – Phantom Miro C110 (цветная). Усилитель яркости 1 построен по зеркальной схеме, имеющей область наблюдения диаметром 8 мм. Усилитель яркости 2 построен по традиционной схеме с областью наблюдения диаметром 0,9 мм.

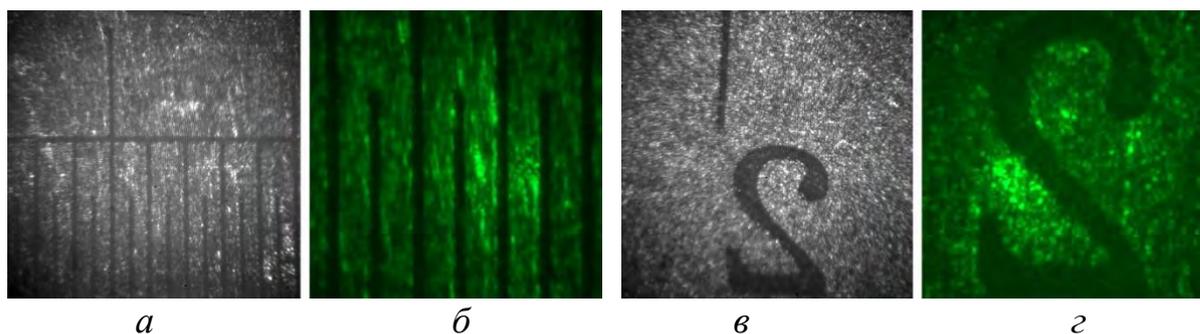


Пунктирной линией на изображениях усилителя 1 выделена область наблюдения усилителя 2

Рисунок 4.59 – Изображения тестового объекта при различной задержке между импульсами излучения усилителей яркости

Как следует из представленных изображений, излучение усилителя яркости 2 не оказывает заметного влияния на изображение усилителя яркости 1 при задержках ≥ 30 нс. Задержка 30 нс соответствует длительности импульса сверхизлучения. Таким образом, излучение усилителя 2 приходится на время, когда инверсия в активной среде усилителя яркости 1 уже снята. При меньших задержках излучение усилителя 2 приходится на время существования инверсии в активной среде усилителя 1 и приводит к существенному увеличению яркости изображений

усилителя 1 в области, освещаемой усилителем 2. В то же время излучение усилителя яркости 1 не оказывает заметного влияния на изображения, формируемые усилителем яркости 2, что обусловлено различием плотности мощности излучения, которым каждый усилитель яркости освещает поверхность объекта. В короткофокусной схеме плотность мощности сверхизлучения, освещающей поверхность объекта наблюдения, примерно в 50 раз выше по сравнению с зеркальной схемой. На рисунке 4.60 показаны изображения тестовых объектов при использовании линзы с фокусным расстоянием 50 см в качестве объектива О2 (рисунок 4.58). При задержке импульсов излучения 35 нс предложенная конфигурация двухканального лазерного монитора позволяла формировать изображения как одной и той же области объекта, так и двух областей объекта с разным увеличением.



а

б

в

г

а, в – камера 1; б, г – камера 2

Рисунок 4.60 – Фрагменты стальной линейки, полученные с использованием двухканального лазерного монитора

4.9. Лазерный монитор для исследования поверхности тонких слоев нанопорошков металлов

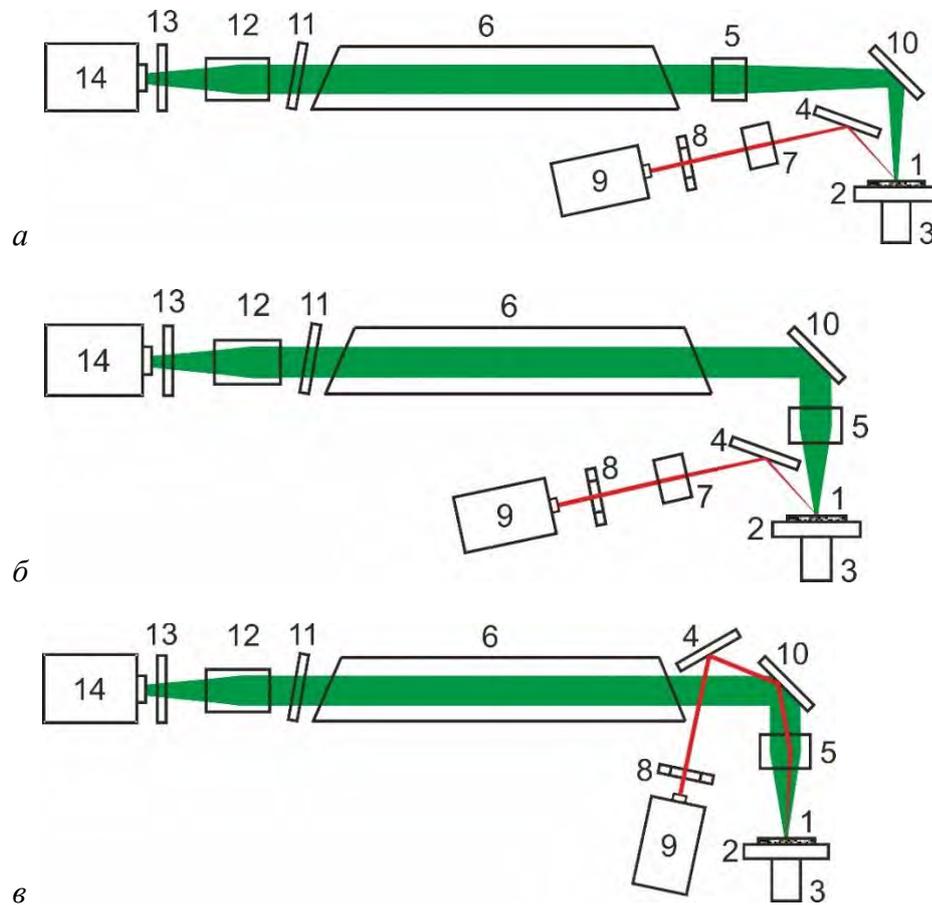
В отличие от горения массивных навесок, при котором горение является фильтрационным и окислитель распространяется через массив образца, при горении тонких слоев доступ окислителя происходит с поверхности. Интерес представляет характер распространения горения по поверхности слоя, в том числе инициирование, тление, воспламенение. В случае нанопорошка алюминия тление,

по сути, представляет собой распространение первой волны горения, воспламенение – появление и распространение второй волны горения.

Лазерный монитор для исследования тонких слоев нанопорошков представляет собой традиционную моностатическую систему, в которую введено поворотное зеркало для направления пучка усилителя яркости в вертикальной плоскости. В силу особенностей конструкции активных элементов на парах металлов их размещение в вертикальном положении практически невозможно. При этом для исследования тонких слоев необходимо освещать объект исследования сверху. Для исследования слоев нанопорошка алюминия толщиной 0,3–0,4 мм, расположенных горизонтально на керамической подложке, схема лазерного монитора была модифицирована [304]. На рисунке 4.61 схематично показаны варианты расположения элементов схемы лазерного монитора для горизонтального наблюдения горения. В случае на рисунке 4.61, *а* использовалась линза 5 с $F=500$ мм и объектив Триплет с $F=80$ мм. Объектив или линза располагались на оптической оси усилителя яркости, поворотное зеркало располагалось между объективом и объектом. Варианты реализации части схемы, формирующей изображение, приведены на рисунке 4.62, *а*, *б*. В схеме (*б*) дополнительно устанавливалась USB-камера с объективом Canon Macro Lens EF 180 mm и полосовым фильтром ОС-13 для регистрации общего вида горения слоя нанопорошка.

В схемах на рисунках 4.61, *б*, *в* использовался объектив Гелиос-44М ($F=58$ мм), который располагался над объектом исследования, при этом излучение усилителя яркости заводилось поворотным зеркалом. Резкость изображений во всех схемах настраивалась с помощью вертикального линейного транслятора. На рисунках 4.62, *в*, *г* показаны реализации соответствующих схем. Излучение иницирующего лазера в схемах на рисунках 4.61, *а*, *б* (рисунки 4.62, *а–в*) фокусировалось отдельной линзой 7 и направлялось на объект исследования зеркалом 4. В схеме на рисунке 4.61, *в* (рисунок 4.62, *г*) луч иницирующего лазера заводился в объектив, формирующий изображение. Юстировка системы позволяла фокусировать

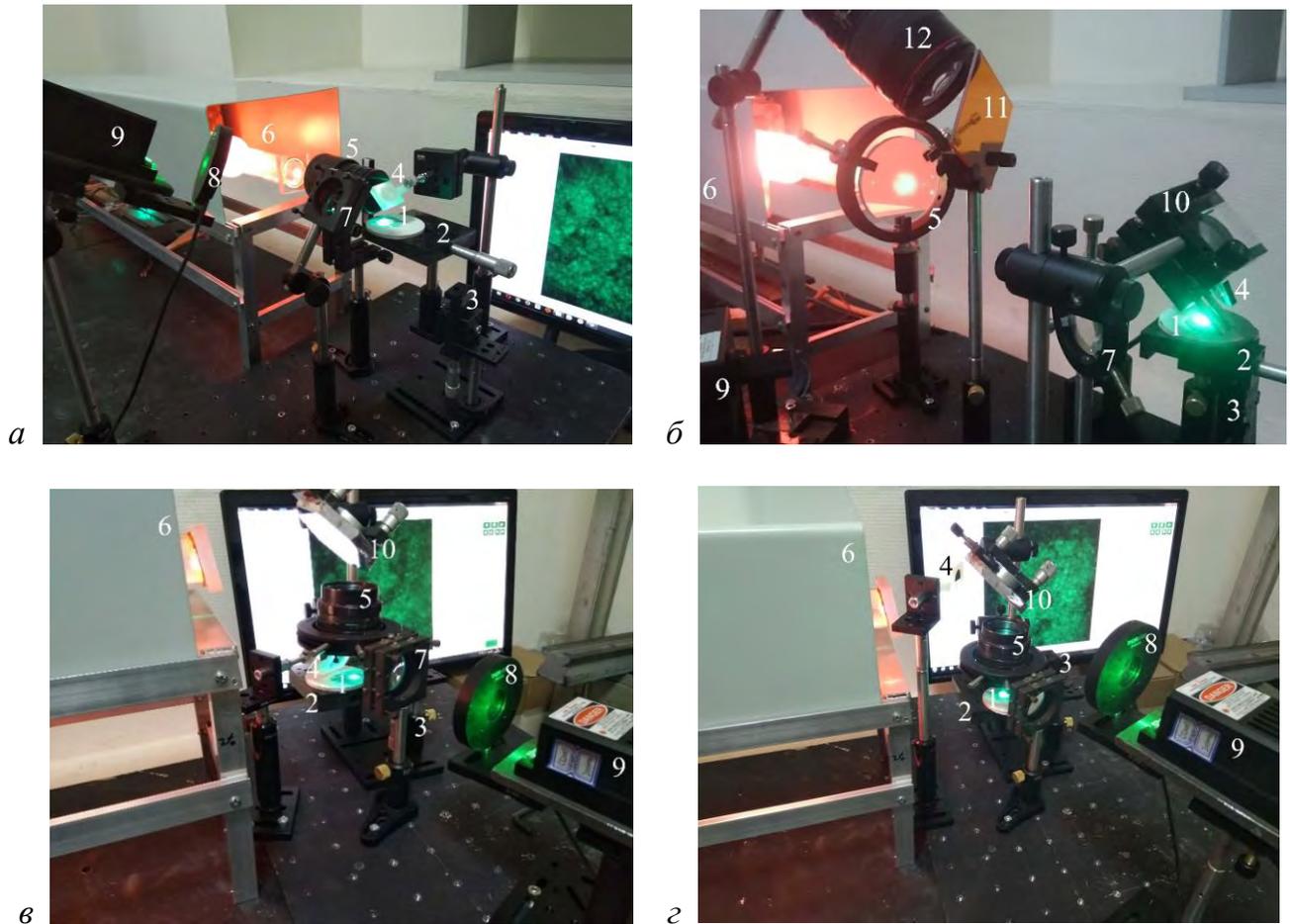
излучение иницирующего лазера в области наблюдения лазерного монитора. Такая реализация позволяет в перспективе использовать объектив с более коротким фокусным расстоянием.



1 – нанопорошок на подложке, 2 – горизонтальный линейный транслятор, 3 – вертикальный линейный транслятор, 4, 10 – поворотные зеркала, 5, 12 – объективы, 6 – усилитель яркости, 7 – линза, 8 – механический затвор, 9 – иницирующий лазер, 11 – нейтральный светофильтр, 13 – узкополосный фильтр 510 ± 5 нм, 14 – скоростная камера

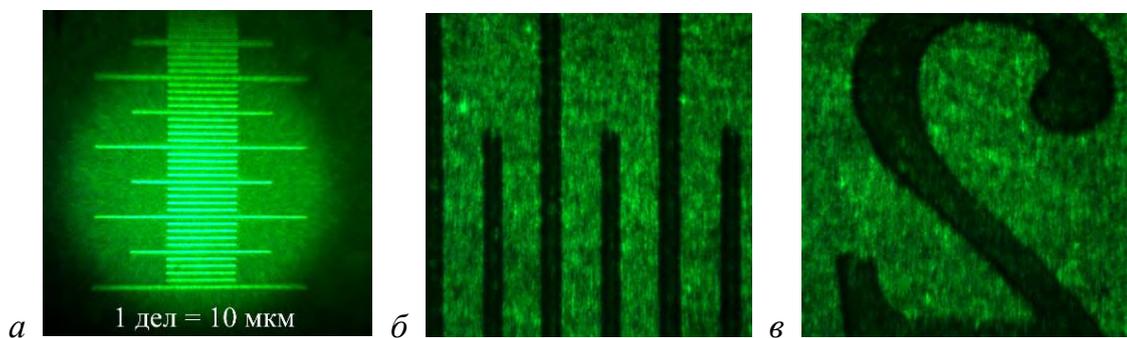
Рисунок 4.61 – Схемы экспериментальной установки с горизонтальной визуализацией

На рисунке 4.63 приведены изображения калибровочных линеек в различных схемах горизонтальной визуализации: микроскопической линейки (10 мкм) и стальной линейки (0,5 мм). Пространственное разрешение схемы с использованием объектива с $F=58$ мм составляет ~ 5 мкм. Пространственное разрешение схемы с использованием собирающей линзы с $F=500$ мм составляет ~ 12 мкм. При этом она дает возможность визуализировать большую по площади область.



1 – нанопорошок алюминия на подложке, 2 – горизонтальный линейный транслятор, 3 – вертикальный линейный транслятор, 4, 10 – поворотные зеркала, 5 – объектив (линза), 6 – усилитель яркости, 7 – линза, 8 – механический затвор, 9 – инициирующий лазер, 11 – полосовой фильтр, 12 – объектив USB-камеры

Рисунок 4.62 – Фрагменты экспериментальной установки для горизонтальной визуализации



a – лазерный монитор на рисунке 4.62, *г* с объективом Гелиос-44М; *б, в* – лазерный монитор на рисунке 4.62, *б* с линзой $F=500$ мм

Рисунок 4.63 – Изображения микроскопической (*a*) и стальной линейки (*б, в*)

4.10. Характеристики нано- и микропорошков металлов

В работе использовался нанопорошок алюминия, полученный путем электрического взрыва алюминиевой проволоки в аргоне на установке, разработанной в Томском политехническом университете [351]. Аналогичный нанопорошок коммерчески доступен от компании «Передовые порошковые технологии» [352]. Параметры активности нанопорошка алюминия в работах [285, 286]: температура начала окисления 450 °С, степень окисления 63,8 %, максимальная скорость окисления 0,13 мас. %/°С, удельный тепловой эффект 4995 Дж/г. Распределение частиц по размерам близкое к нормальному логарифмическому с максимумом 120 нм. Содержание металлических примесей в нанопорошке не превышало 1,0 мас. %. Распределение частиц по размерам измеряли с помощью анализатора распределения частиц по размерам Shimadzu Nano SALD-7101 в среде изопропанола (99,99 %). Распределение частиц по размеру для исследованных порошков представлено на рисунке 4.64.

В последующих работах применялись нанопорошки алюминия и железа и микропорошки алюминия и железа. Распределение частиц по размерам было близким к логнормальному с максимумом 80 нм для наноAl, 2 мкм для микроAl, 110 нм для наноFe и 1 мкм для микроFe. Содержание металлических примесей в порошках не превышает 0,2 мас. %. Микроскопические изображения, полученные с использованием электронного просвечивающего микроскопа высокого разрешения Jeol JEM-2200FS, приведены на рисунке 4.65.

Микро- и нанопорошки смешивались в пропорциях, приведенных в таблице 4.2. Результаты термографического анализа для использованных смесей порошков представлены на рисунке 4.66. Использовался термоанализатор SDT Q600. Образцы анализировались при нагревании со скоростью 10 градусов в минуту в атмосфере воздуха, точность измерения составляла $\pm 1,8$ %. Из термограмм следует увеличение энергетического эффекта на 14–27 % в смесях с нанопорошком железа по сравнению со смесями нанопорошка алюминия без добавок.

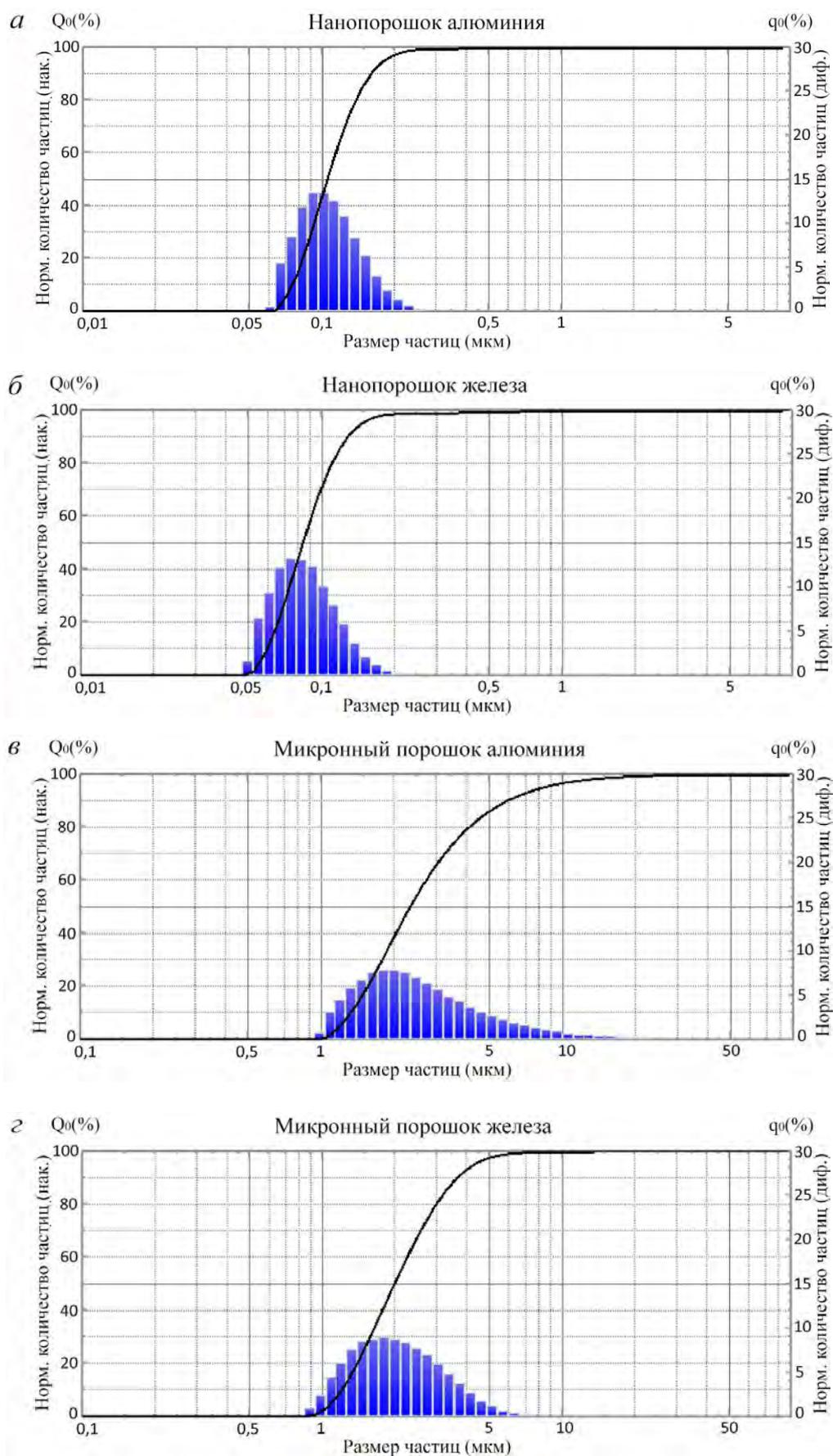


Рисунок 4.64 – Распределение частиц по размерам для нанопорошка алюминия (а), нанопорошка железа (б), микропорошка алюминия (в) и микропорошка железа (г)

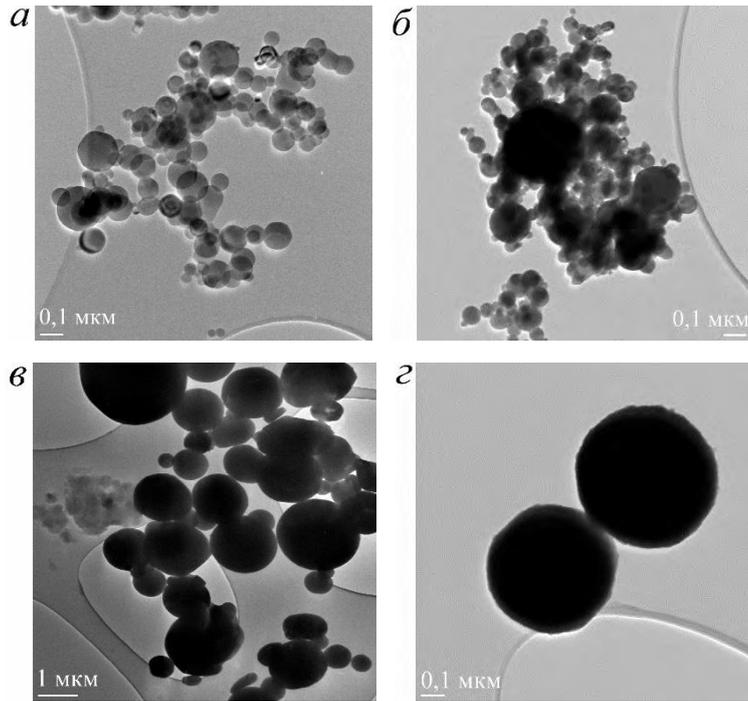


Рисунок 4.65 – Данные микроскопии наночастиц алюминия (а) и железа (б),
микрочастиц алюминия (в) и железа (г)

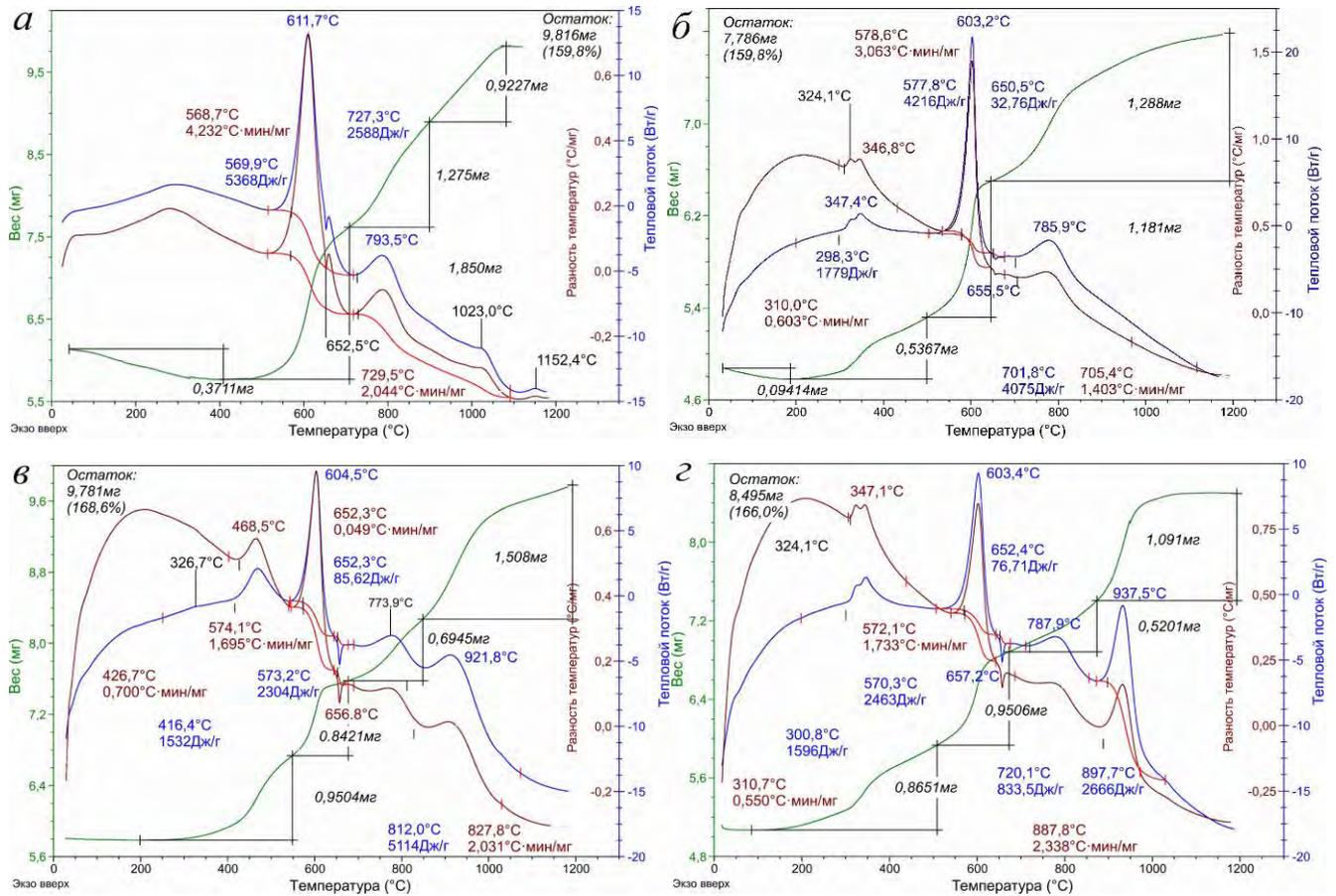


Рисунок 4.66 – Термограммы nanoAl (а), nanoAl+nanoFe (б), nanoAl+микроAl+nanoFe (в)
nanoAl+микроAl+микроFe (г)

Таблица 4.2 – Составы смесей нано- и микропорошков металлов

Смесь	Состав	наноAl	микроAl (АСД-6М)	наноFe	микроFe (P-10)
		мас. %			
1	наноAl	100	–	–	–
2	наноAl+наноFe	60	–	40	–
3	наноAl+микроAl+наноFe	30	30	40	–
4	наноAl+микроAl+микроFe	30	30	–	40

Принцип лазерного мониторинга заключается в регистрации скоростной камерой усиленного по яркости отраженного от поверхности объекта излучения лазерной подсветки (самосопряженной или независимой). Поэтому возможность визуализации поверхности высокоэнергетических материалов во время горения с использованием лазерного монитора может ограничиваться коэффициентом отражения поверхности. Для исследования коэффициента отражения поверхности нанопорошков металлов с учетом угла обзора лазерного монитора применялась схема на рисунке 4.67 ($F=50$ см). В качестве измерителя мощности использовался прибор Ophir Orion PD300. Коэффициент отражения рассчитывался по формуле:

$$K_p = \frac{P_1}{P_0 \cdot k_{r1} \cdot k_1}, \quad (4.7)$$

где P_1 – измеренная мощность, пропорциональная излучению, отраженному от объекта; P_0 – мощность, измеренная на месте объекта; k_{r1} – коэффициент отражения светоделительной пластины СП1; k_1 – коэффициент пропускания линзы 1.

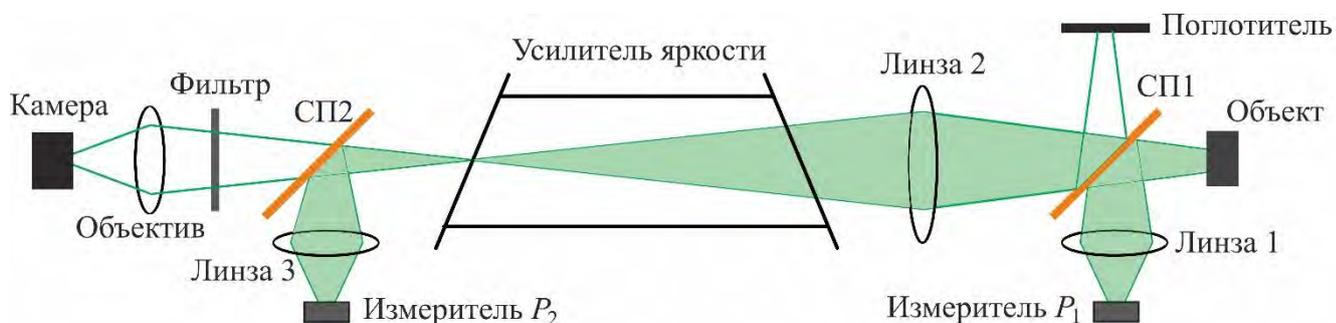


Рисунок 4.67 – Схема измерения коэффициента отражения поверхности нанопорошка и коэффициента усиления

Результаты измерений для исследованных смесей порошков (таблица 4.2) представлены в таблице 4.3. Анализ результатов показывает, что наибольший коэффициент отражения – 0,20–0,33 – имеет наноAl. Наименьшим коэффициентом отражения (меньше 0,1 %) обладают исходные порошки наноAl и наноAl+наноFe. После горения коэффициент отражения большинства смесей увеличивается, кроме коэффициента отражения смеси наноAl+микроAl+микроFe.

Таблица 4.3 – Коэффициент отражения объектов исследования

Смесь	Состав	K_p , %	
		Исходный порошок	Продукты сгорания
1	наноAl	0,084–0,086	0,20–0,33
2	наноAl+наноFe	0,088–0,091	0,118–0,131
3	наноAl+микроAl+наноFe	0,094–0,101	0,155–0,170
4	наноAl+микроAl+микроFe	0,134–0,140	0,112–0,137

С использованием схемы на рисунке 4.67 определен коэффициент усиления активной среды (ГРТ № 6, $P_0=24$ мВт) для объектов с различным коэффициентом отражения. Усредненные результаты измерений представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Коэффициент усиления активной среды

№	K_p , %	K_u , отн. ед.	№	K_p , %	K_u , отн. ед.
1	0,085±0,001	3126±36	4	0,125±0,012	2257±87
2	0,089±0,002	2764±19	5	0,162±0,008	1790±64
3	0,098±0,004	2533±88	6	0,265±0,065	1579±351

Коэффициент усиления рассчитывался по формуле:

$$K_u = \frac{P_2}{P_0 \cdot K_p \cdot k_{t1} \cdot k_2 \cdot k_{r2} \cdot k_3}, \quad (4.8)$$

где P_2 – измеренная мощность, пропорциональная усиленному излучению; k_{t1} – коэффициент пропускания светоделительной пластины СП1; k_2 – коэффициент

пропускания линзы 2; k_{r2} – коэффициент отражения светоделительной пластины СП2; k_3 – коэффициент пропускания линзы 3. Полученные данные показывают, что при исследовании поверхностей с малым коэффициентом отражения, таких как поверхности нанопорошков металлов, коэффициент усиления активной среды существенно зависит от мощности входного сигнала и составляет 1228–3162 при изменении коэффициента отражения поверхности в диапазоне 0,20–0,084 %.

4.11. Выводы по главе 4

Для визуализации поверхности нанопорошков металлов и их смесей в процессе высокотемпературного горения в диссертационной работе предложен ряд оптических систем на основе усилителя яркости и лазерной подсветки.

1. Традиционный лазерный монитор с независимым контролем температурных параметров и малой мощностью усиленного спонтанного излучения, усовершенствованный введением скоростного фотодиода для регистрации средней яркости изображений. Анализ яркости изображений лазерного монитора дает численную информацию о процессе изменения поверхности образца во время горения.

2. Лазерный монитор с увеличенной дистанцией мониторинга для исследования процессов, сопровождающихся разлетом продуктов сгорания.

В работе предложен лазерный монитор, в котором изображение формируется оптической схемой на основе линзы и вогнутого зеркала, которая дает возможность визуализировать процессы высокотемпературного горения на расстоянии до 50 см от элементов оптической схемы.

3. Лазерный монитор с увеличенной дистанцией мониторинга и поворотной платформой для исследования распространения фронта горения.

Дополнение зеркальной схемы лазерного монитора поворотной платформой позволило реализовать перемещение области наблюдения в процессе исследования поверхности горящего образца. Предложенная опция обеспечивает исследование однородности горения и образования продуктов по мере распространения фронта.

4. Лазерный монитор для визуализации горизонтальной поверхности, в том числе для исследования тонких слоев нанопорошков металлов.

В отличие от лазерных мониторов для исследования горения массивных навесок нанопорошков металлов, в предложенной конструкции излучение усилителя яркости и иницирующее излучение направляются на объект сверху. Использование соответствующего объектива позволяет получить различное увеличение и пространственное разрешение. Для визуализации горения нанопорошка алюминия впервые использована комбинированная схема, в которой иницирующий лазерный луч подавался на объект через объектив, формирующий изображение лазерного монитора. Схема позволила фокусировать излучение иницирующего лазера в зоне наблюдения лазерного монитора.

5. Методика исследования динамики процесса горения путем расчета корреляции изображений лазерного монитора.

Традиционно под методом цифровой корреляции изображений (DIC) понимается определение микроперемещений. В диссертационной работе предложено использовать расчет коэффициента корреляции изображений лазерного монитора как самостоятельный инструмент анализа изображений и в сочетании с анализом средней яркости изображений. Таким образом предложена измененная трактовка метода цифровой корреляции изображений, в которой основным информативным параметром является значение коэффициента корреляции, а не величина перемещения изображения. В сочетании с визуальным анализом использование методов цифровой обработки изображений лазерного монитора позволяет не только качественно, но и количественно оценивать характеристики горения и сравнивать характер протекания различных процессов.

6. Лазерный монитор с независимой подсветкой от второго активного элемента на парах бромида меди (бистатический лазерный монитор).

Предложенный в работе бистатический лазерный монитор построен на основе активных элементов на парах бромидам меди с независимым нагревом, имеющих малую мощность излучения, что делает перспективным применение подобной

системы с независимой лазерной подсветкой для исследования веществ, чувствительных к свету. Применение двухпроходowego излучения активной среды в качестве излучения подсветки позволяет упростить оптическую схему бистатического лазерного монитора и использовать один источник питания для заряда рабочих емкостей лазера подсветки и усилителя яркости.

7. Двухканальный лазерный монитор с возможностью наблюдения в двух областях образца одновременно или в одной области с различным увеличением и пространственным разрешением.

Подход в построении двухканального лазерного монитора отличается от бистатического лазерного монитора логикой синхронизации. В бистатическом лазерном мониторе излучение лазера подсветки, отраженного от поверхности объекта исследования, усиливается усилителем яркости. В двухканальном лазерном мониторе, наоборот, инверсия населенностей лазерных уровней в усилителях яркости должна существовать в разные моменты времени.

8. Схема лазерной подсветки со скоростной видеорегистрацией изображений горящего образца с применением непрерывного и импульсного лазеров, в том числе в составе лазерного монитора.

В качестве нового варианта системы визуализации предложено совместное использование лазерного мониторинга и лазерной подсветки. В этом случае излучение лазерного монитора служит излучением подсветки. Изображение записывается двумя камерами: одна камера регистрирует изображение лазерного монитора, вторая камера – изображение, формируемое излучением подсветки и стандартным объективом. Метод лазерной подсветки может быть интегрирован как в моностатический, так и бистатический лазерный монитор.

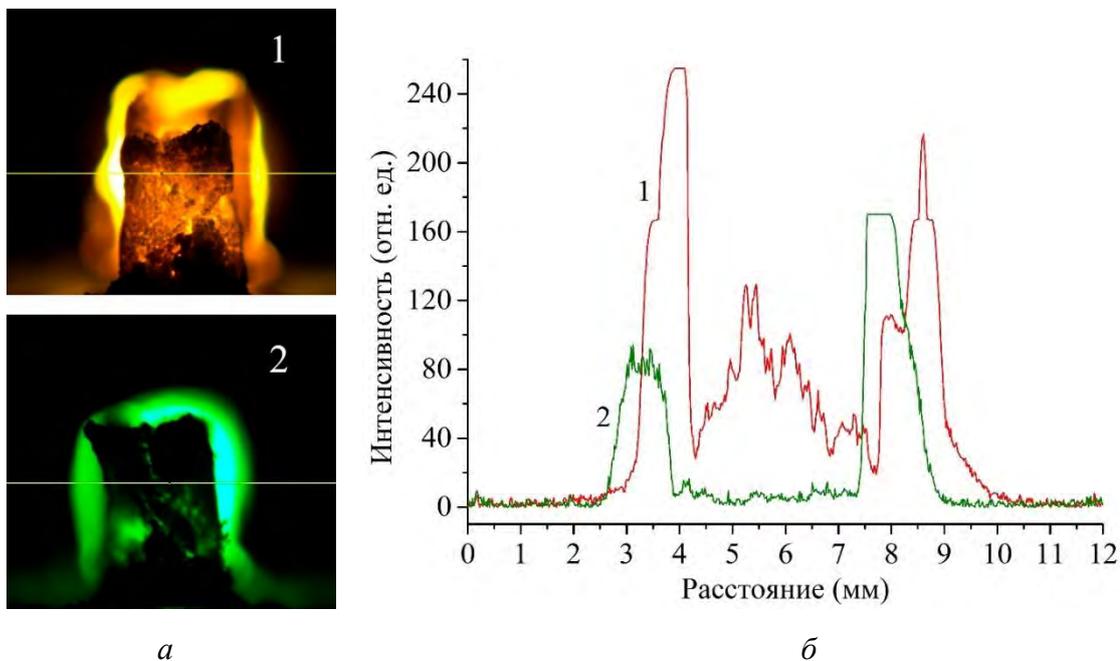
Глава 5. Визуализация горения нанопорошков металлов и их смесей с использованием лазерного монитора

5.1. Особенности использования лазерного монитора для исследования горения нанопорошков металлов и смесей на их основе

Возможность визуализации процессов, экранированных интенсивным собственным свечением, и наблюдение объектов сквозь пламя или плазму с помощью лазерных мониторов доступны благодаря естественной высокой монохроматичности излучения, генерируемого активной средой на самоограниченных переходах в парах металлов, и, соответственно, высокой спектральной селективности усилителя яркости [57–62]. Таким образом, энергия излучения и усиление сосредоточены в узкой спектральной линии и узком временном интервале, что обеспечивает значительно более высокую интенсивность сигнала, чем интенсивность излучения большинства тепловых источников на той же длине волны и для того же временного интервала.

При известных параметрах усилителя яркости и оптической схемы лазерного монитора, с использованием формулы Планка можно оценить максимальную температуру объекта наблюдения, при которой энергия фоновой засветки не оказывает влияния на работу усилителя яркости, а значит, на качество получаемого изображения. В случае, когда источником фоновой засветки является сам объект наблюдения, в частности, горящий высокоэнергетический материал, важно знать толщину плазменного слоя, возникающего у поверхности горящего порошка. На рисунке 5.1 приведены фотографии образцов нанопорошка алюминия, соответствующие наибольшей яркости во время горения, и распределения яркости, полученные с использованием программы ImageJ вдоль пунктирных линий. Фотография сделана с торца образца, т.е. показывает толщину светящегося слоя вдоль длинной стороны, вдоль которой обычно осуществляется визуализация с помощью лазерного монитора. В случае, представленном на рисунке 5.1, *a* (1),

перед камерой (рисунок 4.1) устанавливался нейтральный светофильтр НС-2 [341], в случае, представленном на рисунке 5.1, *a* (2) устанавливался узкополосный фильтр с полосой пропускания 510 ± 5 нм. Из полученных данных следует, что толщина светящегося слоя составляет ~ 2 мм.



1 – фильтр НС2, 2 – фильтр 510 ± 5 нм

Рисунок 5.1 – Характерное изображение образца нанопорошка алюминия с торца в момент визуально наибольшей яркости (*a*) и распределение яркости (*б*)

Уровень фоновой засветки определяется температурой источника засветки или объекта наблюдения. Величина интенсивности равновесного поля излучения определяется формулой Планка:

$$U(T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} - 1}, \quad (5.1)$$

где h – постоянная Планка, ν – основная частота спектральной линии, c – скорость света, k – постоянная Больцмана, T – температура источника засветки.

Выражение (5.2) описывает спектральную плотность мощности излучения с единицы объема. Для определения энергии излучения на данной длине волны необходимо умножить спектральную плотность излучения на ширину

спектральной линии (доплеровское уширение) и на объем области источника засветки, ограниченный пучком излучения усилителя яркости. Таким образом, энергия излучения источника засветки на данной длине волны (с учетом уширения) определяется выражением:

$$E(T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \cdot \Delta\nu \cdot V. \quad (5.2)$$

Энергия излучения, определяемая по формуле (5.2), соответствует излучению со всего выделенного объема (рисунок 5.2, а), который определяется по формуле:

$$V = \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot l \cdot (d_1^2 + d_1 d_2 + d_2^2). \quad (5.3)$$

Влияние на изображение усилителя яркости может оказать только та часть, которая будет попадать в усилитель яркости. Долю этого излучения возможно учесть, умножив энергию со всего объема на отношение активной площади слоя засветки (площадь круга S_1 диаметром d_1) к полной площади слоя засветки:

$$E(T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \cdot \Delta\nu \cdot V \cdot \frac{S_1}{S_{\text{total}}} = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \cdot \Delta\nu \cdot V \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{S_{\text{total}} \cdot 4}. \quad (5.4)$$

Диаметр d_1 выражается через фокусное расстояние F , диаметр пучка излучения лазерного монитора d и диаметр области наблюдения d_2 как

$$d_1 = d_2 + \frac{d \cdot l}{F}. \quad (5.6)$$

В случае, когда объем светящейся плазмы ограничен с одной стороны объектом исследования, общая площадь области засветки определяется как

$$S_{\text{total}} = \pi \cdot l \cdot \left(\frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} \right) + \pi \cdot \frac{d_1^2}{4}. \quad (5.5)$$

Собственные шумы усилителя определяются по формуле [59]:

$$E_{\text{sn}} = h \cdot \nu \cdot \Delta\nu \cdot \tau \cdot \left(\frac{D^2}{\lambda \cdot L} \right)^2, \quad (5.7)$$

где $\Delta\nu$ – полуширина спектральной линии, τ – время существования инверсии, D – диаметр усиливающей среды, L – длина усиливающей среды, λ – длина волны.

Фоновая засветка не будет оказывать влияние на изображения лазерного монитора, если выполняется неравенство:

$$\frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \cdot \Delta\nu \cdot V \cdot \frac{S_1}{S_{\text{total}}} < h \cdot \nu \cdot \Delta\nu \cdot \tau \cdot \left(\frac{D^2}{\lambda \cdot L} \right)^2 \quad (5.8)$$

На рисунке 5.2, б приведены результаты модельных расчетов энергии засветки при различных температурах объекта и условиях эксперимента. Собственные шумы усилителей яркости составляли 5,5 пДж (ГРТ № 1), 3,5 пДж (ГРТ № 5) и 12,4 пДж (ГРТ № 6) при $d = D = 1$ см (ГРТ №№ 1, 5) и $d = D = 1,5$ см (ГРТ № 6).

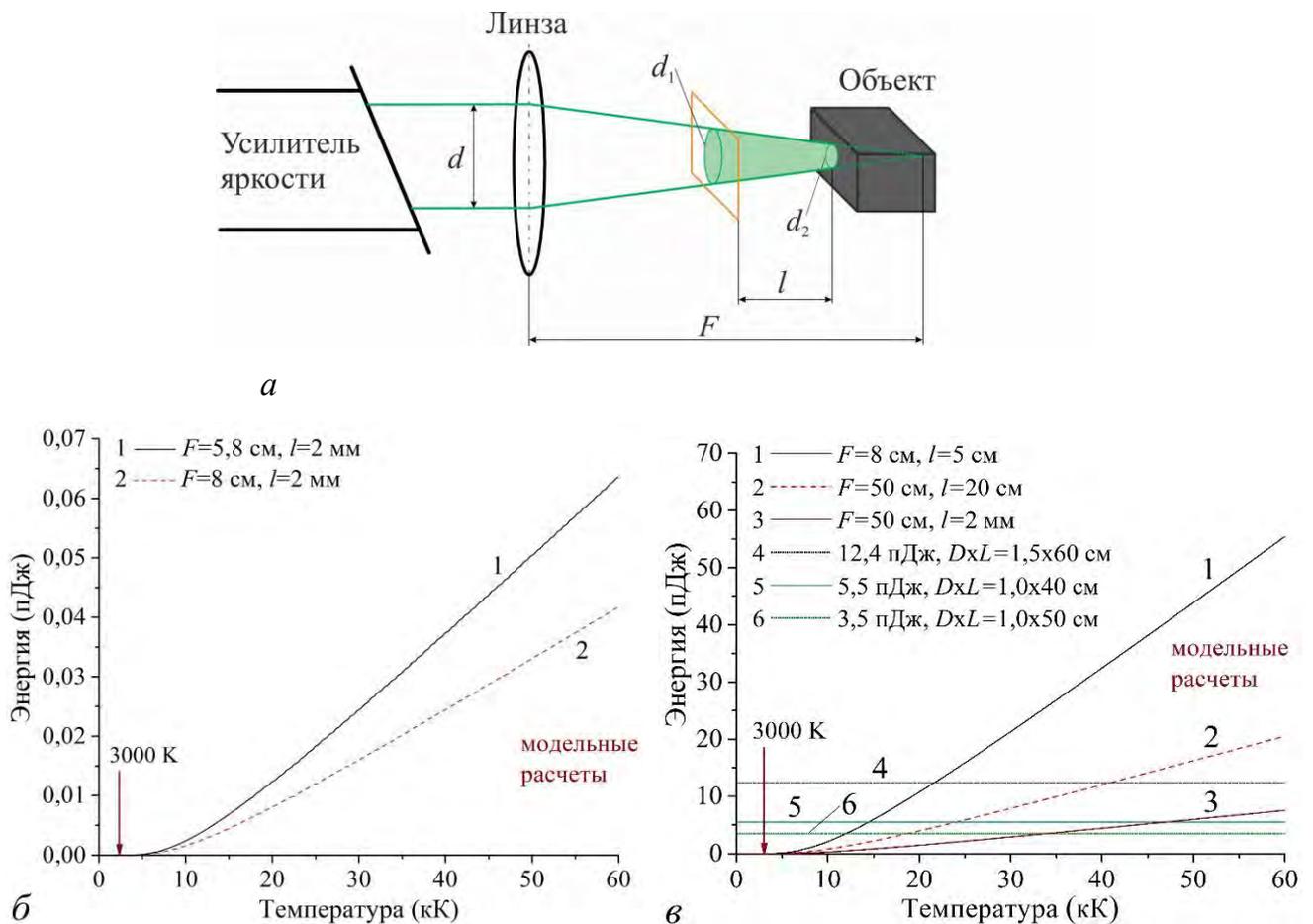


Рисунок 5.2 – Фрагмент оптической схемы лазерного монитора (а) и результаты модельной оценки влияния высокотемпературного источника фоновой засветки (б, в)

Расчет засветки проводился для следующих случаев:

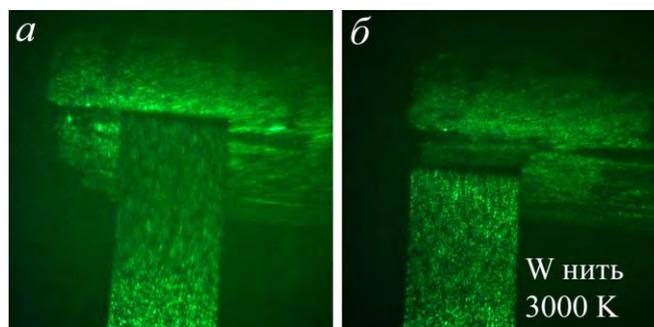
- фокусное расстояние $F=8$ см (объектив Триплет), толщина светящегося слоя 2 мм и 5 см (при разлете продуктов сгорания термитных смесей);

- фокусное расстояние линзы $F=5,8$ см (объектив Гелиос 44М), толщина светящегося слоя 2 мм;

- фокусное расстояние линзы $F=50$ см, толщина светящегося слоя 2 мм и 20 см (при разлете продуктов сгорания модельного ВЭМ).

Результаты расчетов показывают, что поверхность, нагретая до 3000 К, в зависимости от толщины слоя создает засветку, имеющую энергию $10^{-16}-10^{-15}$ Дж, которая в 10^4-10^5 раз меньше собственных шумов усилителя яркости и не должна оказывать влияния на изображения лазерного монитора.

Для экспериментальной проверки влияния фоновой засветки с яркостной температурой 3000 К, проведены эксперименты с эталонным объектом – вольфрамовой нитью накаливания (лампа СИ8-200). Визуализация осуществлялась с использованием лазерного монитора на рисунке 4.45 в режимах без лазерной подсветки и с лазерной подсветкой. Результаты визуализации приведены на рисунке 5.3. Визуально, поверхность нити накаливания хорошо видна, наличие фоновой засветки не препятствует наблюдению поверхности. Расчет коэффициента корреляции изображений лазерного монитора дал значения $\leq 3,9$ % по отношению к среднему значению для случая без подсветки и 5,12 % для случая с синхронной лазерной подсветкой. Это доказывает отсутствие влияния засветки, создаваемой поверхностью металла, нагретого до температуры 3000 К.



a – лазерный монитор без подсветки, *б* – лазерный монитор с подсветкой

Рисунок 5.3 – Изображение вольфрамовой нити накаливания во время горения

Для усиления изображения уровень сигнала должен превышать как собственный шум усилителя яркости, так и сигнал от фоновой засветки в пределах

полосы пропускания усилителя яркости. Экспериментально показано, что энергии в импульсе спонтанного излучения 2–10 мкДж достаточно для получения изображений. При наблюдении объектов с высоким коэффициентом отражения, доля возвращенного излучения достигает 60 % от величины сверхизлучения; при наблюдении поверхности нанопорошков металлов, эта величина составляет менее 0,5 % (таблица 4.3). Даже в этом случае энергия излучения, поступившего на вход усилителя яркости, на несколько порядков превышает собственные шумы усилителя и уровень фоновой засветки.

В работе [131] проведена оценка максимальной температуры источника фоновой засветки, при которой уровень свечения на длине волны 510,6 нм сопоставим с собственными шумами усилителя яркости. Источник фоновой засветки располагался между линзой, формирующей изображение и объектом наблюдения. Расчеты показали, что плазма не создает помех для визуализации до температуры 45000 К.

При наблюдении газовых разрядов [101–103, 115–119, 135, 136], зон взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом [109–114], процессов высокотемпературного горения смесей крупнодисперсных порошков металлов [131, 144] к интенсивности излучения лазерного монитора требований, как правило, не предъявляется, так как интенсивность протекания самих процессов и выделяемая энергия существенно больше, чем эффект от воздействия излучения лазерного монитора. Как правило, стоит задача получения изображений наиболее высокой четкости. На рисунке 5.4 приведены фотографии лабораторного лазерного монитора (ГРТ № 2, таблица 2.3), и внешний вид процесса СВС. На рисунке 5.5 приведены изображения, полученные с данным лазерным монитором и опубликованные в работе [131]. При исследовании смесей крупнодисперсных порошков с использованием лазерного монитора не наблюдалось изменения поверхности или неконтролируемого инициирования горения образца под воздействием излучения лазерного монитора.

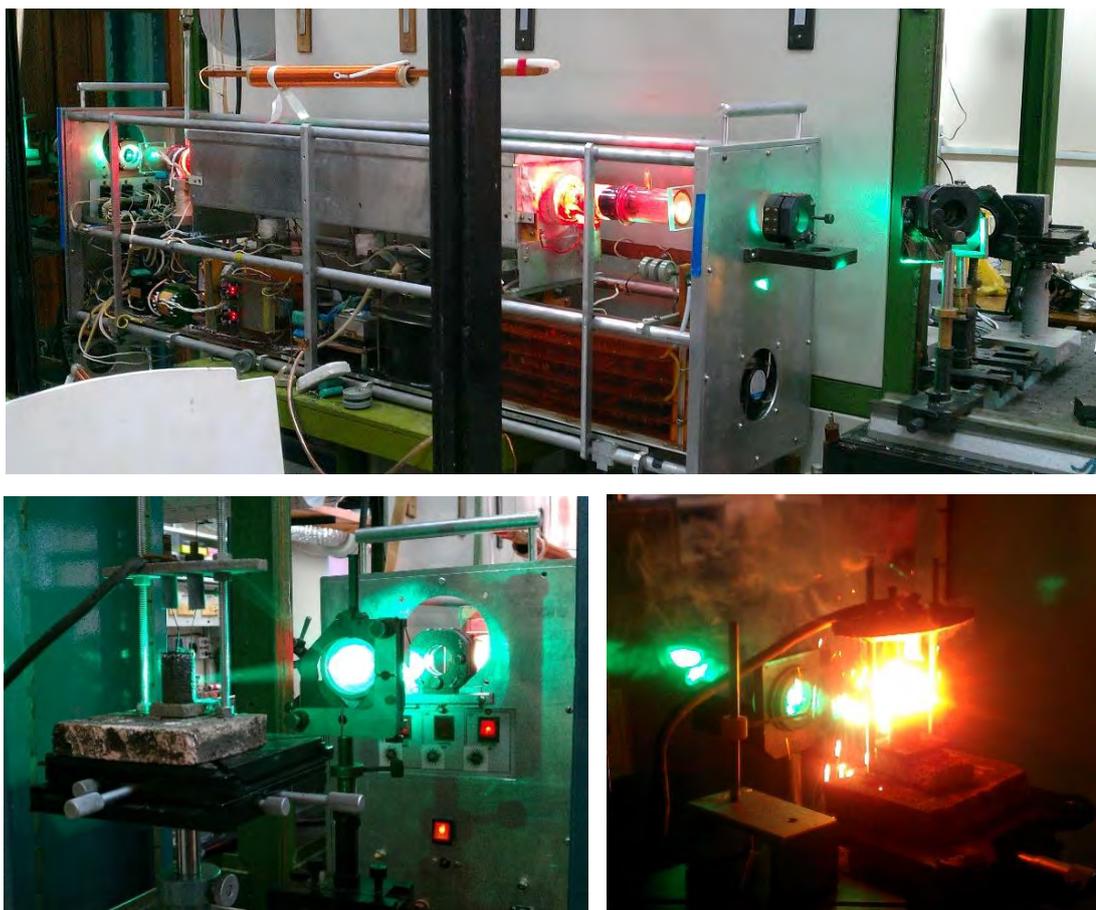
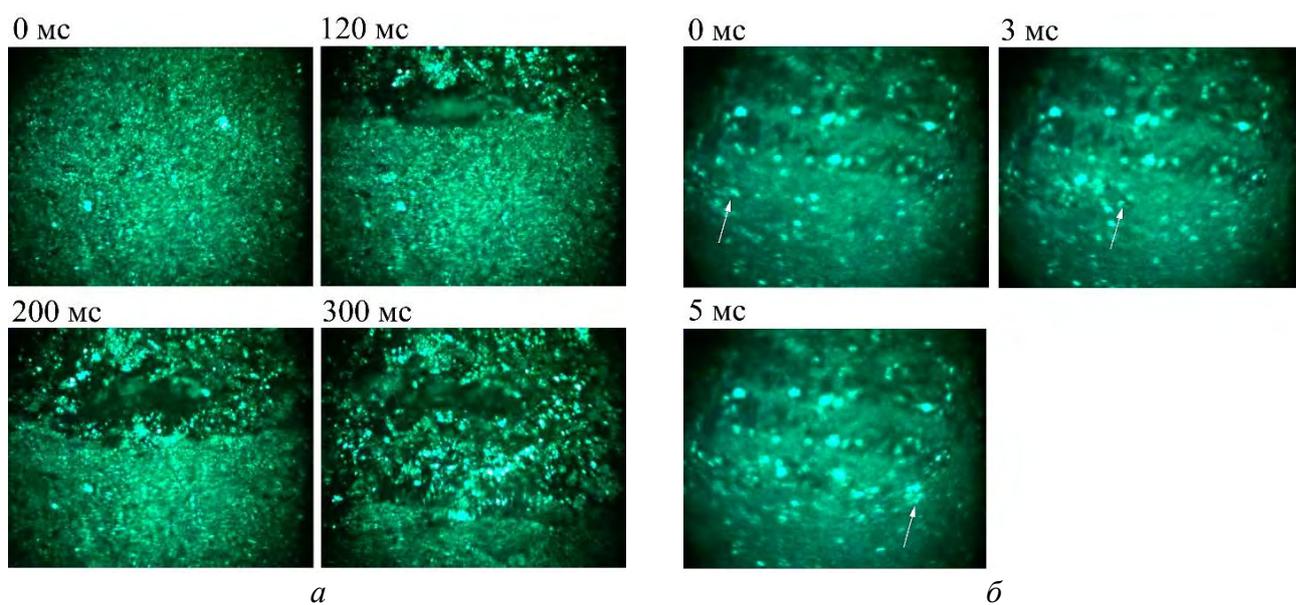


Рисунок 5.4 – Внешний вид эксперимента по исследованию горения смесей крупнодисперсных порошков металлов, результаты которого представлены в работе [131]



Стрелкой показано распространение фронта

Рисунок 5.5 – Изображение поверхности смесей $\text{FeTiO}_3+\text{SiO}_2+\text{Si}+\text{Al}+\text{C}$ (а) и $\text{Ni}+\text{Al}$ (б) в различные моменты горения [131]

При работе с нанопорошками металлов следует принимать во внимание вероятность их неконтролируемого воспламенения под действием освещающего излучения лазерного монитора. Для нанопорошка металла порог воспламенения, измеренный с использованием сфокусированного излучения лазера на парах бромида меди, составляет примерно 250 мВт/мм^2 при времени воздействия 2 мс. При использовании усилителя яркости с мощностью сверхизлучения 500 мВт и областью наблюдения диаметром 0,7 мм плотность мощности в области наблюдения составит 1300 мВт/мм^2 , что существенно выше порога воспламенения. При увеличении области наблюдения плотность мощности уменьшается, но следует иметь в виду, что излучение лазерного монитора действует постоянно в течение всего исследования, оказывая тепловой и ионизационный эффекты. Кроме того, в процессе настройки системы объект может оказаться вблизи фокальной плоскости, что приведет к неконтролируемому воспламенению. Таким образом, при использовании данного усилителя яркости невозможно наблюдать малые области, что востребовано при исследовании горения нанопорошков металлов. При исследовании нанопорошков металлов плотность мощности излучения, освещающего область наблюдения, не должна превышать 130 мВт/мм^2 . Это значение было получено нами экспериментально в традиционной схеме лазерного монитора с областью наблюдения диаметром 0,7 мм.

В первой работе по использованию лазерного монитора [125], выполненной с участием автора диссертации, была показана возможность наблюдения живых клеток без их деструкции с использованием ГРТ № 1 (таблица 2.3), имеющей относительно малую среднюю мощность сверхизлучения (60–80 мВт). Перспективность использования усилителя яркости на парах бромида меди с малой мощностью сверхизлучения (100 мВт) для исследования биообъектов отмечалась также в работе [353]. С использованием маломощного усилителя яркости с ГРТ № 1 нами впервые визуализировалось горение нанопорошка алюминия [285]. Воздействие излучения усилителя яркости не приводило к самопроизвольному воспламенению образца нанопорошка при оптимальном для наблюдения

расстоянии между объектом и объективом 1 (рисунок 4.12, б). При этом во время настройки четкости изображений могло произойти воспламенение в случаях, когда образец оказывался в фокусе объектива.

5.2. Исследование горения нано- и микропорошков металлов и их смесей с использованием традиционного лазерного монитора

При исследовании горения часто применяются конические навески нанопорошков, т.к. их относительно просто приготовить. В работе [286] мы рассматриваем визуализацию горения таких порошков с использованием лазерного монитора. Процесс горения образцов нанопорошка алюминия конической и вытянутой прямоугольной формы имели различия. Конические образцы горели почти равномерно, скорость распространения первого и второго фронтов волны горения была примерно одинаковой и составляла порядка 1 мм/с. К сожалению, для конических образцов оценка скорости горения затруднена из-за неоднородного распространения волн горения. Просыпание, рассыпание и усадка нанопорошка алюминия во время его горения затрудняют точное определение положения фронта волны горения. Поэтому, основные исследования горения нанопорошка алюминия с помощью лазерного монитора были выполнены на образцах в форме параллелепипеда с уплотненной структурой.

На рисунке 5.6 приведены кадры скоростной съемки процесса горения нанопорошка алюминия в собственном свете [285]. Запись изображений осуществлялась скоростной камерой Fastec HiSpec 1. Видеозапись запускалась, когда фронт горения достигал области наблюдения. Видеозапись в собственном свете показывает две стадии горения нанопорошка алюминия. После зажигания по образцу распространяется тепловая волна с относительно низкой температурой порядка 600–800 °С (тусклое свечение). Затем процесс горения ускоряется, переходит в режим теплового взрыва и сопровождается повышением температуры до 1800 °С (яркое свечение), согласно данным, полученным с применением ИК-камеры (рисунок 5.7). Учитывая, что 1800 °С – это предел измерения используемой

ИК-камеры, температура в локальных точках могла быть выше. Из литературных источников известно, что температура горения может достигать $2400\text{ }^{\circ}\text{C}$ [212–216].

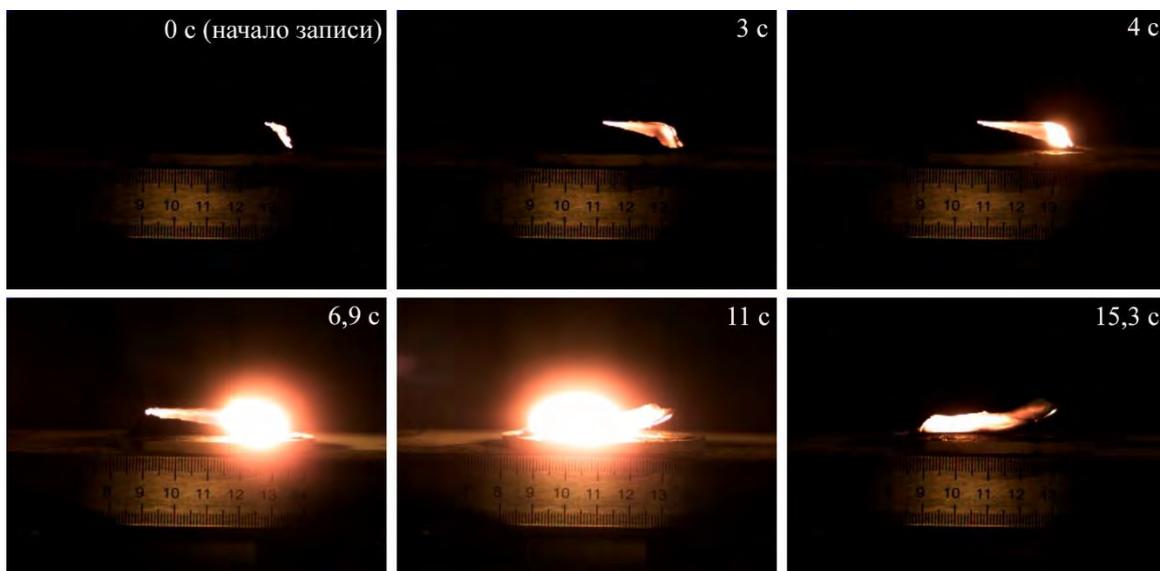


Рисунок 5.6 – Изображения процесса горения нанопорошка алюминия в собственном свете

Из полученной видеозаписи (рисунок 5.6) следует, что волна горения сначала распространяется вдоль верхней части образца, а затем сверху вниз. Таким образом, скорости распространения волны горения могут заметно отличаться для разных частей образца. Обработка видео показала, что скорость распространения фронта горения в вертикальном направлении на первой стадии процесса составляла $0,77\text{ мм/с}$, а вдоль верхней части образца – $5,35\text{ мм/с}$. Наблюдать горизонтальное распространение первой волны горения вблизи подложки было затруднительно из-за влияния второй более яркой стадии горения. В то же время, нам удалось оценить, что скорость распространения фронта первой волны горения вдоль верхней части образца более чем в два раза выше, чем скорость распространения вдоль нижней части образца. При регистрации горения без использования внешних источников света (лазерной подсветки или лазерного монитора) мы смогли лишь приблизительно оценить временной интервал между первой и второй волнами горения и скорость распространения фронта горения на второй стадии, поскольку было трудно определить точное положение фронта второй высокотемпературной волны горения за счет яркого теплового излучения.

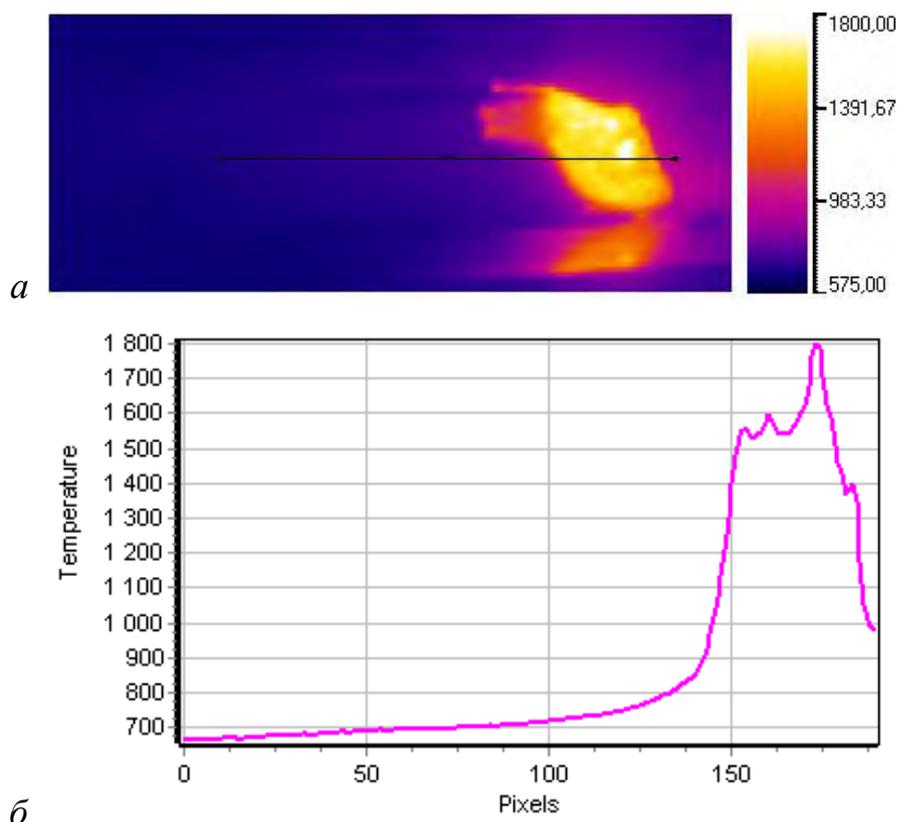
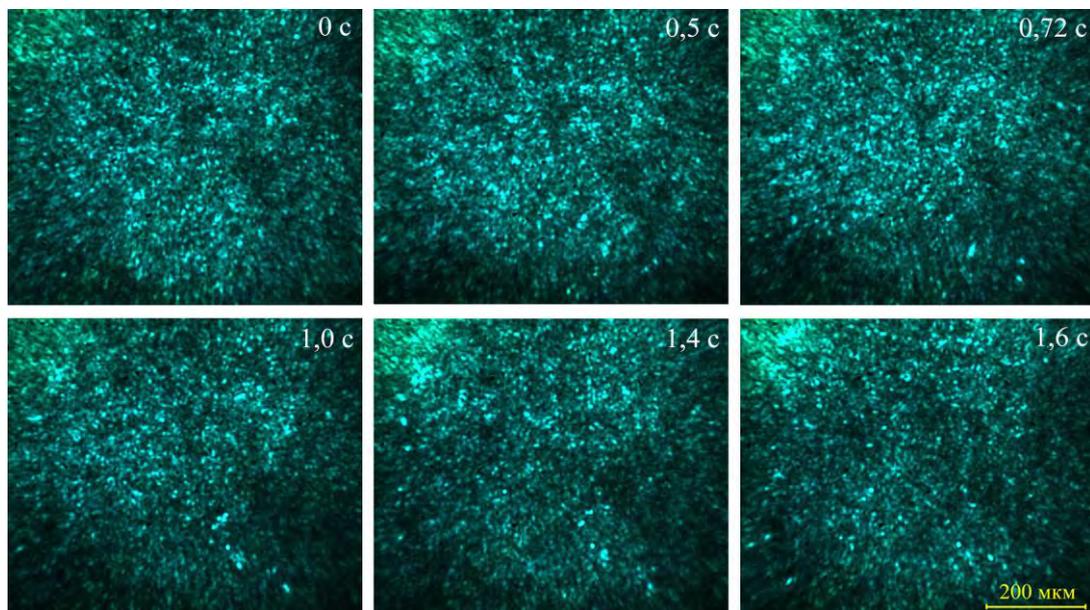


Рисунок 5.7 – Изображение процесса горения нанопорошка алюминия, зарегистрированное ИК-камерой (а) и профиль температуры (б) вдоль линии, обозначенной на рисунке (а)

На рисунках 5.8–5.10 приведены кадры скоростной съемки, полученные с использованием лазерного монитора при исследовании образцов нанопорошка алюминия, горение которых имеет различный характер. В данной части работы для визуализации горения нанопорошка алюминия использовалась схема, приведенная на рисунке 4.12, в, в которой изображение формировалось 80 мм объективом. Площадь наблюдаемой области составляла $\sim 0,5 \text{ мм}^2$. Таким образом, размер поля зрения лазерного монитора значительно превышал ширину фронта волны горения.

Так как нанопорошки металлов имеют тенденцию к агломерации, структура поверхности образца, наблюдаемая до начала процесса горения (время 0 с на рисунках 5.8, 5.9), представляет собой группу агломератов с размерами в диапазоне 5–30 мкм [354]. В действительности, структура поверхности образца после первой волны горения (рисунок 5.8) практически не отличается от исходной, прохождение волны горения отчетливо видно в динамике, то есть на видеозаписи. Первая волна горения наблюдается как небольшое возмущение на поверхности образца, похожее

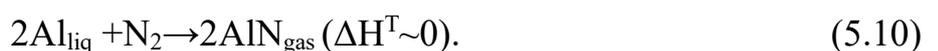
на небольшую волну. Возмущение, наблюдаемое на первой стадии горения, должно быть вызвано истечением газа с поверхности образца. Когда водород, содержащийся в нанопорошке алюминия, сжигается, образуется водяной пар, который выходит из зоны горения. Этот поток пара приводит к небольшому возмущению на поверхности образца, то есть к движению частиц, которое наблюдается через лазерный монитор. Этот результат подтвердил утверждение, что участие нанопорошка алюминия в первой стадии горения является минимальным, и происходит, в основном, выгорание накопленного водорода [226].



Скорость распространения 0,35 мм/с

Рисунок 5.8 – Изображения поверхности нанопорошка (первая стадия горения), полученные с помощью лазерного монитора в различные моменты времени

После первой волны горения никаких изменений в структуре поверхности образца не наблюдается до начала второй стадии горения. В случае на рисунке 5.9 распространение второй волны горения происходит по поверхности. В случае на рисунке 5.10, вторая волна проявляет себя как разрыв поверхности. Во время видимой паузы (индукционный период) происходят следующие реакции:



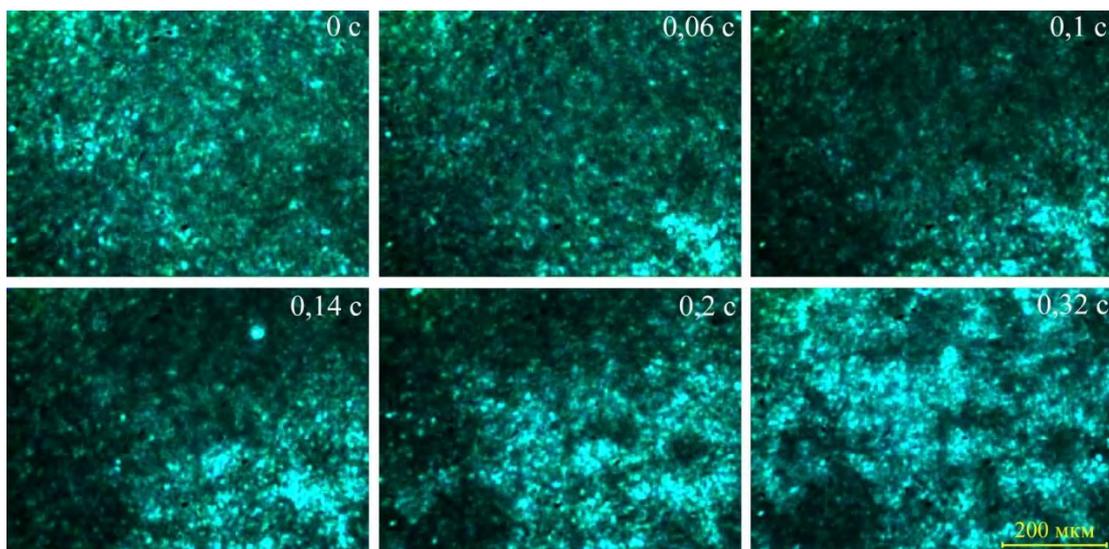


Рисунок 5.9 – Поверхность горения нанопорошка алюминия (вторая стадия) в различные моменты времени. Скорость распространения фронта горения 1,88 мм/с

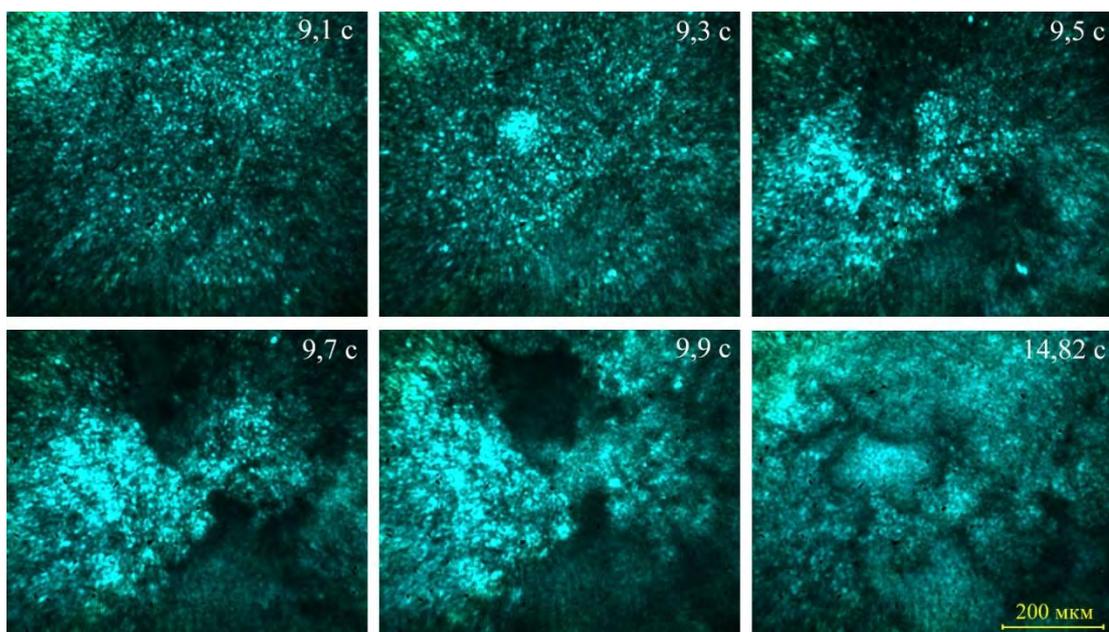


Рисунок 5.10 – Поверхность горения нанопорошка алюминия (вторая стадия и остывание) в различные моменты времени от начала горения

Реакция (5.10) протекает с высоким выходом при температуре выше 800 °С: газообразный продукт реакции образуется на границе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_{3\text{sol}}\text{-Al}_{\text{liq}}$, создает давление и разрушает оксидную оболочку [226]. Процесс горения переходит в газовую фазу, т.е. резко ускоряется, что соответствует переходу ко второй стадии горения алюминия. Поскольку образец изначально был относительно рыхлым, на первой стадии не происходило значительного растрескивания. Вероятно,

нанопорошок алюминия крошился и заполнял появляющуюся микротрещину. Вторая стадия высокотемпературного горения приводит к спеканию образца (плотность порошка увеличивается примерно с 0,2 до 1,2–1,5 г/см³ [226]), в результате чего поверхность образца в большинстве случаев растрескивается. Разлом образца в случае на рисунке 5.10 произошел именно во время второй волны горения, поскольку ее фронт представлял собой границу раздела между спеченной и рыхлой частями образца. Как видно на рисунке 5.6, конец образца может приподниматься во время второй стадии горения, поэтому, когда спеченный конец стал достаточно тяжелым, он привел к разрыву образца в наиболее механически слабой области. Из этого наблюдения можно сделать вывод, что значительное спекание нанопорошка алюминия происходит при прохождении фронта второй волны горения.

После второй волны горение качество изображений лазерного монитора значительно ухудшается. Деформация образца приводит к расфокусировке и, как следствие, ухудшению резкости изображений, что ограничивает возможности лазерного монитора наблюдать изменения структуры поверхности. В работе [355] отмечается формирование кристаллов-вискеров на второй стадии горения. Кристаллы присутствуют и в продуктах сгорания нанопорошка, использованного в нашей работе. На рисунке 5.11 приведены микрофотографии продуктов сгорания нанопорошка алюминия с различным увеличением, полученные с помощью электронного микроскопа Jeol JSM-840.

Кристаллы-вискеры имеют размер 0,5–1,5 мкм, и для их детального анализа недостаточно оптического разрешения лазерного монитора. Согласно результатам работы [126], применение объективов от оптического микроскопа обеспечивает разрешение лазерного проекционного микроскопа ~0,8 мкм. В случае исследования горения нанопорошков металлов, применение подобных объективов практически невозможно по причине короткого фокусного расстояния и близкого расположения к объекту наблюдения. Высокая температура при горении нанопорошков металлов и разбрызгивание продуктов горения приведет к физическому повреждению

объектива. Короткофокусный объектив дает высокую плотность мощности вблизи фокальной плоскости, что существенно повысит вероятность неконтролируемого воспламенения. Кроме того, малое фокусное расстояние даст значительную расфокусировку изображения при меньших сдвигах поверхности образца в ходе горения. Поэтому, используемый в работе объектив является компромиссным вариантом, и оптического разрешения 5 мкм, которое он обеспечивает, достаточно для исследования поверхности образца во время горения.

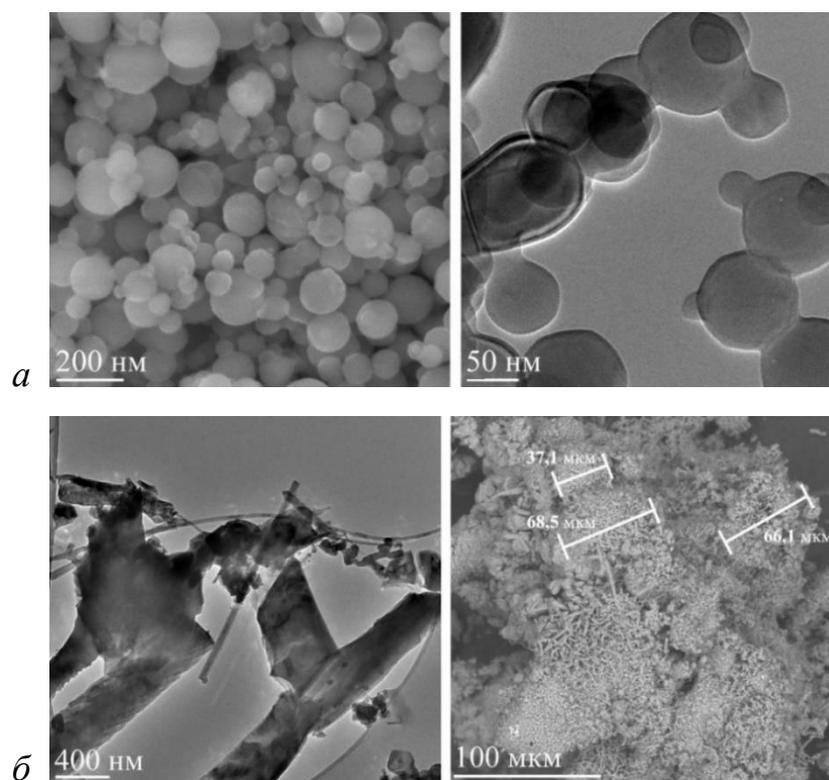


Рисунок 5.11 – Микрофотографии исходного нанопорошка алюминия (а) и его продуктов сгорания на воздухе (б), полученные с помощью электронного микроскопа

Анализ видеозаписей, полученных лазерным монитором, позволяет определить скорость распространения волн горения в вертикальном и горизонтальном направлениях. Оцененные временные параметры приведены в таблице 5.1. Из-за практически вертикального распространения фронта первой волны горения в области наблюдения лазерного монитора, значения скорости распространения первой волны горения в горизонтальном направлении в

таблице 5.1 отсутствуют. Данные, полученные с использованием лазерного монитора, показали, что время между первой и второй стадиями горения (индукционный период) варьируется, в основном, от 2 до 8 с для образцов прямоугольной формы. Максимальный индукционный период 14 с был зарегистрирован для образца конической формы. Скорость распространения фронта первой волны горения варьировалась в диапазоне от 0,4 до 0,8 мм/с для проведенной серии экспериментов. Скорость распространения второй волны горения составляла от 0,6 до 2,9 мм/с в вертикальном направлении и от 0,8 до 2,4 мм/с в горизонтальном направлении.

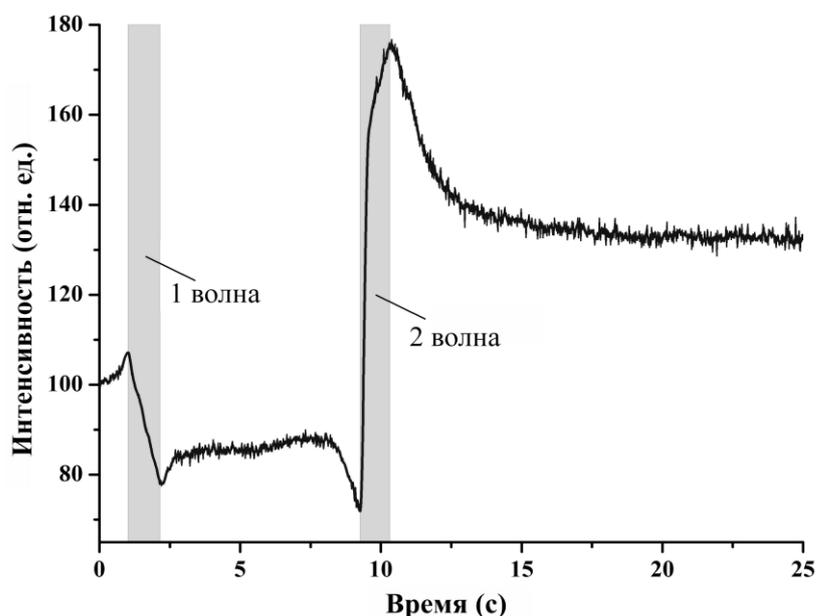
Таблица 5.1 – Временные параметры горения нанопорошка алюминия на воздухе для образцов формы вытянутого параллелепипеда

Номер образца	Скорость распространения фронта первой волны горения, мм/с		Скорость распространения фронта второй волны горения, мм / с		Индукционный период, с
	Вертикальное направление	Горизонтальное направление	Вертикальное направление	Горизонтальное направление	
1	0,8	5,3	–	–	4,0
2	0,4	–	0,6	0,8	8,2
3	0,7	–	1,4	1,1	2,8
4	0,8	–	1,2	1,7	1,9
5	0,6	–	2,1	1,8	4,3
6	0,7	–	2,9	2,1	4,5
7	0,6	–	2,2	2,4	4,3
8	2,1	1,3	2,1	1,4	0,4

Различные временные параметры, полученные в ходе исследования образцов нанопорошка алюминия, объясняются различной скоростью распространения волн горения в разных частях образца, различной геометрией образцов и плотностью прессования нанопорошка при приготовлении образцов. В случае более плотных образцов, а также образцов большого объема, проникновение атмосферного

кислорода и азота, необходимого для горения нанопорошка алюминия, вглубь образцов затруднено [356, 357].

Согласно принципу работы лазерного монитора, изменение интенсивности выходного сигнала лазерного монитора, то есть общая яркость изображения, определяется свойствами усиливающей среды и величиной входного сигнала, которой зависит от отражающих свойств поверхности наблюдаемого объекта. Цифровая обработка видеозаписей, полученных с помощью лазерного монитора, позволила проанализировать изменение оптических свойств поверхности образцов во время горения [286]. Рисунок 5.12 иллюстрирует изменение интенсивности выходного сигнала лазерного монитора во время горения образца нанопорошка алюминия, изображения поверхности которого приведены на рисунке 5.10. Сравнивалась временная зависимость яркости изображений с исходной скоростной видеозаписью. Интервалы времени, в течение которых визуально идентифицируются волны горения на наблюдаемой лазерным монитором поверхности образца, отмечены вертикальными полосами.



Вторая волна соответствует изображениям на рисунке 5.10

Рисунок 5.12 – Зависимость средней интенсивности изображений лазерного монитора от времени в процессе горения нанопорошка алюминия в воздухе

Исходя из полученных данных, первая волна горения в рассматриваемом случае пересекла область наблюдения лазерного монитора между 1,0 и 2,1 с. На диаграмме это время соответствует уменьшению интенсивности примерно на 20 %. На 10 с происходит резкий скачок интенсивности, вызванный второй высокотемпературной стадией горения и образованием трещины в этот момент. Фронт второй волны на видеозаписи практически не виден, вероятно, из-за разрыва поверхности образца. Однако, согласно диаграмме, вторая волна горения присутствовала и пересекла область наблюдения лазерного монитора между 9,3 и 10,3 с. После распространения второй волны горения на диаграмме наблюдается уменьшение интенсивности, соответствующее остыванию образца. На этой стадии происходят процессы кристаллизации, приводящие к изменению коэффициента отражения поверхности образца и изменению интенсивности выходного сигнала лазерного монитора. Исходя из зависимости, представленной на рисунке 5.12, следует, что в процессе горения нанопорошка алюминия коэффициент отражения продуктов сгорания увеличился примерно на 30 % по сравнению с исходным нанопорошком.

На рисунке 5.13 показана временная эволюция интенсивности сигнала лазерного монитора, соответствующая случаю, представленному на рисунке 5.9. Временные интервалы, в течение которых волны горения пересекают поле зрения лазерного монитора (определяемые исходной высокоскоростной видеозаписью), выделены вертикальными полосами. Можно заметить примерно 20 % снижение интенсивности сигнала лазерного монитора между 1,8 и 2,5 с. Этот временной интервал соответствует распространению первой волны горения по наблюдаемой области поверхности образца. После первой волны горения на видеозаписи видно движение поверхности, которое, вероятно, вызвано газообменом. Водород с кислородом образуют пары воды, которые выделяются из образца. В то же время кислород и азот диффундируют в зону горения. Это приводит к нарушению сплошности образца нанопорошка, что визуально наблюдается в виде движения.

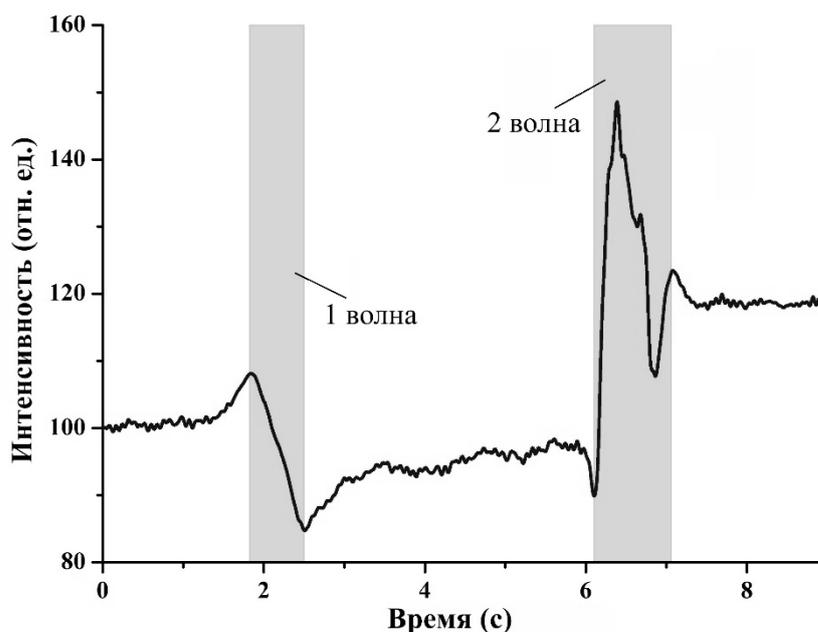


Рисунок 5.13 – Зависимость средней интенсивности изображений лазерного монитора от времени в процессе горения нанопорошка алюминия на воздухе. Вторая волна соответствует изображениям на рисунке 5.9

Уменьшение коэффициента отражения в начале второй стадии горения объясняется плавлением алюминия и образованием газообразных продуктов (Al_2O , AlO), что также наблюдалось при регистрации фазового состава с помощью синхротронного излучения при горении нанопорошка алюминия (рисунок 5.14, спад после рефлекса Al). Вторая волна горения (6,0 и 7,1 с) носит колебательный характер, заключающийся в повышении и понижении температуры. Колебания температуры являются причиной изменения поверхности. Визуально мы видим это как еще одну волну. О существовании колебаний температуры на второй стадии ранее упоминалось в [358]. Число колебаний может характеризовать активность нанопорошка и может быть идентифицировано с помощью лазерного монитора. Следует отметить, что поведение коэффициента отражения при горении нанопорошка алюминия в воздухе до настоящего времени мало изучено. Насколько нам известно, зависимость коэффициента отражения от времени в процессе высокотемпературного горения ранее не исследовалась.

Для анализа результатов, полученных с применением лазерного монитора, использовались также данные, полученные другими методами. На рисунке 5.14

показаны дифрактограммы, полученные с использованием синхротронного излучения, отраженного от поверхности горящего нанопорошка алюминия. Измерение дифрактограмм проводилось в Институте ядерной физики Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) на станции «Прецизионная дифрактометрия II» (канал СИ № 6 накопителя электронов ВЭПП-3 с однокоординатным детектором ОД-3М) [226]. Наблюдались два механизма химического синтеза нитрида алюминия (химическая связь азота в воздухе): путем последовательного вытеснения атомов кислорода атомами азота в гамма-оксиде алюминия и путем прямого взаимодействия алюминия с азотом воздуха после дезактивации кислородом [359].

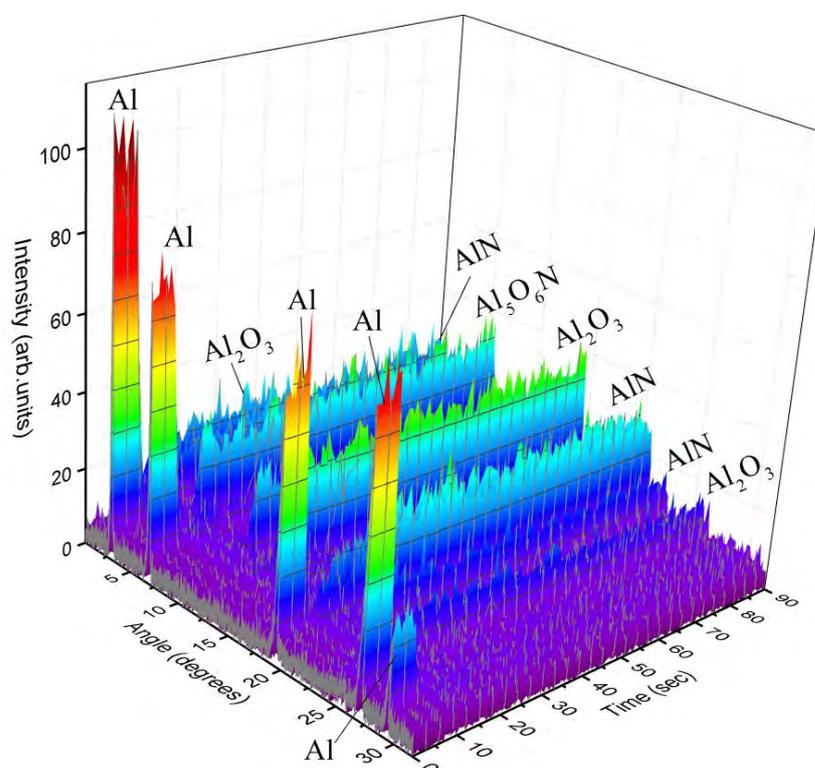


Рисунок 5.14 – Временная развертка дифрактограмм, полученных при отражении синхротронного излучения от поверхности горящего нанопорошка алюминия

Учитывая дифракционные картины, в образце в течение первых 8 с после зажигания (первая стадия горения) наблюдается только кристаллическая фаза алюминия. Этот факт подтверждается также наблюдением с использованием лазерного монитора, которое показывает, что морфология поверхности образца на первой стадии существенно не меняется (рисунок 5.8). Образование оксинитрида

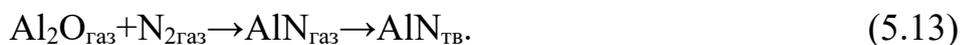
алюминия происходит по схеме:



В течение следующих 7 с (в интервале времени от 8 до 15 с после начала горения) четко выраженных дифракционных отражений с помощью синхротронного излучения не регистрируется. Данные, полученные с помощью лазерного монитора, показывают, что в этот промежуток времени протекает вторая стадия горения и по образцу распространяется высокотемпературная волна горения. Высокая температура образца, приводящая к плавлению алюминия, делает дифракционный анализ непригодным для исследования. Очевидным преимуществом визуального контроля с помощью лазерного монитора является то, что он позволяет наблюдать распространение тепловых волн горения и изменения морфологии образца. Агломерированные продукты горения, наблюдаемые после второй стадии горения, образуются по реакции [360]:



Данные, полученные с помощью лазерного мониторинга, наряду с данными, полученными с помощью дифракционного анализа, подтверждают гипотезу [360] о том, что окисление и образование нитридов происходят в тепловой волне во время второй стадии высокотемпературного горения. Продукты горения, кристаллы-вискеры, мы полагаем, образуются во время, когда наблюдаются колебания коэффициента отражения, т.е. в тепловой волне за фронтом горения по схеме:



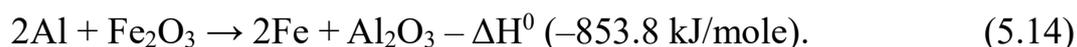
Для исследования состава сгоревшего образца применялся рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ. Продукты сгорания механически дезагрегировали путем измельчения в агатовой ступке, а затем просеивали через латунное сито с размером ячеек 63 мкм для дальнейшего анализа. Просеянный порошок подвергали рентгенофазовому анализу и рентгеноструктурному анализу с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-7000. Обработку рентгенограмм проводили с помощью программы PowderCell 2.4 и карт из базы данных PDF4+.

В таблице 5.2 представлены данные рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа. Анализ показал, что наибольшее искажение кристаллической решетки происходит в нитриде алюминия. Эти результаты и размер области когерентного рассеяния (ОКР) подтверждают, что кристаллы-вискеры в основном представляют собой кристаллы нитрида алюминия. Их образование происходит в тепловой волне, распространение которой возможно исследовать с помощью лазерного монитора.

Таблица 5.2 – Данные рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа

Фаза	Содержание, мас. %	ОКР, нм	Смещение атомов, $\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-3}$
AlN	72	119	1,9
Al ₂ O ₃	13	42	1,61
Al	15	96	0,64

Нанопорошок алюминия является одним из основных компонентов термитных смесей. Одной из наиболее интересных термитных реакций является окислительно-восстановительная реакция нанопорошка алюминия с нанопорошком оксида железа:



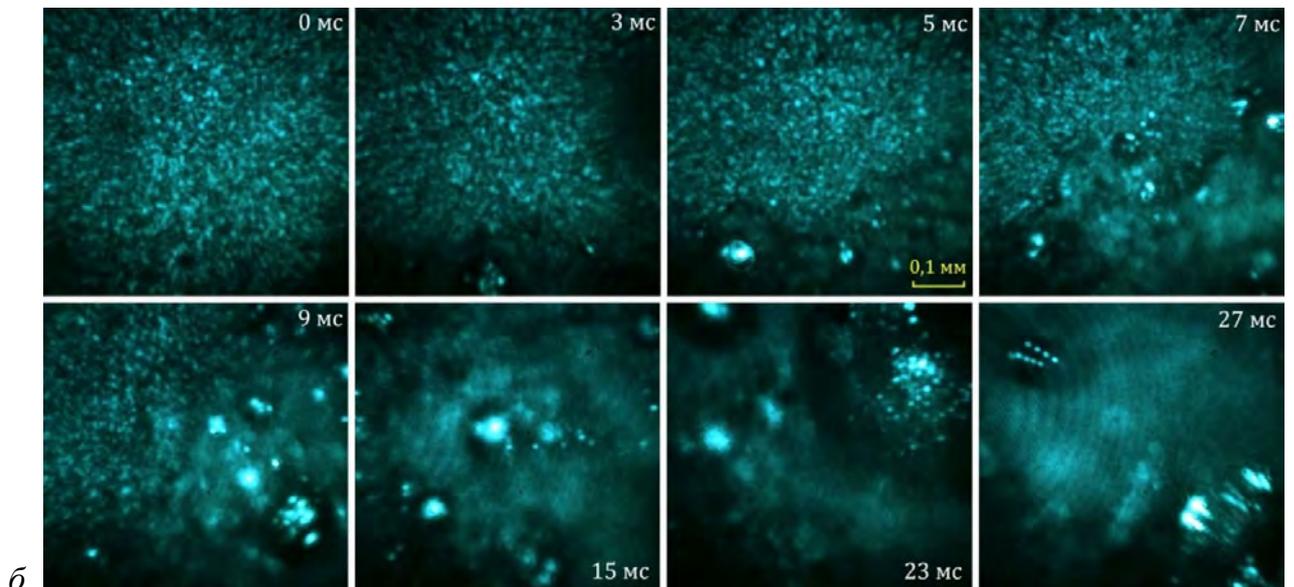
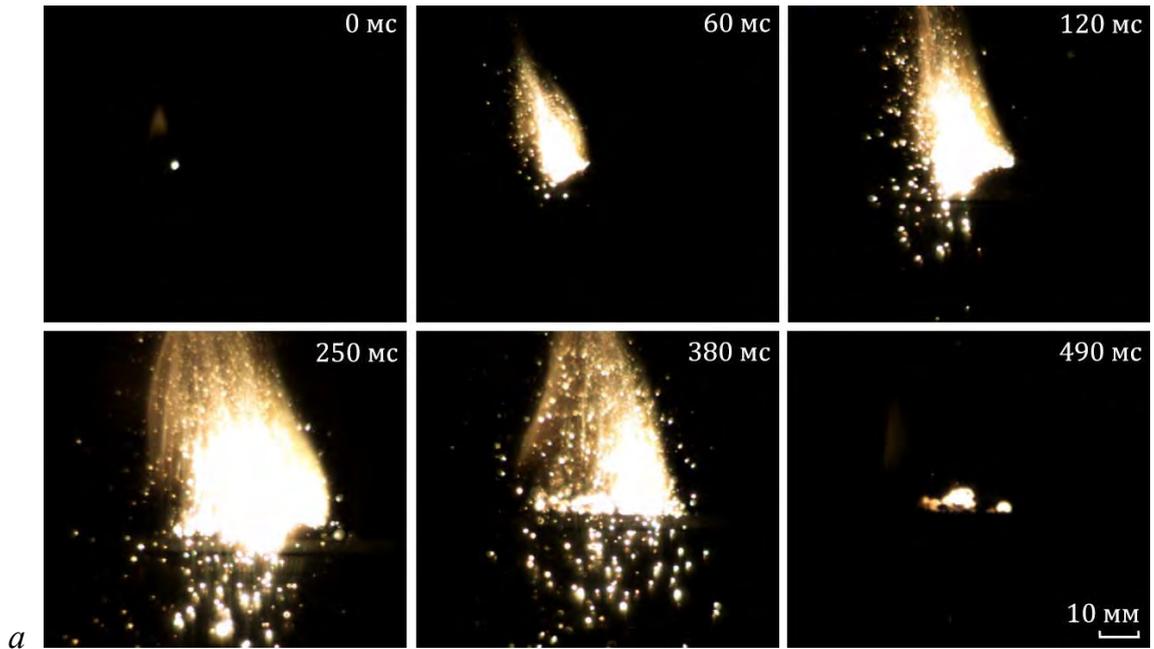
Процесс окисления Al в термитных смесях происходит с температурой порядка 2400 °С. Для воспламенения смеси Al-Fe₂O₃ необходимо перевести её часть в парообразное состояние, при этом оксид железа должен находиться в диссоциированном жидком состоянии. После сгорания паров алюминия выделяется количество теплоты, способное перевести в парообразное состояние другие частицы алюминия. На практике скорость реакции во многом зависит от размера частиц алюминия.

В этом разделе работы рассмотрен процесс горения смеси, состоящей из 2/3 нанопорошка алюминия и 1/3 нанопорошка оксида железа [287, 289]. Использовался нанопорошок Fe₂O₃, полученный путем нагрева нанопорошка Fe при температуре 550 °С в воздухе. Нанопорошок железа был получен путем

электрического взрыва железной проволоки в среде аргона. Удельная поверхность Fe_2O_3 составляла $14 \text{ м}^2/\text{г}$. Нанопорошок Al был также получен путем электрического взрыва алюминиевой проволоки в аргоне. Содержание металлического алюминия составляло 92 мас. % при удельной поверхности $17 \text{ м}^2/\text{г}$. Смесь готовили путем перемешивания исходных порошков в сухом виде на кальке резиновой пробкой. В ходе экспериментов нанопорошок алюминия в виде образца прямоугольной вытянутой формы помещался на алюминиевую подложку.

Для исследования поверхности горения применялся лазерный монитор на основе усилителя яркости с ГРТ диаметром 1,5 см и длиной 50 см (ГРТ № 5 в таблице 2.3). Режим работы усилителя яркости оптимизировался для получения формы пучка без провала интенсивности в центре [283]. Средняя мощность излучения, измеренная в области наблюдения, составляла 14 мВт (энергия импульса 0,7 мкДж) при частоте следования импульсов 20 кГц. Изображения записывались с помощью скоростной цветной CMOS-камеры Fastec HiSpec 1. Максимальная скорость записи, использованная в исследовании, составляла 1200 кадров/с при разрешении 640×600 пикселей, чтобы обеспечить время, достаточное для записи процесса.

Собственное свечение процесса горения термитной смеси Al- Fe_2O_3 в воздухе наблюдалось с помощью схемы на рисунке 4.1, а. Инициирование осуществлялось открытым огнем (спичкой). На рисунке 5.15, а представлены кадры скоростной видеозаписи процесса горения в собственном свете. Метод прямой записи изображений позволяет в общем виде наблюдать за горением всего образца. Из-за яркого фонового свечения временные характеристики процессов возможно оценить лишь приблизительно. В целом, горение смеси нанопорошков Al- Fe_2O_3 протекает значительно быстрее, чем горение нанопорошка Al без примесей. В отличие от горения нанопорошка Al, при горении смеси Al- Fe_2O_3 стадии не различаются. Кроме того, горение смеси Al- Fe_2O_3 сопровождается разлетом продуктов сгорания, которые представляют собой полые сферы диаметром до 3 мм. Разлет продуктов в экспериментах достигал 10 см и привел к загрязнению поверхности объектива.



a – получены в собственном свете; *б* – получены с помощью лазерного монитора;

0 мс – момент времени непосредственно перед видимым изменением поверхности

Рисунок 5.15 – Кадры скоростной записи горения нанопорошка $\text{Al-Fe}_2\text{O}_3$ в различные моменты времени

На рисунке 5.15, *б* показаны кадры скоростной записи, полученные с помощью лазерного монитора. В экспериментах использовался объектив Гелиос 44М. Оптическая система была откалибрована с помощью микроскопической калибровочной линейки. Наблюдаемая площадь составляла $0,57 \times 0,57$ мм. На изображениях хорошо видно образование сфер. Перед стадией горения мы

наблюдаем, как волна нагрева распространяется по поверхности образца. Может представлять интерес, что волна нагрева не приводит к заметному изменению структуры поверхности или изменению коэффициента отражения. Тепловую волну возможно обнаружить только в динамике (на видео) в виде небольшого возмущения на поверхности образца. Волна нагрева возникает за 40–100 мс до начала горения в той же точке образца. Скорость волны нагрева изменяется от 17,4 до 36,1 мм/с.

По данным скоростной съемки с помощью лазерного монитора возможно оценить скорость распространения волны горения. Для этой серии экспериментов она варьируется от 35,2 до 85,6 мм/с.

5.3. Исследование лазерного инициирования с использованием лазерного монитора и аппаратный анализ изменения коэффициента отражения поверхности в режиме реального времени

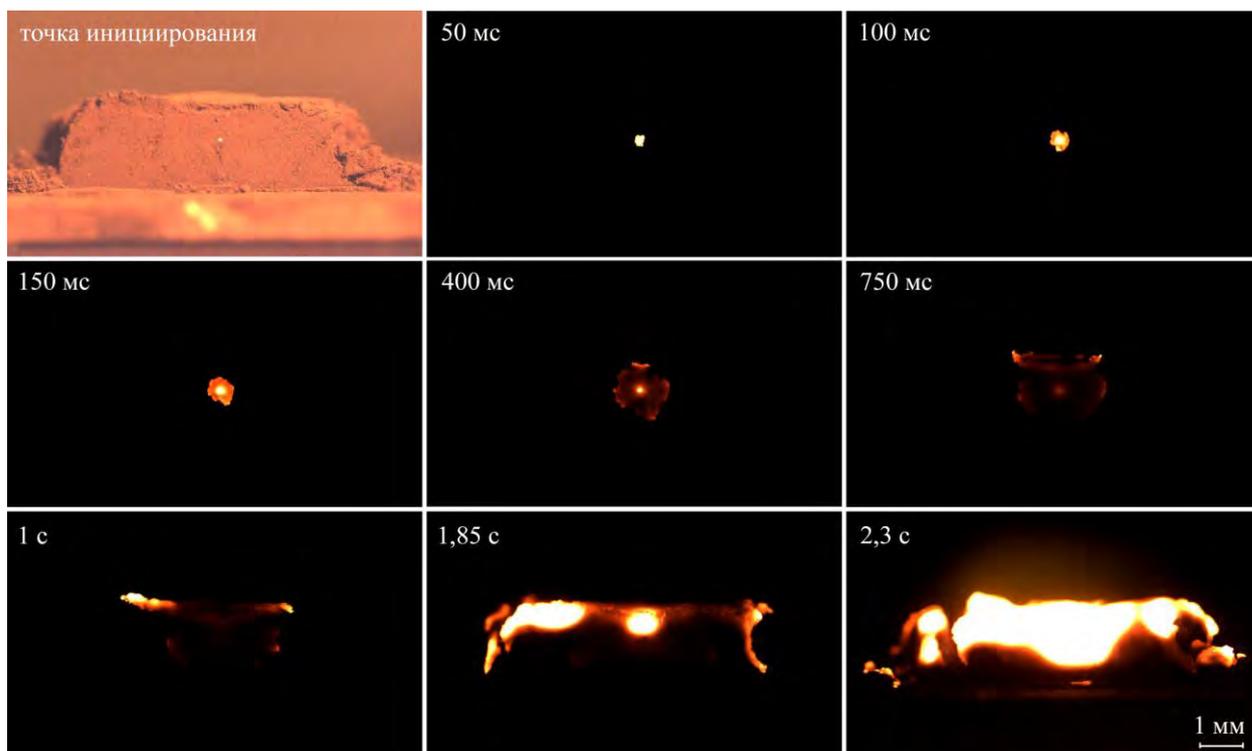
Инициирование горения нанопорошков металлов может осуществляться различными способами, например, с помощью накаливаемой проволоки, спички или газовой горелки. Альтернативным и наиболее интересным способом является применение лазерного излучения [244, 264]. Этот метод позволяет дозировать передаваемую объекту исследования энергию, используя импульсный лазер или механический затвор, с целью определения оптимальных условий инициирования, в одной стороны, и контроля момента начала горения, с другой стороны. Кроме того, лазерное инициирование отличается от инициирования открытым огнем локализованностью воздействия. Лазерный луч может быть сфокусирован в перетяжку диаметром доли миллиметра с плотностью энергии единицы-десятки мДж/мм². На рисунке 5.16 показаны кадры видеозаписи горения нанопорошка алюминия в воздухе при лазерном инициировании. На кадрах скоростной записи можно наблюдать инициирование первой низкотемпературной стадии горения, её распространение, начало второй высокотемпературной стадии горения и охлаждение. Очевидно, инициирование процесса горения происходит в области взаимодействия лазерного излучения с нанопорошком алюминия. Затем

фронт горения распространяется по образцу до краев образца. По краям образца обеспечивается большая площадь контакта горящего вещества с воздухом. Таким образом, вторая волна горения начинается на краях образца, однако область, в которой возникнет вторая волна, не может быть определена. Вторая волна может начаться одновременно в нескольких областях образца или в нескольких областях с некоторой задержкой по отношению друг к другу.

В работах [290, 291] нами предложено исследовать процесс лазерного инициирования и последующего горения нанопорошков металлов в воздухе с использованием лазерного монитора на парах бромида меди. При этом длина волны лазера, осуществляющего воздействие на объект, должна отличаться от длины волны усилителя яркости. Принимая во внимание, что ширина линии усиления 510,6 нм активной среды на парах меди (бромида меди) составляет $0,254 \text{ см}^{-1}$ (7,62 ГГц) [60], инициирующее излучение с длиной волны 532 нм не оказывает влияния на характеристики усиления и на изображение лазерного монитора.

Как показано на рисунке 5.12, 5.13 средняя интенсивность изображений лазерного монитора, рассчитанная в ходе обработки данных после проведенных экспериментов, показала возможность идентификации волн горения и изменения оптических свойств образца в процессе горения по изображениям лазерного монитора. На основании этого предложен метод аппаратного контроля за изменением отражательных свойств поверхности образца нанопорошка во время горения на основе осциллографирования импульсов излучения усилителя яркости, несущих изображение, с использованием быстродействующих фотодиодов. Метод и аппаратная реализация рассмотрены в разделе 4.6 диссертации. Далее представлены результаты применения предложенного метода для исследования процессов горения нанопорошка алюминия и его смесей с микропорошком алюминия и нанопорошком оксида железа III при лазерном инициировании [293].

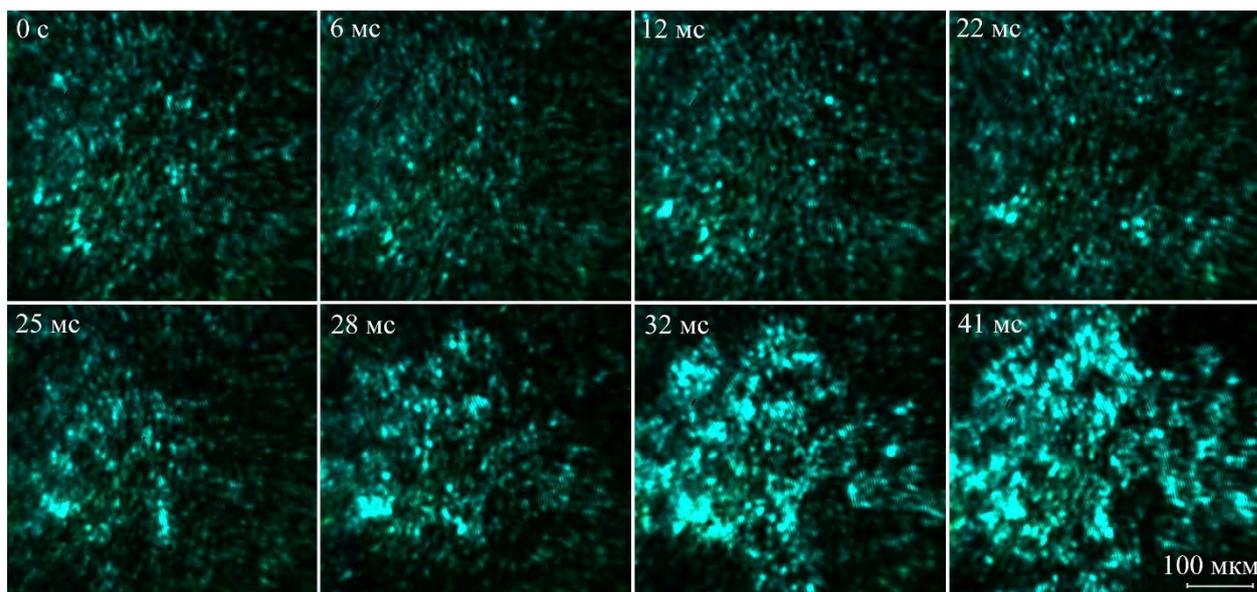
Рассмотрим более детально процесс, представленный на рисунке 5.16. Изменение средней яркости, зарегистрированное фотодиодом с использованием лазерного монитора, представлено на рисунке 4.35, *a*.



Лазерное воздействие видно в виде яркого пятна на верхнем левом изображении

Рисунок 5.16 – Кадры прямой скоростной визуализации горения нанопорошка Al, зарегистрированные в различные моменты времени относительно инициирования

Во время лазерного инициирования поверхность образца нагревается, и начинается окисление, которое приводит к потемнению и перемещению поверхности, а также к уменьшению отражения. Затем в области наблюдения происходит воспламенение образца, сопровождающееся увеличением отражения, и начинается первая волна горения нанопорошка алюминия. В момент воспламенения область горения маленькая и наиболее яркая, затем область горения расширяется, и яркость быстро уменьшается. Первая волна распространяется, в это время в поле наблюдения лазерного монитора не происходит значительных изменений отражательной способности. Затем в верхней части образца начинается вторая высокотемпературная волна, которая приходит в область наблюдения лазерного монитора через некоторое время. Таким образом, наблюдая горение в собственном свечении, можно качественно оценить природу горения, но невозможно определить точное расположение точки воспламенения.



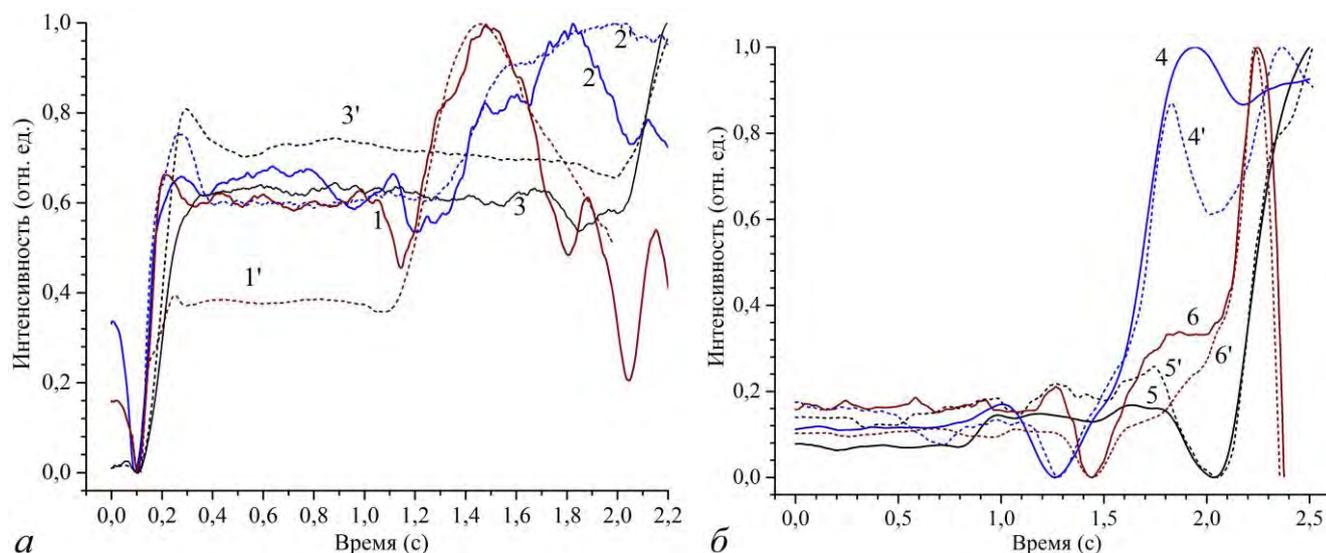
Первое изображение соответствует началу воздействия (открытию механического затвора)

Рисунок 5.17 – Кадры видеозаписи горения нанопорошка Al, полученные лазерным монитором в области лазерного воздействия в разные моменты времени

На рисунке 5.17 представлены кадры скоростной записи горения нанопорошка Al, полученные лазерным монитором, когда инициирование осуществлялось в поле зрения лазерного монитора. В качестве линзы, формирующей изображение, использовался объектив с фокусным расстоянием 80 мм. Наблюдаемая площадь составляла $\sim 0,5 \text{ мм}^2$. Первые кадры записи показывают, что поверхность двигается, затем область воздействия инициирующего лазера, темнеет; и, наконец, появляются яркие, с более высоким отражением, агломераты, заполняющие поле зрения. Визуально мы наблюдаем изменение морфологии поверхности и стадийность процесса горения, т.е. можем качественно охарактеризовать процесс.

Одним из методов количественной оценки процесса горения является цифровая обработка изображений, полученных при скоростной видеозаписи. Регистрация пламени скоростной камерой позволяет оценить колебания яркости пламени в реальном времени [361–363] и оценить распределение температуры [257]. Таким образом, регистрируя усиленное отраженное излучение от поверхности твердого образца, возможно количественно анализировать изменение отражательной способности и морфологии поверхности при горении. На рисунке

5.18 показаны кривые средней яркости изображений лазерного монитора [293]. Данные были нормализованы так, чтобы 0,0 и 1,0 на графике соответствовали минимальному и максимальному значению сигнала фотодиода на первой и второй стадиях горения. Скоростная запись видео началась одновременно с открытием механического затвора.



а – мониторинг в области лазерного инициирования; *б* – мониторинг в центральной области образца, инициирование на краю; 1–6 – кривые, регистрируемые фотодиодом (14 на рисунке 4.34); 1'–6' – расчетные кривые на основе скоростной видеозаписи; кривая 1 соответствует случаю на рисунке 4.35, *а*

Рисунок 5.18 – Средняя интенсивность изображений кадров скоростной записи горения образцов nanoAl

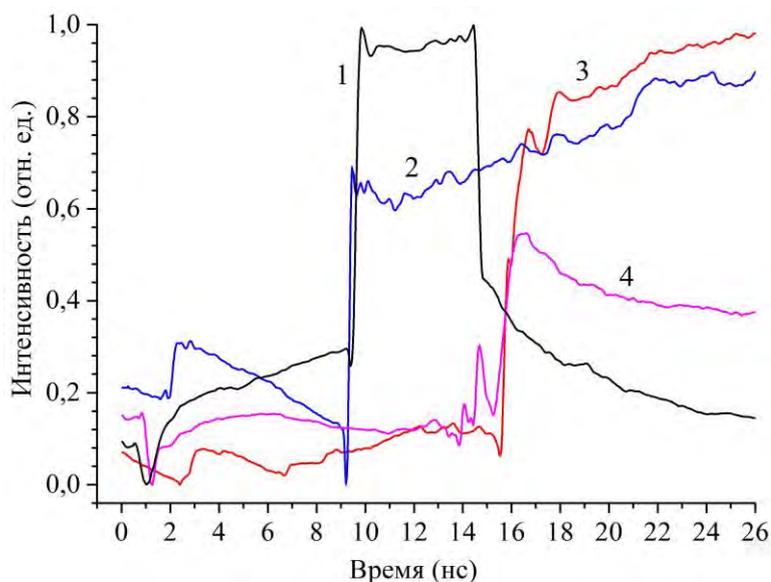
Как следует из данных, представленных на рисунке 5.18, на кривых средней интенсивности отчётливо идентифицируются стадии горения. Более того, наблюдаются различия в отражении поверхности в зависимости от места наблюдения. При наблюдении в области инициирования (рисунок 5.18, *а*) первая низкотемпературная стадия горения начинается сразу после начала воздействия иницирующим лазером. Распространение фронта сопровождается увеличением отражения. Затем интенсивность остается стабильной в течение некоторого времени, пока не начинает снижаться вследствие движения нанопорошка.

Следующее повышение интенсивности свидетельствует о начале второй волны горения. При мониторинге за пределами области инициирования (рисунок 5.18, б), первая волна горения достигает области наблюдения через некоторое время. Фронт первой волны сопровождается уменьшением интенсивности. Между первой и второй волнами горения порошок может перемещаться, изменяя тем самым интенсивность. Ближе к началу второй волны горения наблюдается быстрое увеличение интенсивности сигналов. Резкий спад на кривых б и б' (рисунок 5.18, б) соответствует разрыву образца в области наблюдения. Как отмечалось выше, на второй высокотемпературной стадии горения возможны колебания температуры 200–400 °С, что коррелирует с флуктуациями отражения от поверхности при температурах 2200–2400 °С.

Изменения интенсивности сигнала усилителя яркости при горении образцов смеси микроAl-наноAl (50/50 %) представлены на рисунке 5.19. Горение смеси микроAl-наноAl происходит намного медленнее, чем наноAl без примесей (рисунок 5.18). Кривые показывают характерные особенности, позволяющие анализировать процессы. В частности, первая стадия горения в случае смеси микроAl-наноAl более продолжительная (10–19 с) по сравнению с первой стадией горения наноAl (1,0–1,4 с). Вторая стадия горения сопровождается быстрым повышением температуры и яркости свечения. В некоторых случаях наблюдаются колебания отражения от поверхности на второй стадии горения, связанные с колебаниями температуры. По зависимостям можно судить также о целостности образца при горении. Например, резкое снижение интенсивности на второй стадии горения (примерно через 15 секунд от начала) на кривой 1 на рисунке 5.19 соответствует образованию трещины в образце в области наблюдения.

Значительное различие в длительности индукционного периода при горении смеси микроAl-наноAl обусловлена неоднородным характером горения по сравнению с наноAl. Для смеси нано- и крупнодисперсного порошка первая волна горения распространяется по сложной траектории. Момент второй волны в зоне наблюдения может произвольно изменяться в определенном диапазоне. На рисунке

5.20 показаны кадры видеозаписи горения смеси, полученные при прямом наблюдении. Зеленая точка на всех изображениях – область, наблюдаемая лазерным монитором. Последовательность кадров показывает, что волновой фронт смеси нанопорошков микро- и nanoалюминия не сплошной; наблюдаются нелинейности, вызванные непостоянством скорости горения смеси.



1–4 – различные образцы

Рисунок 5.19 – Средняя интенсивность изображений скоростной записи смеси микроAl-наноAl при наблюдении в области лазерного инициирования и регистрации фотодиодом

На рисунке 5.21 представлены кадры скоростной записи горения смеси нанопорошков Al-Fe₂O₃, полученные лазерным монитором при лазерном инициировании в области наблюдения. При лазерном зажигании смеси нанопорошков Al-Fe₂O₃ также наблюдается небольшое движение поверхности и небольшое потемнение в области лазерного воздействия. Результаты показывают, что первая волна горения нанопорошков возникает при лазерном инициировании непосредственно в месте лазерного воздействия. Дополнительно появляются сферические продукты горения, разлетающиеся от образца. Согласно рентгенофазовому анализу, выполненному в [228], сферические продукты горения смеси нанопорошков Al-Fe₂O₃ состоят из двойного оксида FeAlO₃.

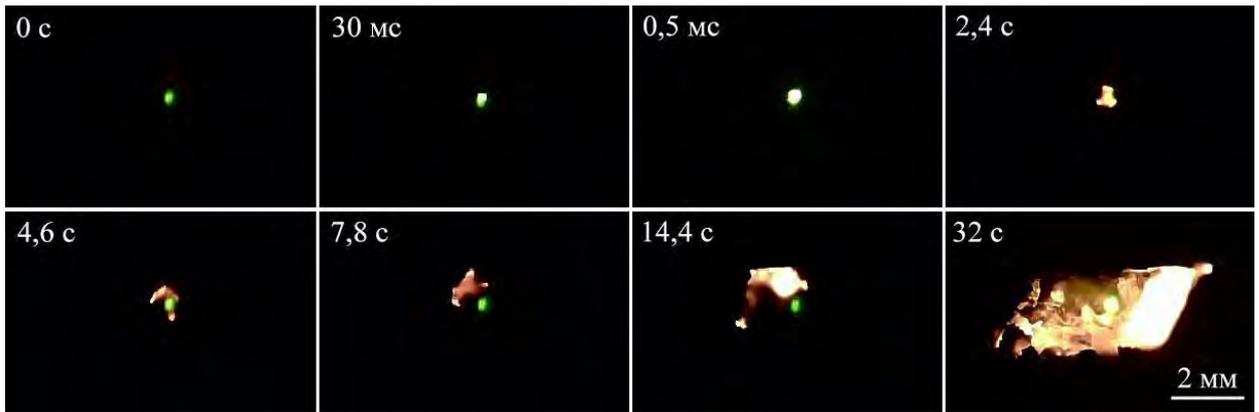
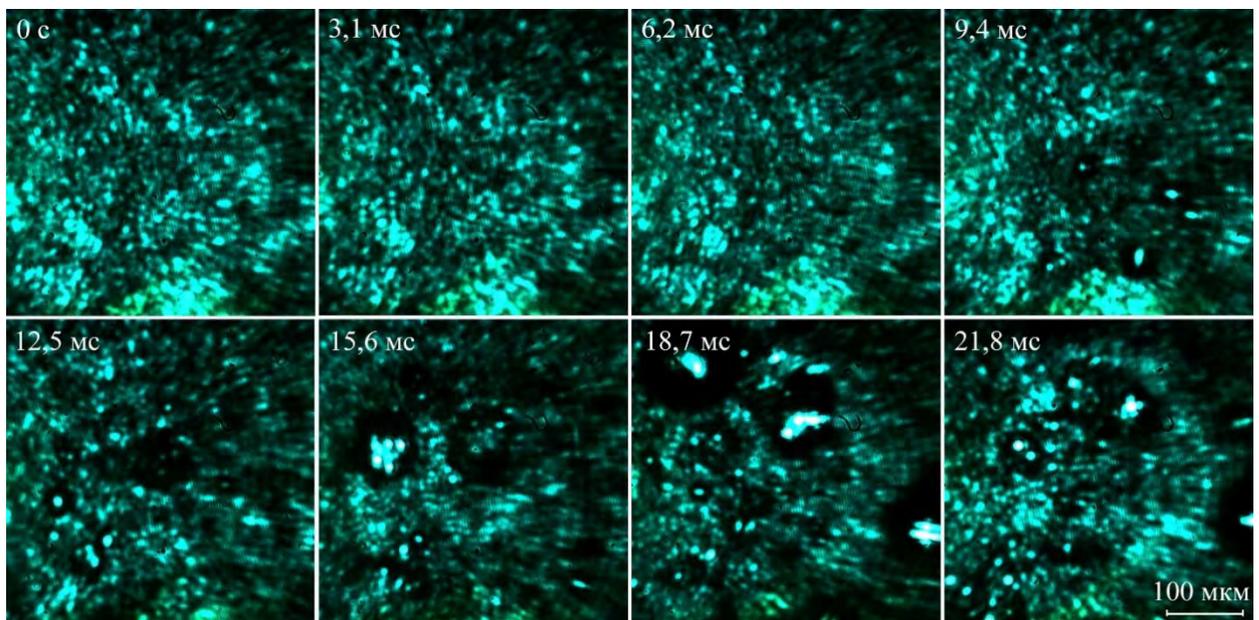


Рисунок 5.20 – Кадры видеозаписи горения смеси микроAl-наноAl при прямом наблюдении в различные моменты времени относительно момента инициирования

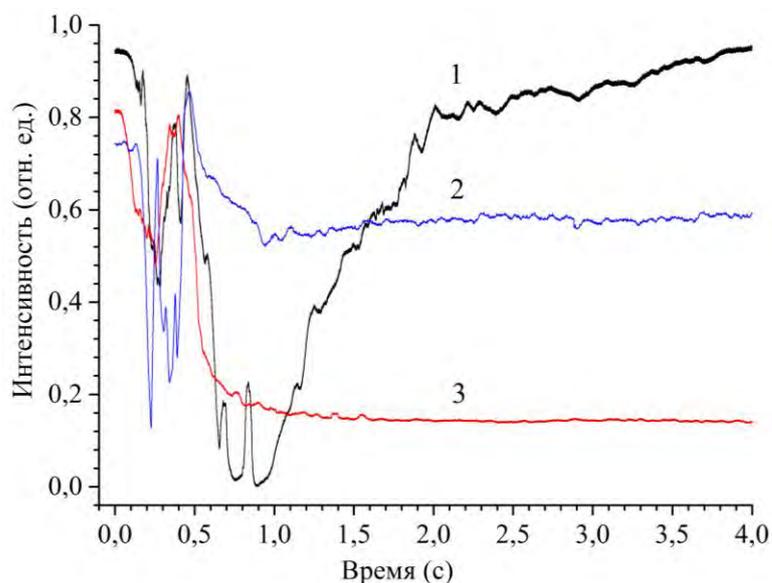


Первое изображение соответствует началу лазерного воздействия

Рисунок 5.21 – Кадры скоростной видеозаписи горения нанопорошка Al-Fe₂O₃, полученные с помощью лазерного монитора в точке инициирования

На рисунке 5.22 показано изменение интенсивности выходного излучения усилителя яркости при исследовании горения смеси нанопорошков Al-Fe₂O₃. Кривая 1 на рисунке 5.22 соответствует случаю, когда продукты сгорания разлетались в стороны, но одна из сфер вернулась в зону наблюдения: интенсивность увеличилась после предшествующего уменьшения. Для кривой 2 продукты сгорания частично остались в поле зрения. Кривая 3 представляет случай, когда в поле наблюдения не осталось продуктов сгорания. Как правило, горение

образцов смеси $Al-Fe_2O_3$ происходит с высокой скоростью примерно за 0,5 секунды. Разлетающиеся продукты сгорания создают неоднородность поверхности в виде флуктуаций интенсивности отраженного света.



Кривая 3 соответствует случаю на рисунке 4.35, б

Рисунок 5.22 – Средняя интенсивность изображений скоростной записи горения смеси нанопорошков $Al-Fe_2O_3$ при мониторинге в зоне лазерного воздействия и регистрации с помощью фотодиода

Изменение температуры образца во время горения сопровождается изменением яркости свечения (рисунок 5.23). В работе [212] авторы объяснили, что колебания интенсивности излучения, регистрируемого фотодиодом, были вызваны колебаниями температуры. В данной работе аналогичная методика использовалась для сравнения процесса горения различных порошков (наноAl, смесь нанопорошков $Al-Fe_2O_3$, смесь микроAl-наноAl). В данной работе мы использовали второй фотодиод для оценки изменения яркости общего свечения образца во время горения, который располагался над объектом исследования (рисунок 4.36). На рисунке 4.35, б показаны как сигнал фотодиода, характеризующий отражательную способность поверхности в области наблюдения (средняя яркость усилителя, кривая 1), так и средняя яркость всего горящего образца (кривая 3). Уменьшение сигнала 1 с ростом температуры соответствует распространению тепловой волны.

Последующее увеличение интенсивности сигнала I указывает на то, что в зоне наблюдения образовались крупные продукты горения, а само горение сместилось в сторону. Затем резкое уменьшение соответствует разлету продуктов сгорания, что приводит к появлению пустоты в области наблюдения. Результаты, представленные на рисунке 5.23, *a*, демонстрируют повторяемость результатов наблюдений.

На рисунке 5.23 показаны кривые яркости горения смеси нанопорошков Al-Fe₂O₃, наноAl, а также смеси микроAl-наноAl. Импульсы длительностью 50 мкс в начале кривых на рисунке 5.23, *b*, *c* – инициирующее излучение. На рисунке 5.23, *a* не удалось зарегистрировать импульсы инициирующего излучения из-за значительно более высокой яркости горения смеси Al-Fe₂O₃ по сравнению с другими порошками. Временные параметры и характер горения существенно различаются между образцами. Длительность горения смеси Al-Fe₂O₃ составляет 0,5–0,6 с, и горение протекает в одну стадию. НаноAl горит в течение 8–12 с в две стадии. Смесь микро- и нанопорошков Al горит более 20 с и сопровождается значительным изменением яркости. В ряде случаев имеет место колебания яркости (кривая 3 на рисунке 5.23, *b*; кривые 1, 2 на рисунке 5.23, *в*). Наблюдения показали, что колебания яркости, в основном, связаны с началом и распространением второй высокотемпературной волны. Имеет место одна локализация с изменением температуры горения или несколько высокотемпературных локализаций, где горение возникает с некоторой задержкой. Например, на рисунке 5.16 через 1,85 с наблюдаются две локализации на второй стадии горения. Возникновение нового очага горения приводит к локальному увеличению яркости и, следовательно, к общему увеличению яркости (второй максимум кривой 3 на рисунке 5.23, *b*).

Горение смеси микро- и нанопорошков алюминия имеет следующие особенности (рисунок 5.23, *c*). В большинстве случаев горение имеет две локализации на второй стадии горения: одна рядом с местом инициирования (14,4 с на рисунке 5.20), и другие в произвольных частях образца. Более того, первая локализация может иметь меньшую яркость по сравнению с другими. В некоторых случаях второго очага горения может не быть. В процессе 3 на рисунке 5.23, *в* не

весь порошок прогорел, остались темные фрагменты. Для кривых 1 и 2 на рисунке 5.23, *в* порошок прогорел практически весь. Фотографии продуктов сгорания смеси микроAl-наноAl представлены на рисунке 5.24.

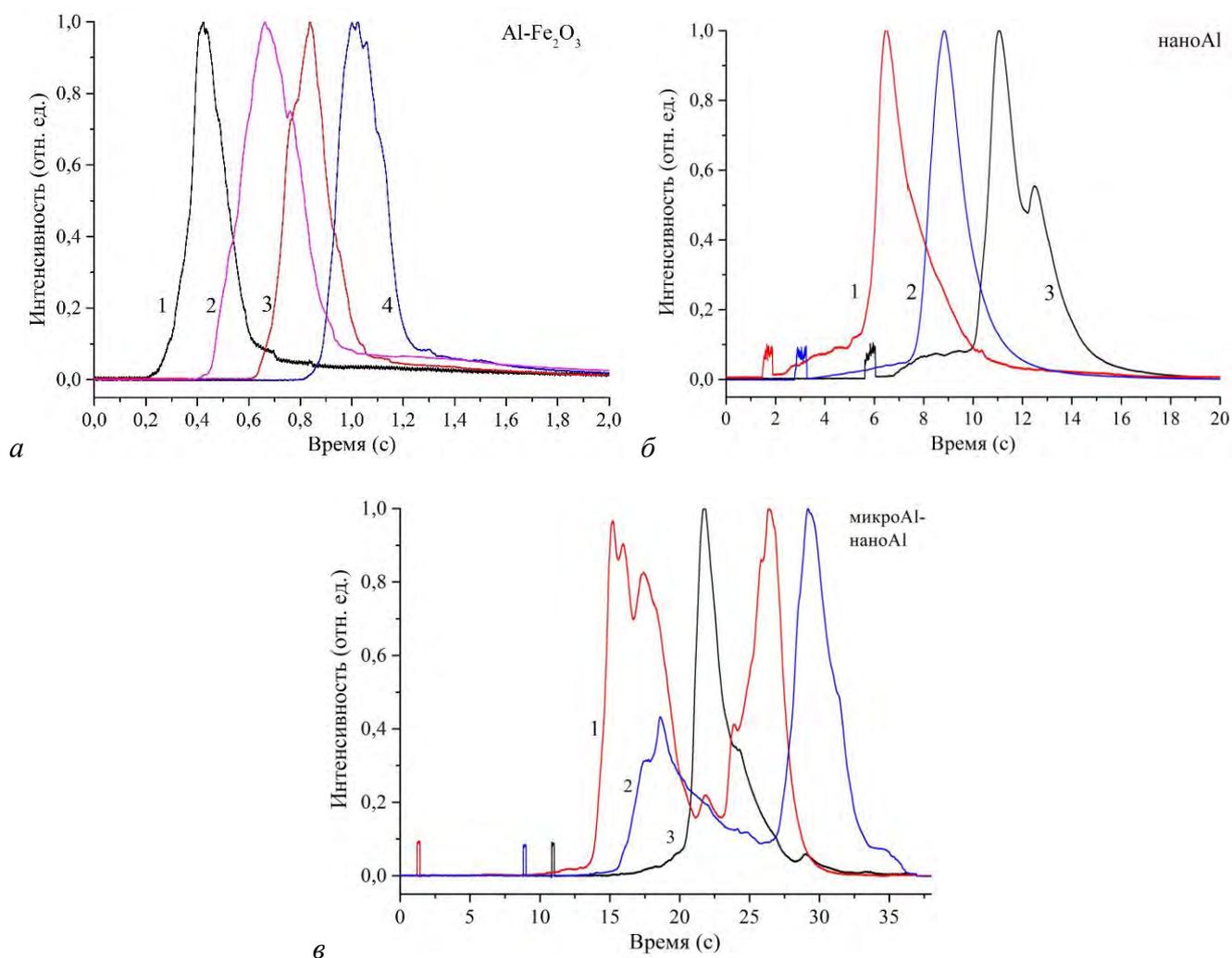
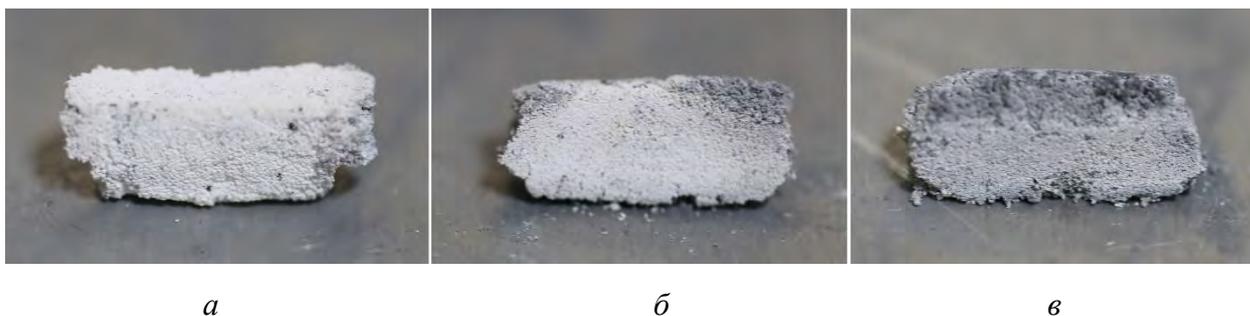


Рисунок 5.23 – Интенсивность горения смеси нанопорошков Al-Fe₂O₃ (*а*), наноAl (*б*), и микроAl-наноAl (*в*) во времени, зарегистрированные фотодиодом 5 (рисунок 4.36)

Появление нескольких локализаций подтверждается результатами тепловизионной съемки. На рисунке 5.25 показаны профили температуры образца наноAl в процессе горения, зарегистрированные ИК-камерой при расположении спереди (рисунок 4.2, *а*). Две локализации видны на кривых 4 и 6.



a – почти полностью сгоревший образец, *б* – некоторые участки образца не полностью сгорели, *в* – большая часть образца не сгорела

Рисунок 5.24 – Продукты сгорания смеси микроAl-наноAl

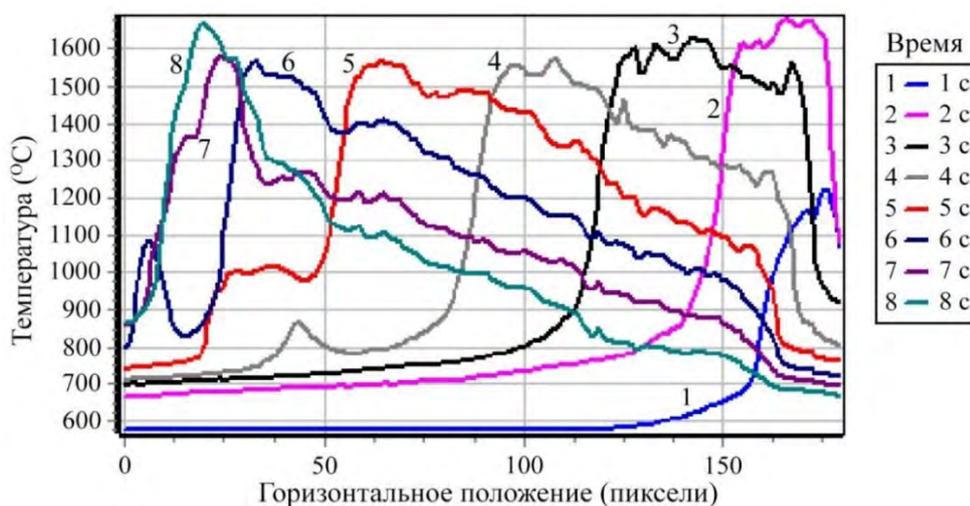
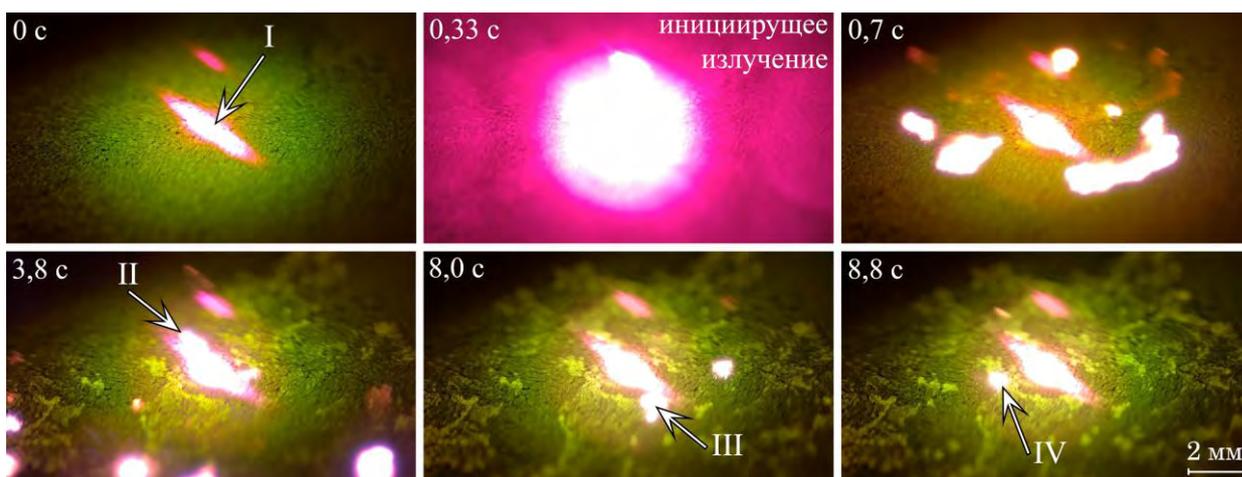


Рисунок 5.25 – Профили температуры в центральной части образца в процессе горения

5.4. Исследование горения тонких слоев нанопорошков

Горение тонкого слоя нанопорошка алюминия существенно отличается от горения массивной навески (рисунок 5.16). На рисунке 5.26 приведены кадры записи процесса горения в собственном свечении, зарегистрированные USB-камерой на рисунке 4.62, *б*. Красное пятно в центре изображений – пучок инициирующего лазера в дежурном режиме (~ 1 мВт), кроме момента времени 0,33 с, который соответствует мощности инициирующего лазера 2 Вт. На рисунке 5.27 приведен типичный вид исходных продуктов и продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе, размещенного на керамической подложке.



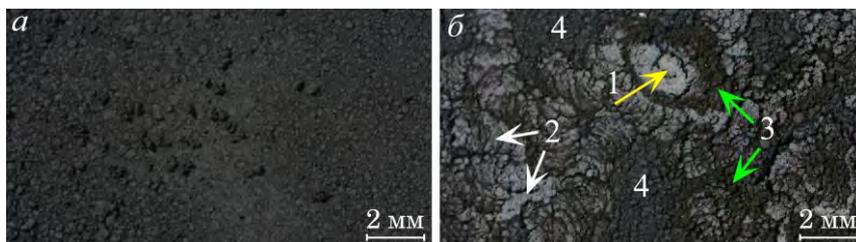
I – область лазерного воздействия; II–IV – области, отмеченные на рисунке 5.28

Рисунок 5.26 – Горение слоя нанопорошка алюминия

Визуализация с большим увеличением не позволяет наблюдать сложный характер распространения горения по поверхности из-за малого размера области наблюдения. Схема на рисунке 4.62, б с линзой с $F=50$ мм обеспечивает значительную площадь наблюдения 3×3 мм², давая возможность наблюдать область лазерного воздействия и область распространения волн горения от области воздействия. На рисунке 5.28 приведены кадры скоростной визуализации горения тонкого слоя нанопорошка алюминия, полученные с использованием данной схемы. Кадры, на рисунке 5.26 и 5.28 представляют один и тот же процесс, моменты времени и детали (I–IV) соответствуют друг другу.

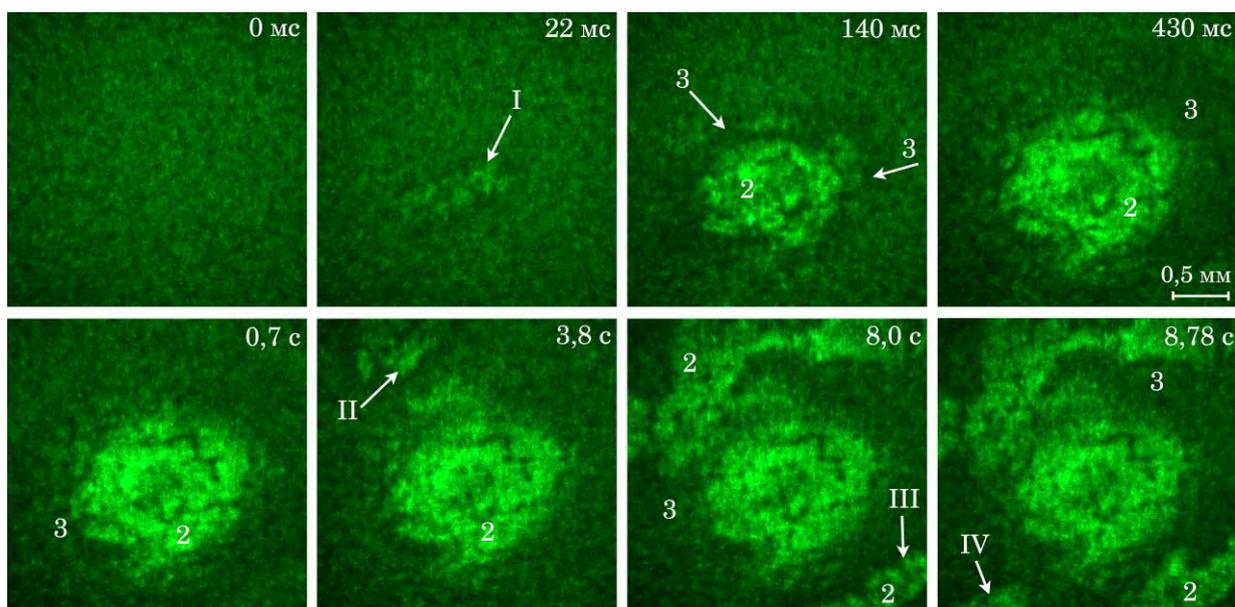
Сопоставление изображений позволяет сделать вывод, что яркие фрагменты на рисунке 5.26 соответствуют распространению второй стадии горения нанопорошка алюминия, во время которой образуется светлые продукты сгорания (AlN , Al_2O_3 , Al_5O_6N). Распространение первой волны горения при наблюдении в собственном свете не видно. Оно видно с использованием лазерного монитора (относительно темная область 3 на рисунке 5.28). Темные продукты – агломераты непрореагировавшего алюминия, образовавшиеся во время первой волны горения, которые не успевали достаточно нагреться для воспламенения и перехода во вторую стадию горения. Таким образом, первая волна горения не всегда сопровождалась второй высокотемпературной волной. Лазерный монитор с

относительно большой областью наблюдения позволяет наблюдать прерывистый характер горения. Прерывистый характер горения приводит к неоднородным продуктам сгорания (рисунок 5.27). В тех областях объекта, где проходит вторая волна горения образуются светлые продукты (AlN , Al_2O_3 , Al_5O_6N).



a – до начала горения, *б* – после прогорания; 1 – область лазерного воздействия; 1, 2 – продукты горения (AlN , Al_2O_3 , Al_5O_6N); 3 – непрореагировавший алюминий; 4 – остатки исходного нанопорошка алюминия

Рисунок 5.27 – Характерный внешний вид поверхности слоя нанопорошка алюминия

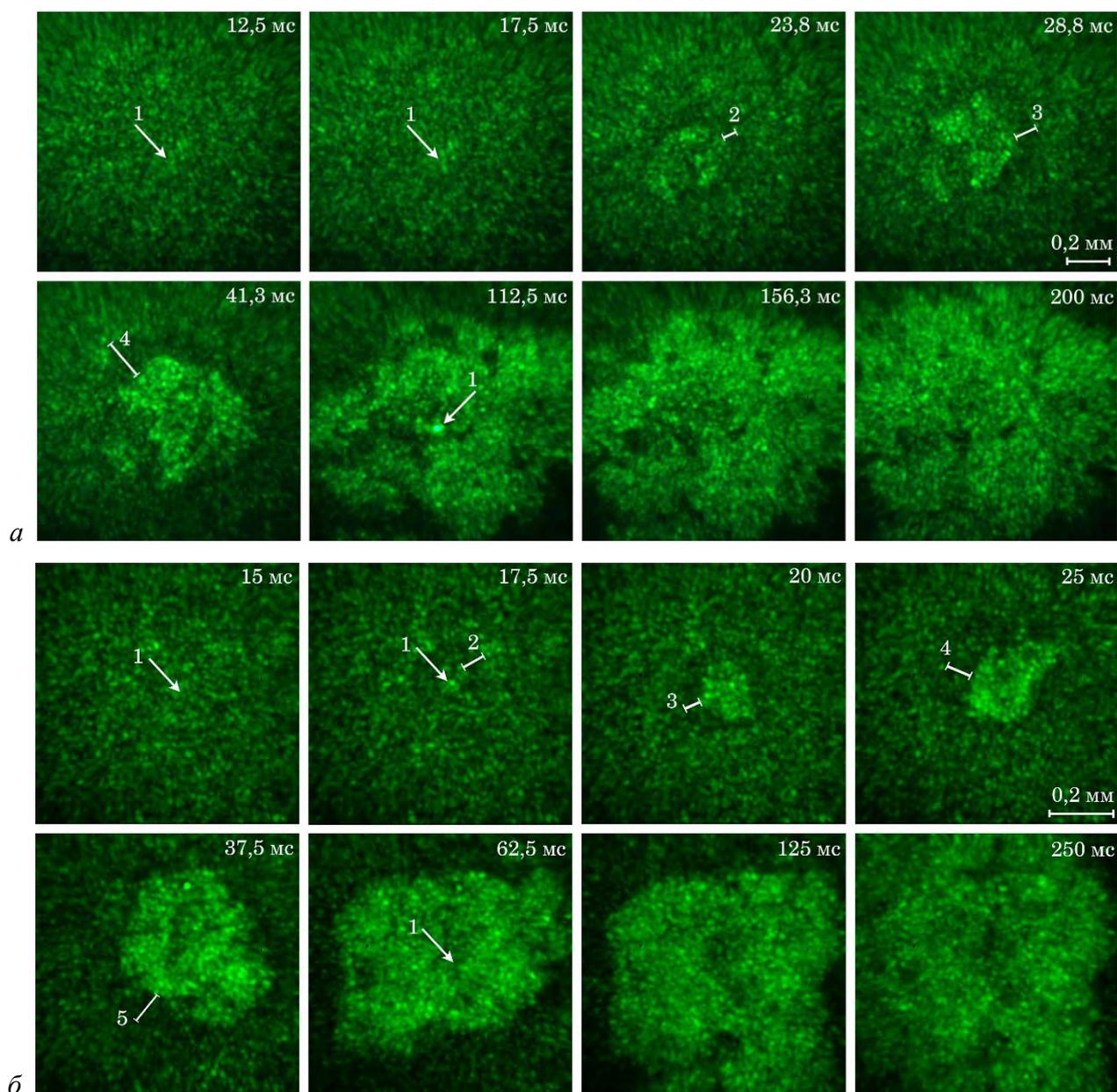


I – область лазерного воздействия; II–IV – области, соответствующие областям, отмеченным на рисунке 5.26; 2 – продукты горения/вторая волна горения, 3 – первая волна горения

Рисунок 5.28 – Кадры скоростной видеозаписи горения тонкого слоя нанопорошка алюминия, полученные в точке инициирования с использованием схемы на рисунке 4.62, *б*

Схема лазерного монитора на рисунке 4.62, *а* позволяет более детально исследовать инициирование и распространение горения. Результаты визуализации

горения тонкого слоя нанопорошка алюминия в области лазерного воздействия показаны на рисунке 5.29, *а*. Из представленных кадров следует, что горение в области инициирования протекает в одну стадию. На видеозаписи начиная с 125,5 мс видна жидкая фаза в области лазерного воздействия (показана стрелкой 1). По изображениям возможно определить ширину фронта горения (показана отрезками с цифрами 2–4), которая составила 70–200 мкм в условиях эксперимента.



а – схема на рисунке 4.62, *а*; *б* – схема на рисунке 4.62, *з*; 1 – область лазерного воздействия;
2–5 – фронт волны горения

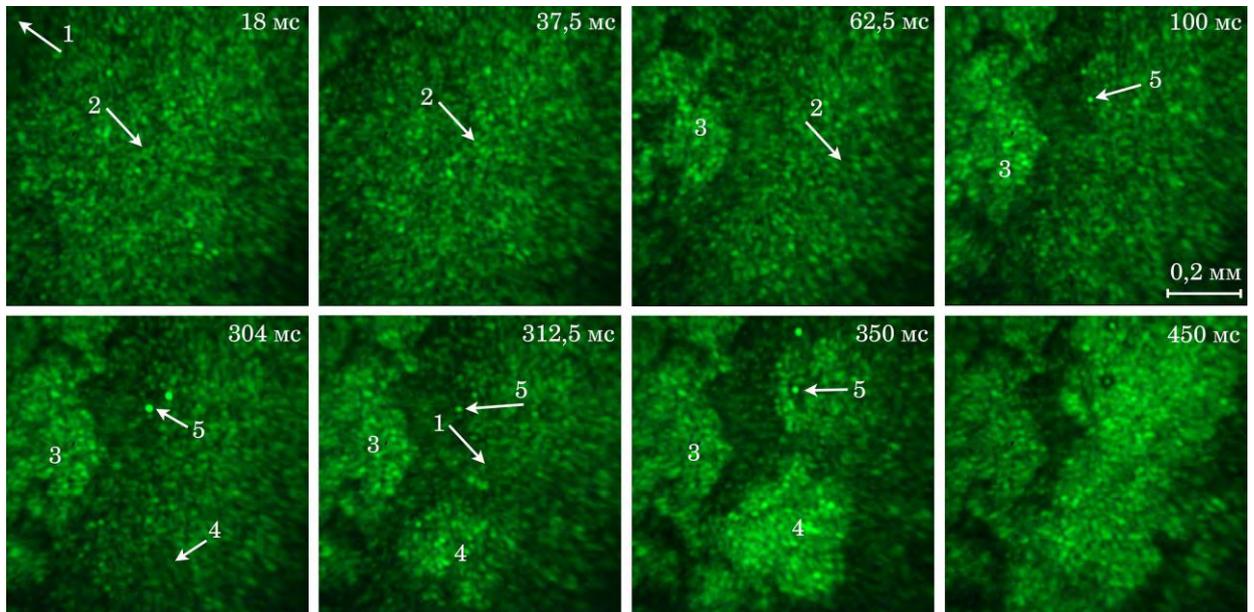
Рисунок 5.29 – Кадры скоростной видеозаписи горения тонких слоев нанопорошка алюминия, полученные в точке инициирования с использованием лазерного монитора

Результаты визуализации процесса лазерного инициирования тонкого слоя нанопорошка с использованием схемы на рисунке 4.62, *з*, показаны на рисунке 5.29, *б*. Как и в предыдущем случае, отчетливо видно распространение волны горения из точки лазерного воздействия в стороны, при этом толщина фронта горения значительно варьируется, что свидетельствует о неоднородности процесса. Схема с вертикальным расположением объектива, в которой поворотное зеркало расположено между усилителем яркости и объективом (рисунок 4.62, *з*) дает изображения, субъективно не хуже изображений, полученных с применением схемы с поворотным зеркалом, расположенным между объективом и объектом исследования (рисунок 4.62, *а*).

На рисунке 5.30 представлены кадры скоростной визуализации горения тонкого слоя нанопорошка алюминия, когда инициирование осуществлялось вблизи области наблюдения. Из представленных кадров следует, что процесс горения протекает в две стадии. В области инициирования горение протекает в одну стадию, затем высокотемпературное горение на некоторое время прекращается (время между 62,5 и 304 мс), при этом низкотемпературная волна продолжает распространяться по образцу, что хорошо видно в динамике на видеозаписи. Наличие жидкой фазы в это время свидетельствует о распространении горения внутри образца. После индукционного периода (304 мс) вторая стадия горения вновь выходит на поверхность.

Визуализация горения тонких образцов показывает, что горение нанопорошка алюминия может протекать по-разному в зависимости от характера инициирования. Непосредственно в области лазерного инициирования горение протекает в одну стадию, затем затухает. Далее по образцу распространяется относительно низкотемпературная волна, которая приводит к повторному повышению температуры и возникновению второй волны горения. Распространение горения носит сложный характер, обусловленный неоднородной структурой поверхности. Более плотные фрагменты создают препятствия в распространении волны, так как в них хуже проникает окислитель. В отличие от горения массивных образцов,

выделяемая энергия при горении незначительная, что приводит к нестабильности горения, в частности, к прерывистому характеру второй волны горения.



1 – область лазерного воздействия; 2 – фронт первой волны горения; 3, 4 – вторая стадия горения; 5 – жидкая фаза

Рисунок 5.30 – Кадры скоростной видеозаписи горения тонкого слоя нанопорошка алюминия, полученные в точке инициирования с использованием схемы рисунке 4.62, в

Перспективным применением лазерного монитора с горизонтальной визуализацией является исследование лазерной интеграции нанопорошка металла в полимеры [364]. На рисунке 5.31 приведены кадры визуализации области воздействия лазерного излучения (мощность 50 мВт, $\lambda=438$ нм) на поверхность полиэтилена, покрытого тонким слоем нанопорошка алюминия. Луч лазера заводился в область визуализации объективом Гелиос 44М с использованием схемы на рисунке 4.61, в. Лазерный монитор позволяет исследовать поверхность полиэтилена в области лазерного воздействия сквозь засветку, создаваемую лазером, с микроскопическим увеличением.

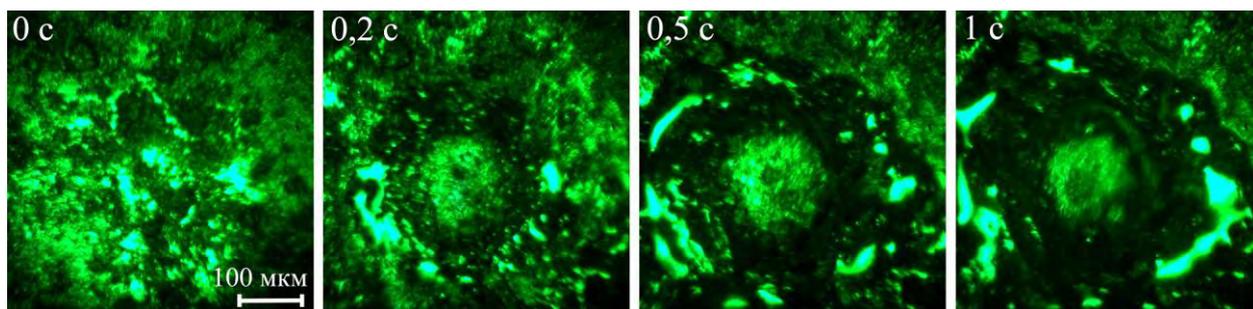


Рисунок 5.31 – Кадры скоростной видеозаписи лазерного воздействия на поверхность полиэтилена, покрытого тонким слоем нанопорошка алюминия

Дальнейшим усовершенствованием экспериментальной установки может стать использование двухкоординатного моторизованного транслятора для исследования динамики лазерного интегрирования в ходе технологического процесса изготовления токопроводящих структур с заданными размерами.

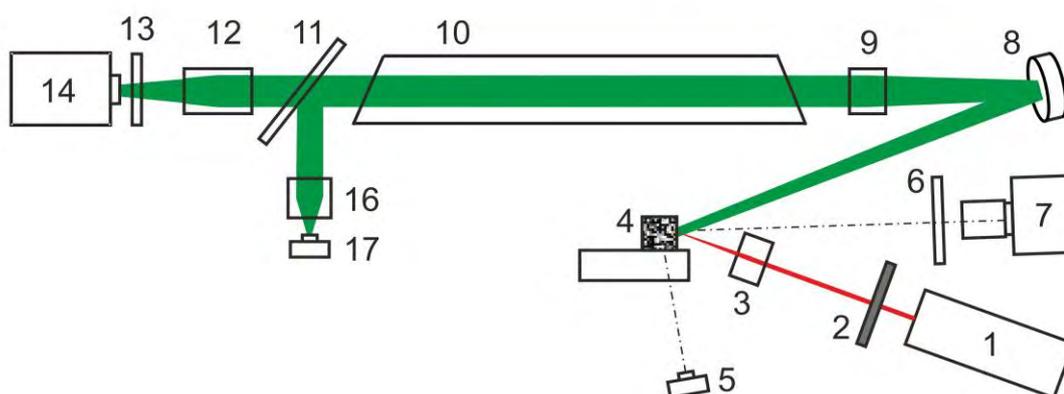
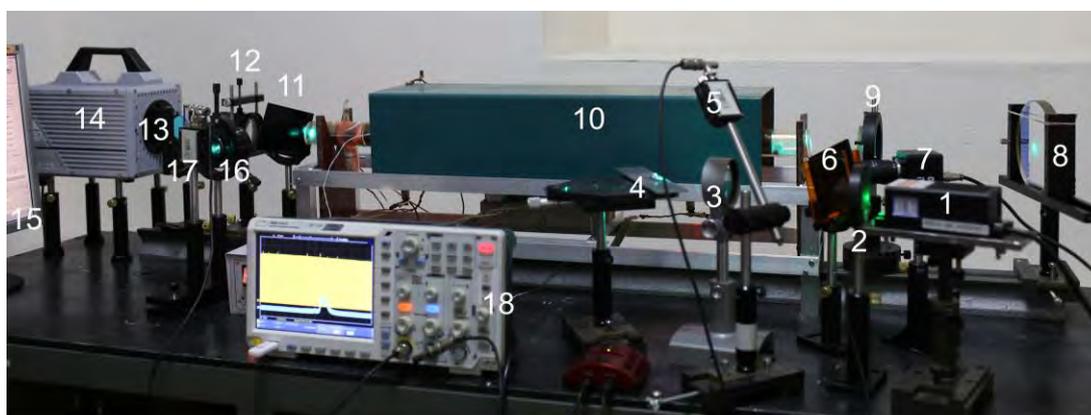
5.5. Исследование горения энергетических материалов с применением лазерного монитора с увеличенной дальностью наблюдения

5.5.1. Исследование нанопорошка алюминия и его смесей с нанопорошком железа и микропорошками алюминия и железа

Лазерный монитор с увеличенным расстоянием до объекта наблюдения, базовая схема которого представлена на рисунке 4.26, использовался для дистанционного наблюдения горения энергетических материалов на основе нано- и микропорошков алюминия. В данном разделе работы мы исследовали нанопорошок алюминия и его смеси с микропорошком алюминия, нанопорошком железа и микропорошком железа [294, 295]. Горение смесей с частичной заменой нанопорошков микронными порошками представляет интерес, так как снижает стоимость керамических порошков – продуктов сгорания металлических смесей [227], которые используются для производства новых материалов. Исследование смесей порошков алюминия и железа также представляет практический интерес, так как железо оказывает каталитическое действие на горение алюминия, а горение

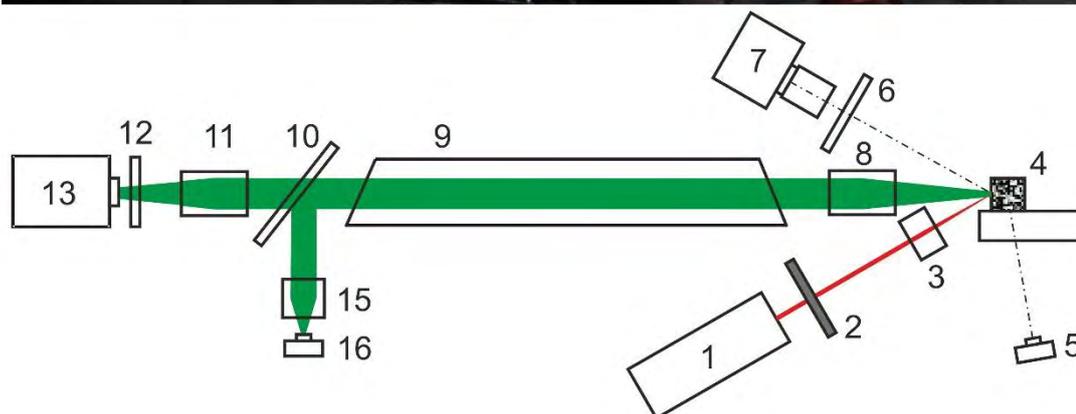
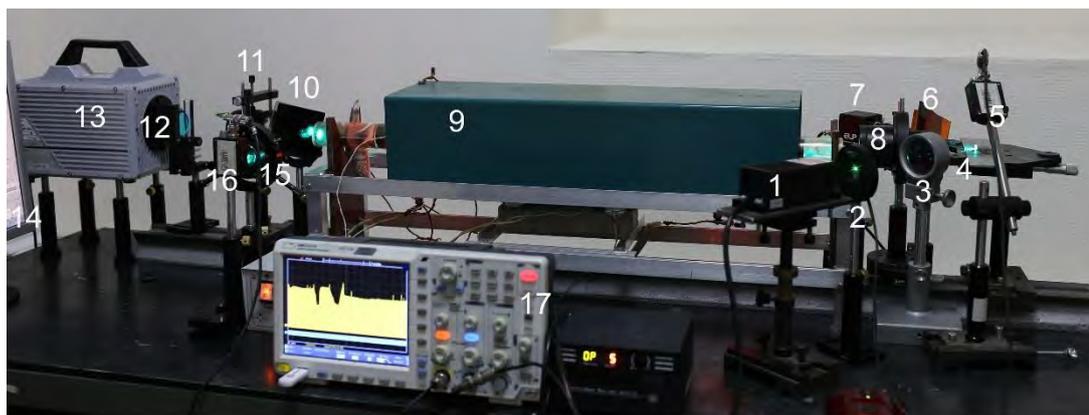
смесей порошков алюминия и железа происходит с более высокой скоростью [228].

Внешний вид и ход лучей в схеме эксперимента, схематично представленной на рисунке 4.34, б приведены на рисунке 5.32. С целью сравнительного анализа, горение этих же смесей визуализировалось с использованием традиционного лазерного монитора. Внешний вид и ход лучей в схеме эксперимента, схематично представленной на рисунке 4.34, а приведены на рисунке 5.33. Запись изображений во обеих схемах осуществлялась скоростной монохромной камерой Photron Fastcam SA1 с возможностью внешней синхронизации. Частота кадров изображения была установлена равной 1000 кадров/с с разрешением 896×896 пикселей.



1 – инициирующий лазер; 2 – механический затвор; 3, 9, 12, 16 – линзы (объективы); 4 – объект на платформе; 5 – фотодиод для регистрации яркости собственного свечения; 6, 13 – полосовые фильтры; 7 – USB-камера; 8 – вогнутое зеркало; 10 – усилитель яркости; 11 – нейтральный светофильтр; 14 – скоростная камера; 15 – ПК; 17 – фотодиод для регистрации яркости изображения усилителя яркости; 18 – осциллограф

Рисунок 5.32 – Экспериментальная установка для дистанционного наблюдения



1 – инициирующий лазер; 2 – механический затвор; 3, 8, 11, 15 – линзы (объективы);
 4 – объект на платформе; 5 – фотодиод для регистрации яркости собственного свечения;
 6, 12 – полосовые фильтры; 7 – USB-камера; 10 – нейтральный светофильтр; 13 – скоростная
 камера; 14 – ПК; 16 – фотодиод для регистрации яркости изображений усилителя яркости;
 17 – осциллограф

Рисунок 5.33 – Экспериментальная установка с традиционной схемой лазерного монитора

Пропорции, в которых смешивались порошки, представлены в таблице 4.2. Порошок в виде образца прямоугольной вытянутой формы помещался на алюминиевую подложку. Образцы были приготовлены с использованием формы и имели примерно одинаковые размеры $20 \times 5 \times 3$ мм³ для обеспечения времени горения, достаточного для визуализации. Инициирование горения производилось излучением непрерывного твердотельного лазера с длиной волны 532 нм и контролировалось затвором. Луч лазера со средней мощностью 200 мВт фокусировался на образец в области зрения лазерного монитора или сбоку от области зрения. На рисунке 5.34 приведены исходные образцы перед инициированием и продукты сгорания нанопорошка алюминия и смесей

наноAl+наноFe, наноAl+микроAl+наноFe, наноAl+микроAl+микроFe. Кадры процесса горения данных образцов в собственном свечении, записанные USB-камерой, показаны на рисунке 5.35.

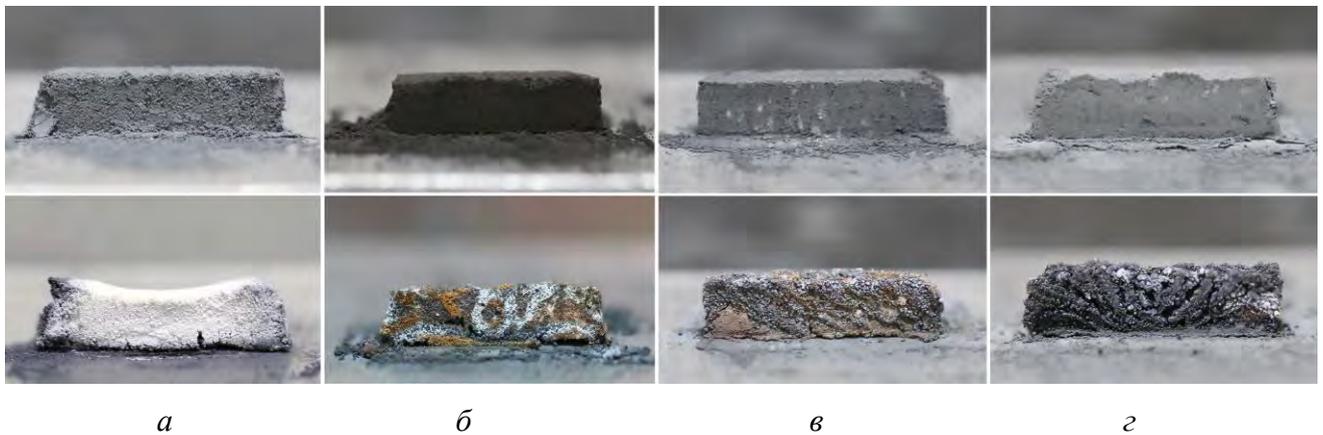


Рисунок 5.34 – Исходные образцы и продукты сгорания нанопорошка алюминия (а) и смесей наноAl+наноFe (б), наноAl+микроAl+наноFe (в), наноAl+микроAl+микроFe (г)

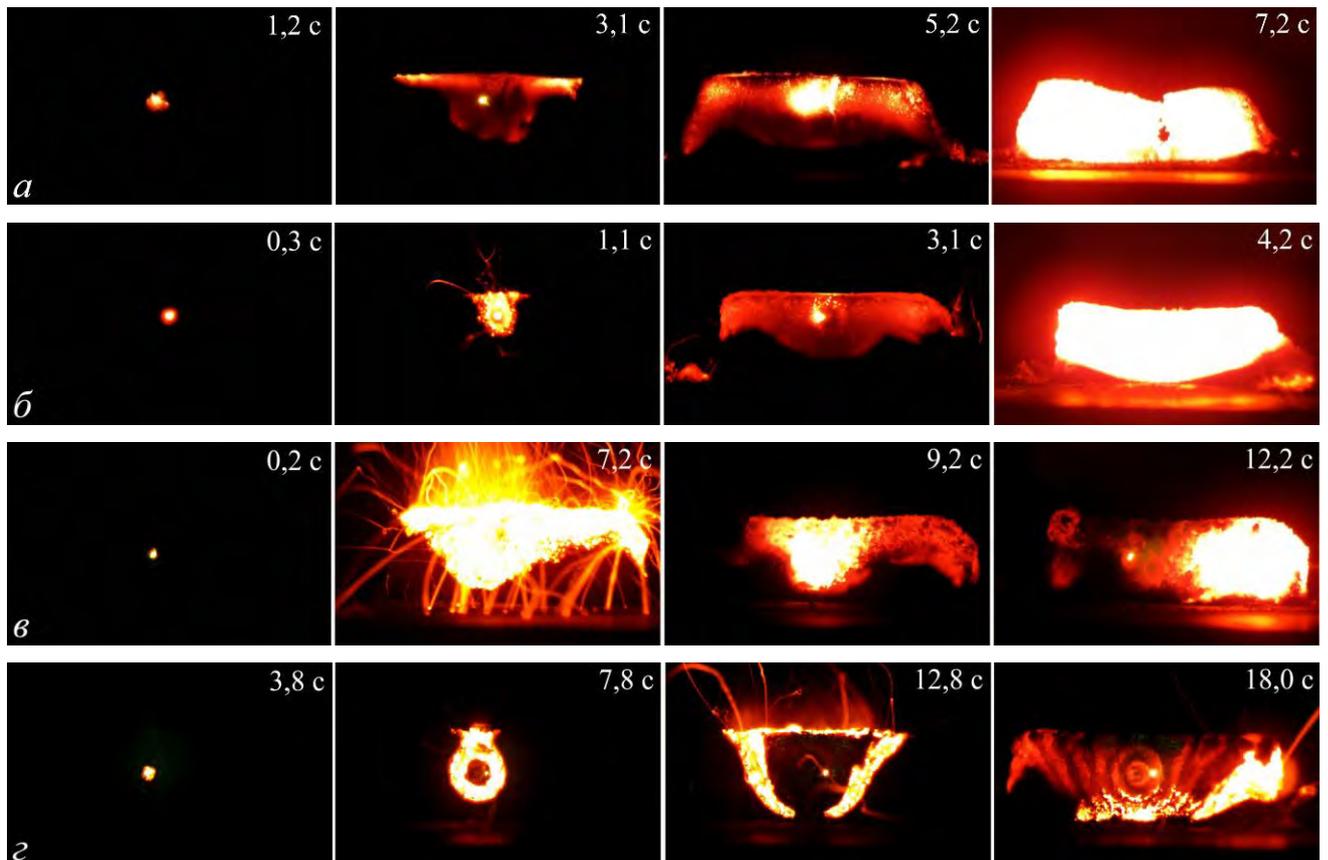


Рисунок 5.35 – Фотографии исходных образцов и продуктов сгорания нанопорошка алюминия (а) и смесей наноAl+наноFe (б), наноAl+микроAl+наноFe (в), наноAl+микроAl+микроFe (г)

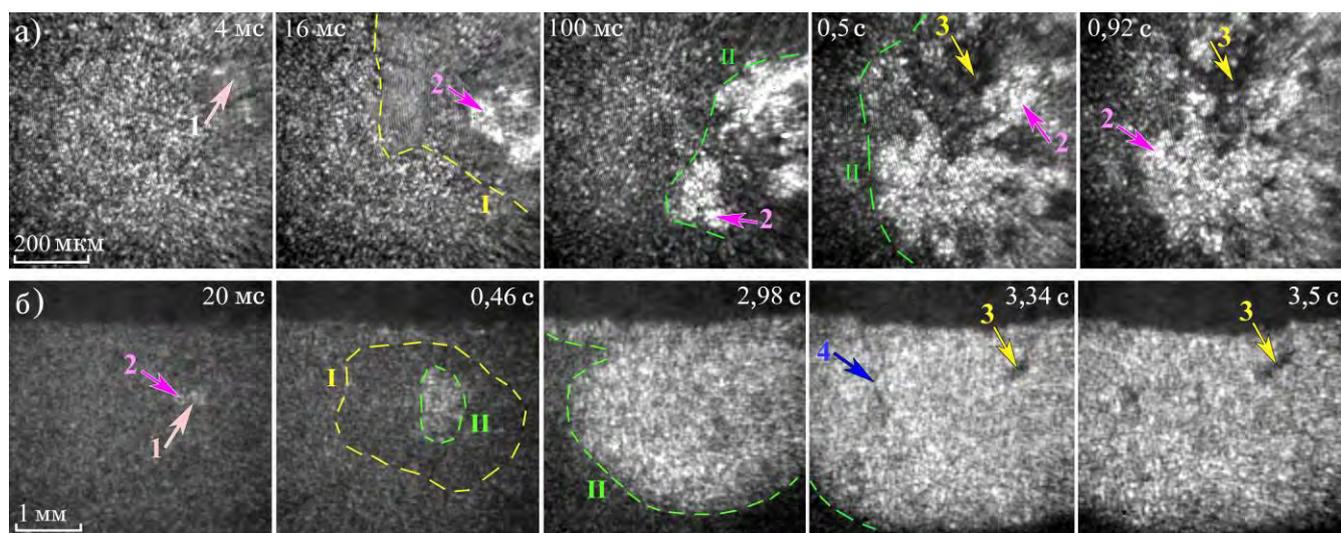
Как следует из представленных кадров видеозаписи, горение различных смесей протекает по-разному. Воспламенение и горение наноAl протекает плавно и равномерно (рисунок 5.35, *а*). Горение смеси $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ происходит почти так же, как горение наноAl , за исключением начальной стадии. Вначале наблюдается тепловой взрыв (рисунок 5.35, *б*). Смеси нанопорошков с крупнодисперсными порошками горят неравномерно, локализация различна, в некоторых случаях имеет место разлет продуктов сгорания. При иницировании смеси $\text{наноAl}+\text{микроAl}+\text{наноFe}$ наблюдается небольшой видимый нагрев в области воздействия лазера, в течение 7 секунд видимых изменений не происходит, затем происходит взрыв с разлетом продуктов сгорания. Спустя некоторое время горение в центральной области затухает, и происходит взрыв сбоку. Схожий характер горения имеет смесь $\text{наноAl}+\text{микроAl}+\text{микроFe}$, только горение имеет упорядоченный характер, распространяясь кольцевидным образом к краям образца.

Смесь порошков $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ имеет ярко выраженный темный цвет по сравнению с другими смесями. Обычно присутствие железа придает продуктам сгорания коричневый или желтый цвет. При сжигании порошков, содержащих микропорошок алюминия, на поверхности продуктов остаются полосы. Для смесей порошков $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ и $\text{наноAl}+\text{микроAl}+\text{микроFe}$ высокотемпературная стадия горения начинается в месте лазерного иницирования, поэтому она хорошо видна на продуктах. В случае наноAl и $\text{наноAl}+\text{микроAl}+\text{наноFe}$ место возникновения высокотемпературной стадии напрямую не связано с местом возгорания.

При непосредственном наблюдении мы анализируем процессе горения по его яркости, при этом напрямую получить информацию об изменениях поверхности во время горения невозможно. При лазерном мониторинге регистрируется излучение, отраженное от поверхности на длине волны генерации, что позволяет исследовать изменения с высокой частотой кадров. На рисунке 5.36, *а* представлены изображения поверхности горящего образца наноAl , полученные с помощью традиционного короткофокусного лазерного монитора (рисунок 5.33). На

рисунке 5.36, б приведены изображения поверхности другого горящего образца nanoAl , полученные с помощью дистанционного лазерного монитора (рисунок 5.32). Наблюдение производилось непосредственно в области воздействия иницирующего лазера. Время на рисунках отсчитано от начала лазерного воздействия. Запись изображений осуществлялась камерой Photron Fastcam SA1 (монохромная).

При горении nanoAl отчетливо видны две стадии горения. Через 0,46 с после начала зажигания (рисунок 5.36, б) в представленном случае произошел переход горения во вторую высокотемпературную стадию, полностью покрывающую образец через 2,98 с. На второй стадии началось образование агломератов, которые через 3,34 с заполнили практически всю область наблюдения, также произошло растрескивание поверхности образца.

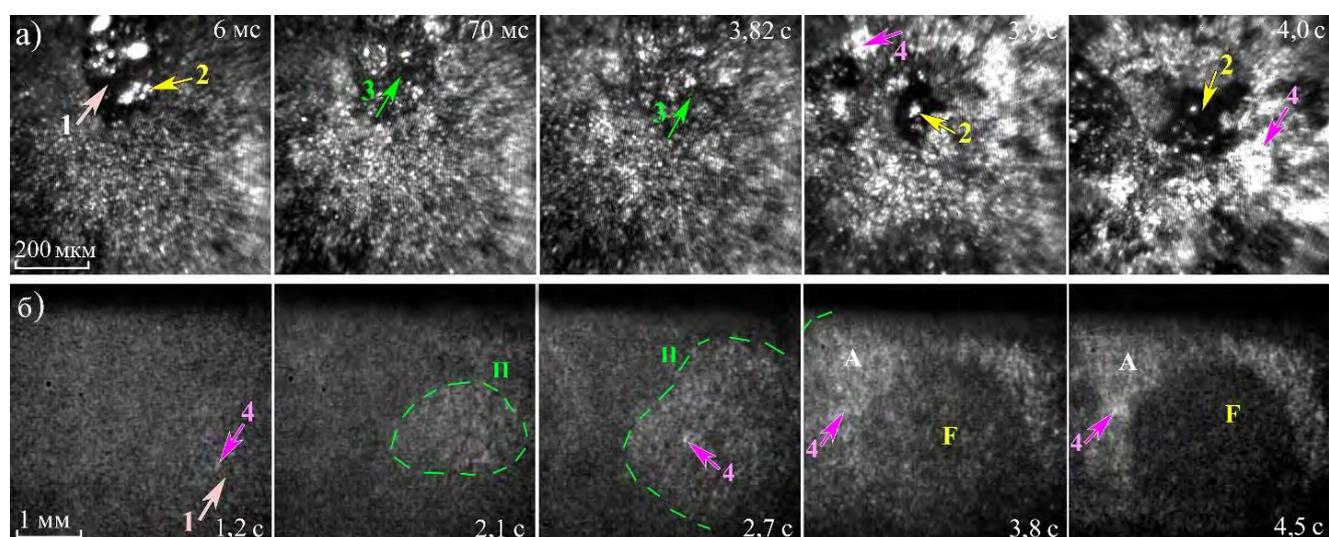


1 – область иницирования; 2 – агломераты; 3 – пустоты; 4 – трещина; I – первая волна;
II – вторая волна горения

Рисунок 5.36 – Кадры скоростной видеозаписи горения образца nanoAl , полученные лазерным монитором с традиционной (а) и дистанционной (б) схемами

На рисунке 5.37–5.39 представлены изображения скоростной видеозаписи для смесей $\text{nanoAl}+\text{nanoFe}$, $\text{nanoAl}+\text{микроAl}+\text{nanoFe}$ и $\text{nanoAl}+\text{микроAl}+\text{микроFe}$. На изображениях поверхности виден процесс преобразования относительно небольших сферических частиц в частицы неправильной формы. Спекание

порошка в процессе горения приводит к уплотнению вещества и образованию пустот. Заполнение поверхности объекта агломератами возможно за счет выделения продуктов горения из объема. Добавление нанопорошка железа (смесь $\text{наноAl} + \text{наноFe}$) изменяет характер горения по сравнению с наноAl без добавок. После начала горения на поверхности не происходит видимых изменений в течение следующих 3,75 секунды (рисунок 5.37, *а*). Мы считаем, что в это время происходит горение в объеме. Затем горение возвращается на поверхность с образованием агломератов более плотных продуктов горения.

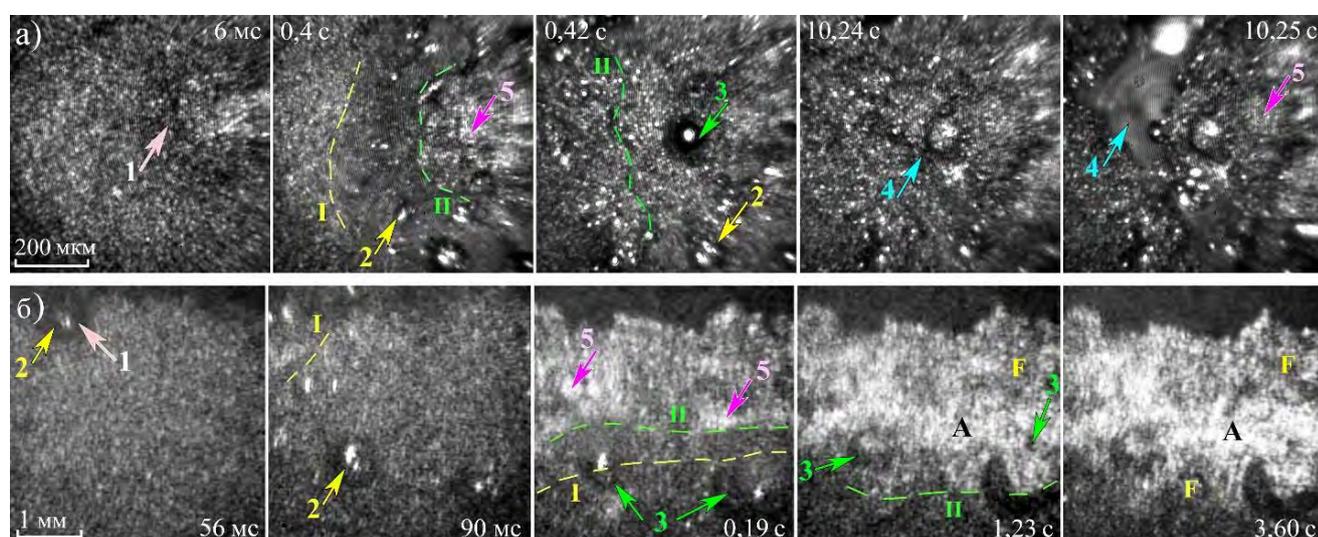


1 – область лазерного инициирования; 2 – жидкая фаза; 3 – полость; 4 – агломераты; II – вторая волна горения; A – соединения алюминия (белые); F – соединения железа (темные)

Рисунок 5.37 – Кадры скоростной видеозаписи горения смеси $\text{наноAl} + \text{наноFe}$, полученные с помощью лазерных мониторов с традиционной (*а*) и дистанционной (*б*) схемами

Поверхность смеси $\text{наноAl} + \text{наноFe}$ темнее поверхности наноAl без добавок, а также продуктов сгорания Fe_2O_3 ; поэтому яркость изображений лазерного монитора в дистанционной схеме невысокая (рисунок 5.37, *б*). Тем не менее на поверхности горящего образца различаются детали. Через 1,2 секунды после начала горения появляются яркие фрагменты, что свидетельствует об изменении отражения поверхности. Появление первых агломератов свидетельствует о начале второй волны горения в области наблюдения. К этому моменту завершилось распространение первой волны горения, и ее можно выделить в динамике только

путем анализа движения поверхности. В отличие от первой волны горения, распространение второй волны горения отчетливо различимо (2,1 с). К 2,7 с размер образца, охваченного второй волной горения, становится значительным, и как процесс горения, так и образование продукта происходят неравномерно. Через 3,8 с после инициирования горение перемещается в другие области образца, увеличивая их отражательную способность. Визуально поверхность на светлых участках на рисунке 5.37, б имеет белый цвет, обусловленный соединениями алюминия, а на темных участках – желто-коричневый цвет, что связано с соединениями железа.



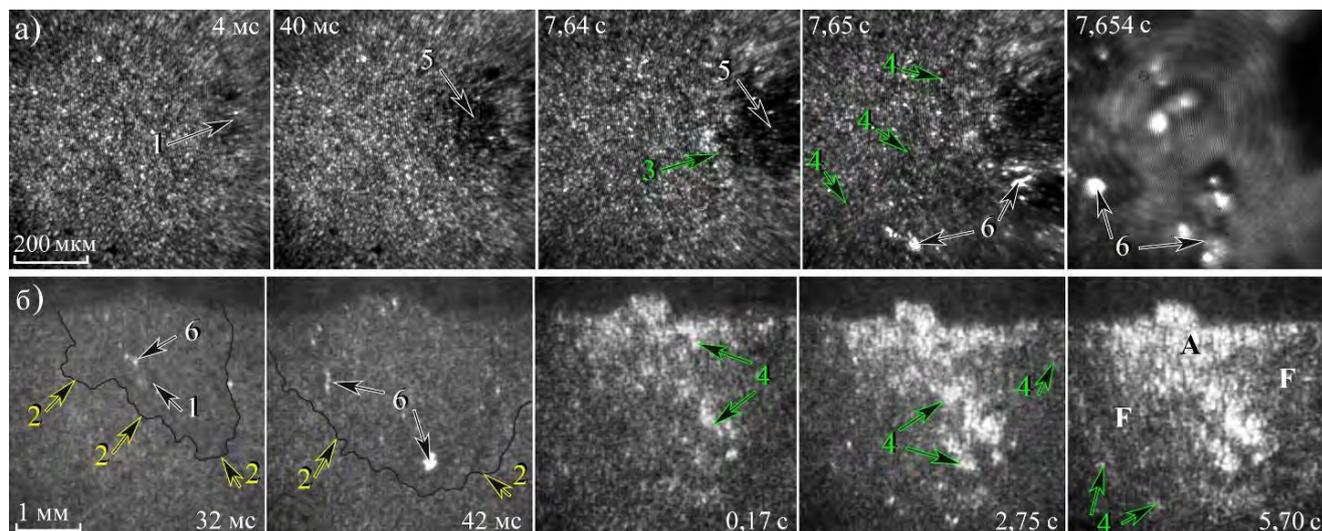
1 – область лазерного инициирования; 2 – разлетающиеся продукты сгорания; 3 – полости; 4 – трещина; 5 – агломераты; I – первая волна горения; II – вторая волна горения; А – соединения алюминия (белые); F – соединения железа (темные)

Рисунок 5.38 – Кадры скоростной видеозаписи горения смеси $\text{nanoAl} + \text{microAl} + \text{nanoFe}$, полученные с помощью лазерного монитора с традиционной (а) и дистанционной (б) схемами

Добавление микроAl к смеси $\text{nanoAl} + \text{nanoFe}$ значительно изменяет ход процесса горения и вид продуктов (рисунок 5.38). Горение смеси $\text{nanoAl} + \text{microAl} + \text{nanoFe}$ (рисунок 5.38) более неоднородное, сопровождается разлетом продуктов сгорания.

Воспламенение образца на рисунке 5.38, а происходит подобно nanoAl , но сопровождается разлетом полых сфер. Затем процесс переходит в объем. Через 10,2 с горение выходит на поверхность и сопровождается разлетом продуктов.

После инициирования горения образца на рисунке 5.38, б первые продукты начинают разлетаться через 56 мс. Скорее всего, разлет продуктов связан с большим объемом запасенного водорода [365]. Разлет продуктов сгорания происходит при механическом разрушении оболочки оксида алюминия и высвобождении поглощенного водорода. Через 90 мс появляются продукты с хорошей отражательной способностью, которые впоследствии образуют множество агломератов с разрывом образца и образованием пористой структуры (0,19 с и далее). После второй волны горения начинается охлаждение поверхности с образованием структуры в виде полос (1,23 с и далее), в которой соединения алюминия преобладают в белых областях, а соединения железа - в темных областях.



1 – область лазерного инициирования; 2 – распространение первой волны; 3 – появление второй волны; 4 – распространение второй волны; 5 – дефект поверхности, 6 – жидкая фаза; А – соединения алюминия; F – соединения железа; сплошная линия – граница первой волны

Рисунок 5.39 – Кадры скоростной видеозаписи горения смеси $\text{nanoAl} + \text{microAl} + \text{microFe}$, полученные с помощью лазерного монитора с традиционной (а) и дистанционной (б) схемами

Воспламенение смеси $\text{nanoAl} + \text{microAl} + \text{microFe}$ (рисунок 5.39, а) происходит подобно nanoAl , но сопровождается незначительным разлетом продуктов сгорания. Затем процесс уходит в объем. Через 7,6 с поверхность разрывается, и на поверхность выходит горение, которое также сопровождается разлетом продуктов сгорания. Разлет продуктов для случая на рисунке 5.39, б начался через 32 мс после

инициирования. В момент времени $\sim 0,1$ с появились продукты с хорошим отражением. Они сформировали пористую структуру с множеством агломератов и несплошностью образца. Таким образом, при горении $\text{наноAl} + \text{микроAl} + \text{микроFe}$ формируется плоский фронт горения с образованием структуры в виде полос с темными соединениями железа на поверхности. Результаты рентгенофазового анализа приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Рентгенофазовый анализ продуктов сгорания

Смесь	Исходный состав	Продукты сгорания	Содержание, мас. %
1	наноAl	AlN	25
		Al ₂ O ₃	19
		Al ₂ O ₃ corund	8
		Al	48
2	наноAl+наноFe	AlFe ₃	55
		AlN	22
		Al ₂ O ₃	14
		Al	9
3	наноAl+микроAl+наноFe	AlFe	65
		AlN	15
		Al ₂ O ₃	12
		Al	8
4	наноAl+микроAl+микроFe	AlFe	76
		Al	24

Результаты применения двух различных схем лазерных мониторов показали, что инициирование лучше всего наблюдать при большем увеличении (схема на рисунке 5.33), когда это безопасно для оптических элементов. Начало первой стадии горения идентифицируется как потемнение поверхности с последующим осветлением, видна область лазерного воздействия, продукты горения более детализированы. Дистанционно, при меньшем увеличении, желательно наблюдать распространение горения и макроскопические изменения на поверхности (например, появление трещин или полостей), а также равномерность изменения

поверхности. Использование обеих схем лазерного мониторинга позволяет провести более детальное изучение процесса горения и выявить особенности изменений морфологии поверхности, которые не видны или не четко видны при использовании только первой или второй схемы.

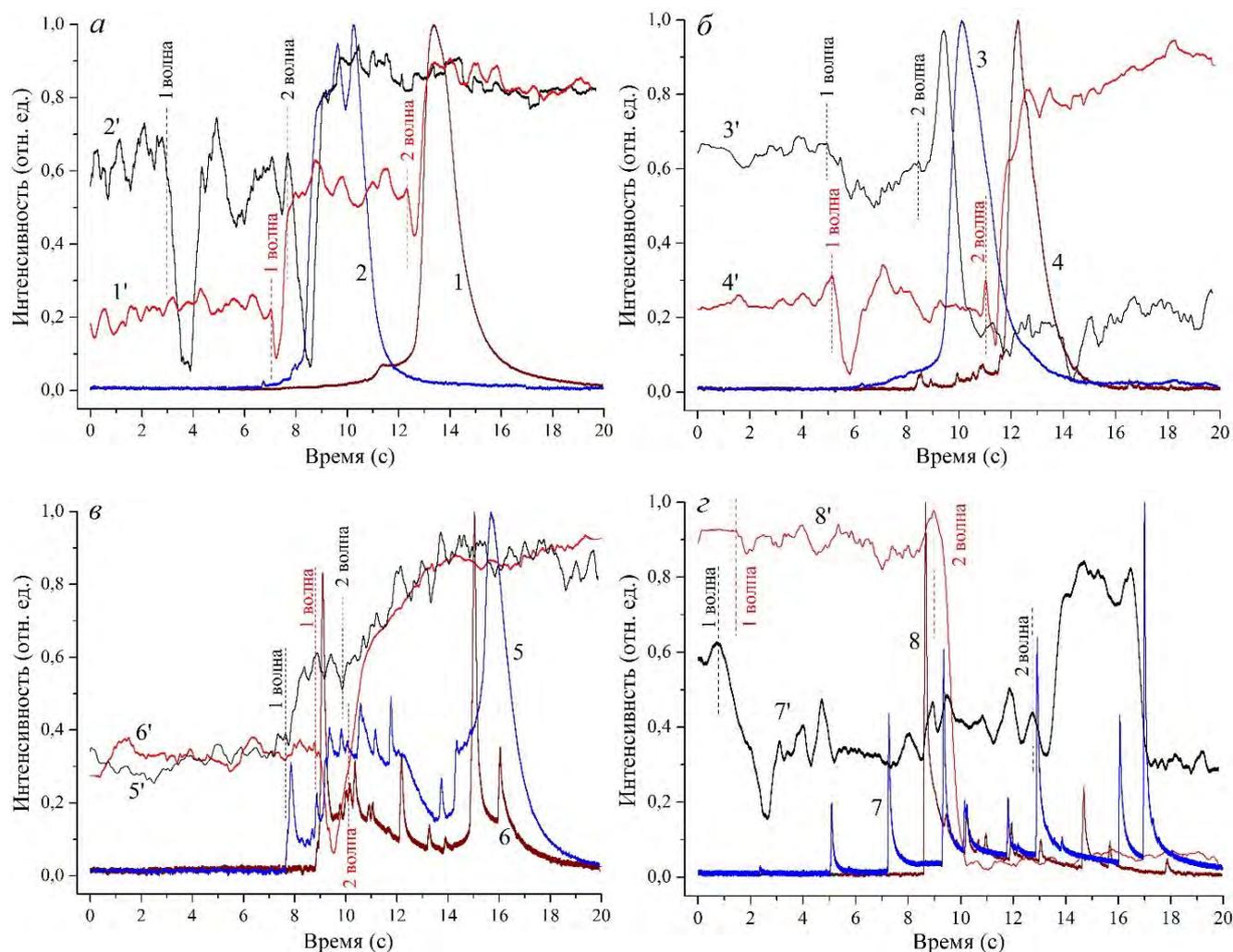
Скоростная визуализация с помощью лазерного монитора позволяет измерить скорость распространения фронта горения по поверхности образца. Точность измерений может быть достаточно высокой и зависит от увеличения лазерного монитора и частоты кадров. В частности, при скорости горения 10 мм/с и частоте кадров 1000 кадров/с погрешность измерения скорости горения, обусловленная скоростной видеозаписью, составляет ~1 %. Скорости горения смесей, исследованных с использованием схемы дистанционного лазерного монитора, представлены в таблице 5.4. Скорость оценивалась как максимальное расстояние, пройденное фронтом волны горения за время, равное количеству кадров, разделенных на скорость съемки (кадров/с). Исследовалось по восемь образцов каждой смеси. Значительный разброс значений объясняется неравномерностью образцов, изготовленных вручную. Также можно предположить, что в разных частях образца горение может происходить с разными скоростями.

Таблица 5.4 – Временные параметры горения

Смесь	Состав	Скорость первой волны горения, мм/с	Индукционный период, с	Скорость второй волны горения, мм/с
1	наноAl	3,4–7,2	1,68–4,67	0,6–0,8
2	наноAl+наноFe	3,8–5,4	3,20–3,50	1,6–3,3
3	наноAl+микроAl+наноFe	14,1–36,0	0,14–2,2	14,4–20,0
4	наноAl+микроAl+микроFe	17,2–21,8	0,052–0,068	9,2–11,8

В целом для смесей с железом скорость горения на второй стадии выше, чем у наноAl без добавок. Это свидетельствует о каталитической роли железа при горении порошковых смесей [366]. Смеси с микронными порошками горят значительно быстрее как на первой, так и на второй стадиях по сравнению с наноAl

и $\text{наноAl} + \text{наноFe}$. В частности, для смеси $\text{наноAl} + \text{микроAl} + \text{наноFe}$ мы наблюдаем, что скорость горения увеличивается в 2 раза на первой стадии и в 40 раз на второй стадии по сравнению с наноAl без добавок. Индукционный период практически исчезает. При этом характер горения становится неоднородным, в ряде случаев горение носит характер взрыва.



1, 3, 5, 7 – схема на рисунке 5.33; 2, 4, 6, 8 – схема на рисунке 5.32; а – наноAl ;
б – $\text{наноAl} + \text{наноFe}$; в – $\text{наноAl} + \text{микроAl} + \text{наноFe}$; г – $\text{наноAl} + \text{микроAl} + \text{микроFe}$

Рисунок 5.40 – Осциллограммы интенсивности свечения образца (кривые 1–8) и интенсивности излучения усилителя яркости (кривые 1'–8')

На рисунке 5.40 представлены осциллограммы средней яркости образцов, зарегистрированные фотодиодом, расположенным над образцами (фотодиод 5 на рисунках 5.32, 5.33), и средней интенсивности излучения усилителя яркости (17 на

рисунке 5.32, 16 на рисунке 5.33) для обеих конфигураций лазерного монитора. Для лучшего представления сигналы фотодиодов обрабатывались путем удаления их постоянной составляющей и нормализации. Из представленных данных следует, что кривая средней интенсивности на выходе усилителя яркости соответствует изменению интенсивности света, отраженного от поверхности объекта, для обеих схем мониторинга. Таким образом, изменения выходного сигнала усилителя яркости указывают на относительные изменения коэффициента отражения поверхности объекта. Косвенно мы можем определить появление трещин и разлет продуктов сгорания.

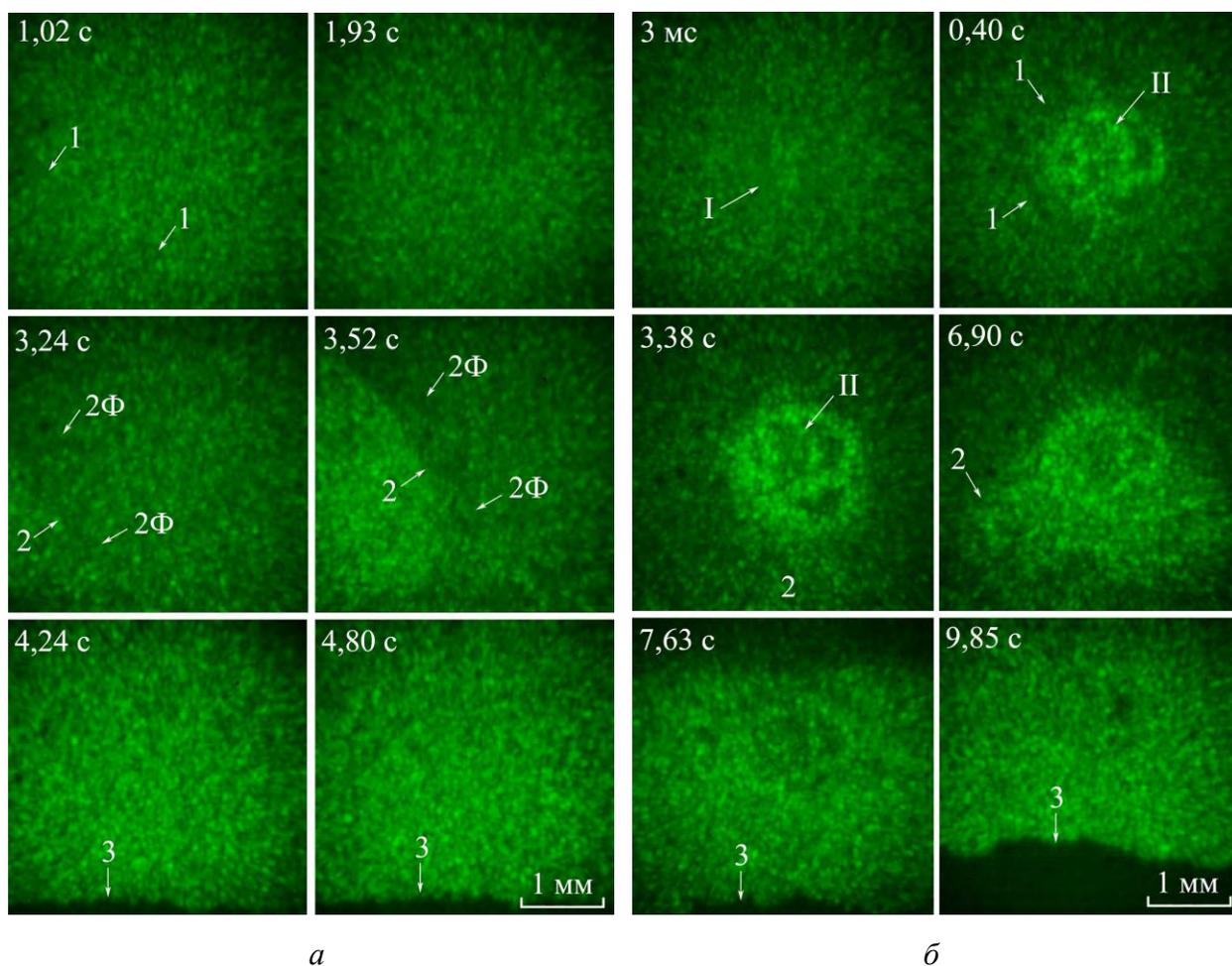
Сигнал усилителя яркости дает нам информацию о временных параметрах горения, таких как продолжительность первой и второй стадий горения и время между ними (индукционный период). Сигнал средней яркости образца позволяет судить о скорости горения, количестве локализаций, тепловом потоке, наличии вспышек и разлете продуктов. По кривым яркости свечения возможно судить о различии стадий горения различных образцов.

5.5.2. Особенности лазерного инициирования нанопорошков металлов, обнаруженные с использованием лазерного монитора

Лазерное инициирование – это высокотемпературный процесс, который сопровождается ярким свечением, которое формируется из широкополосного собственного свечения образца и отраженного инициирующего излучения. Лазерный монитор позволяет визуализировать поверхность нанопорошка непосредственно в области инициирования. При исследовании лазерного инициирования нанопорошка алюминия [294] мы обратили внимание, что продукты с высоким отражением образуются уже в ходе лазерного воздействия. В работах [301, 303] нами проведено сравнение характера распространения волн горения в области лазерного инициирования и за ее пределами.

На рисунке 5.41, *a* приведены кадры скоростной видеозаписи изображений поверхности нанопорошка алюминия, полученные с использованием лазерного

монитора во время горения, при инициировании слева от области наблюдения. На рисунке 5.42, *a* представлены кривые средней яркости изображений и коэффициента корреляции для горения двух образцов нанопорошка алюминия. Кривые 2 и 2' соответствуют процессу, представленному на рисунке 5.41, *a*. В момент инициирования и распространения первой волны горения на краю образца поверхность в области наблюдения меняется незначительно. Визуально, отличить изображения области наблюдения до примерно 1 с, практически невозможно. Средняя яркость изображений меняется незначительно, как и коэффициент корреляции изображений, который составляет 0,942–0,947.



a – инициирование слева от области наблюдения; *б* – инициирование в области наблюдения;
1 – первая волна горения, 2 – вторая волна, 2Ф – фронт второй волны, 3 – усадка

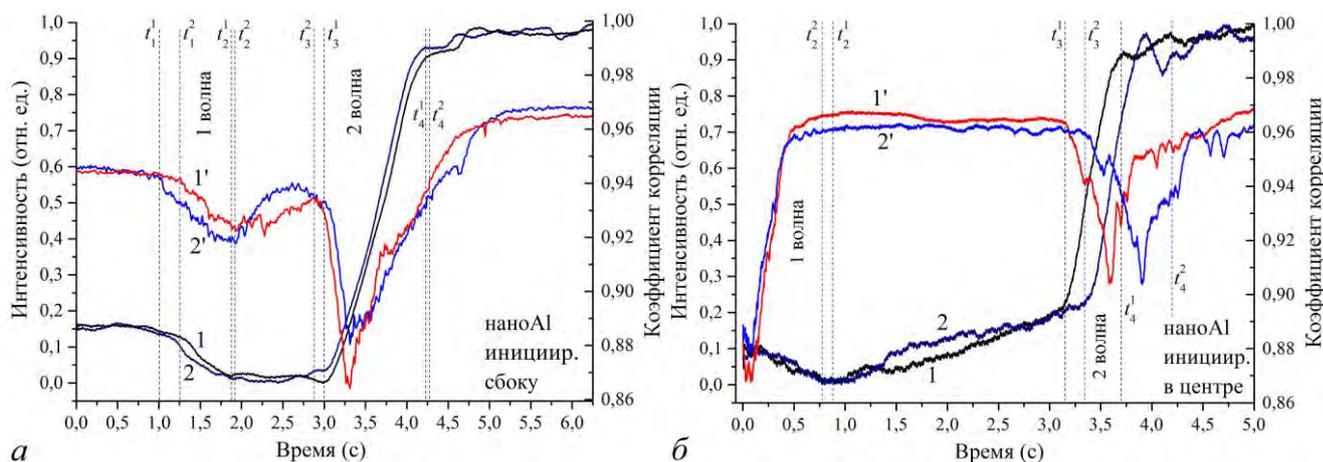
Рисунок 5.41 – Кадры скоростной видеозаписи горения нанопорошка алюминия с помощью лазерного монитора относительно начала лазерного зажигания

В момент времени 1,02 с на рисунке 5.41 отчетливо наблюдается прохождение первой волны горения (показана стрелкой и цифрой 1), которая приводит к визуальному снижению интенсивности изображений. На кривых на рисунке 5.41 в этот момент коэффициент корреляции изображений резко падает, что сопровождается спадом на кривой средней яркости. В интервал времени 1,9–3 с средняя яркость практически постоянна, при этом поверхность движется. Движение поверхности визуально наблюдается на изображениях лазерного монитора, о движении сигнализирует и изменение коэффициента корреляции.

Вторая волна горения сопровождается резким нарастанием интенсивности изображений и уменьшением коэффициента взаимной корреляции изображений. Граница второй волны показана цифрой 2 на рисунке 5.41. Интересно отметить, что перед границей второй волны присутствует темная полоса, обозначенная стрелкой и цифрой 3, – фронт волны горения. В минимуме коэффициента корреляции изображения максимально отличаются как за счет изменения яркости, так и за счет движения. В момент, когда быстрое нарастание яркости прекращается, вторая волна горения находится уже за пределами области наблюдения. На рисунке 5.41, б показаны изображения поверхности нанопорошка алюминия в области инициирования. На рисунке 5.42, б представлены кривые средней яркости изображений и коэффициента корреляции для горения еще двух образцов нанопорошка алюминия при таком инициировании. Кривые 1 и 1' соответствуют процессу, представленному на рисунке 5.41, б.

В первый момент времени в области инициирования начинается движение поверхности, визуально наблюдаемое как размытие (показано стрелкой 1). На графике коэффициента корреляции (кривая 1' на рисунке 5.42, б) наблюдается спад до минимального значения. Затем в течение 0,4 с (время воздействия лазера) коэффициент корреляции растет до значения, близкого к максимальному. Поскольку яркость соседних кадров отличается незначительно, можно сделать вывод, что в это время происходит, в основном, изменение структуры поверхности в области наблюдения. В то же время обращает на себя внимание образование

светлого пятна в области инициирования (обозначено стрелкой 2), по яркости аналогичного яркости изображения продуктов горения после прохождения второй волны горения. Предположительно, в области лазерного инициирования происходит образование конечных продуктов окисления, при этом вторая стадия горения не начинается непосредственно в области инициирования и во время инициирования. Светлое пятно в области инициирования, в целом, оказывает незначительное влияние на общую яркость изображения. В следующие 0,3–0,4 с коэффициент корреляции меняется незначительно, при этом изображение темнеет. В это время первая волна горения распространяется в области наблюдения (показана стрелками 1), меняется состав поверхности.

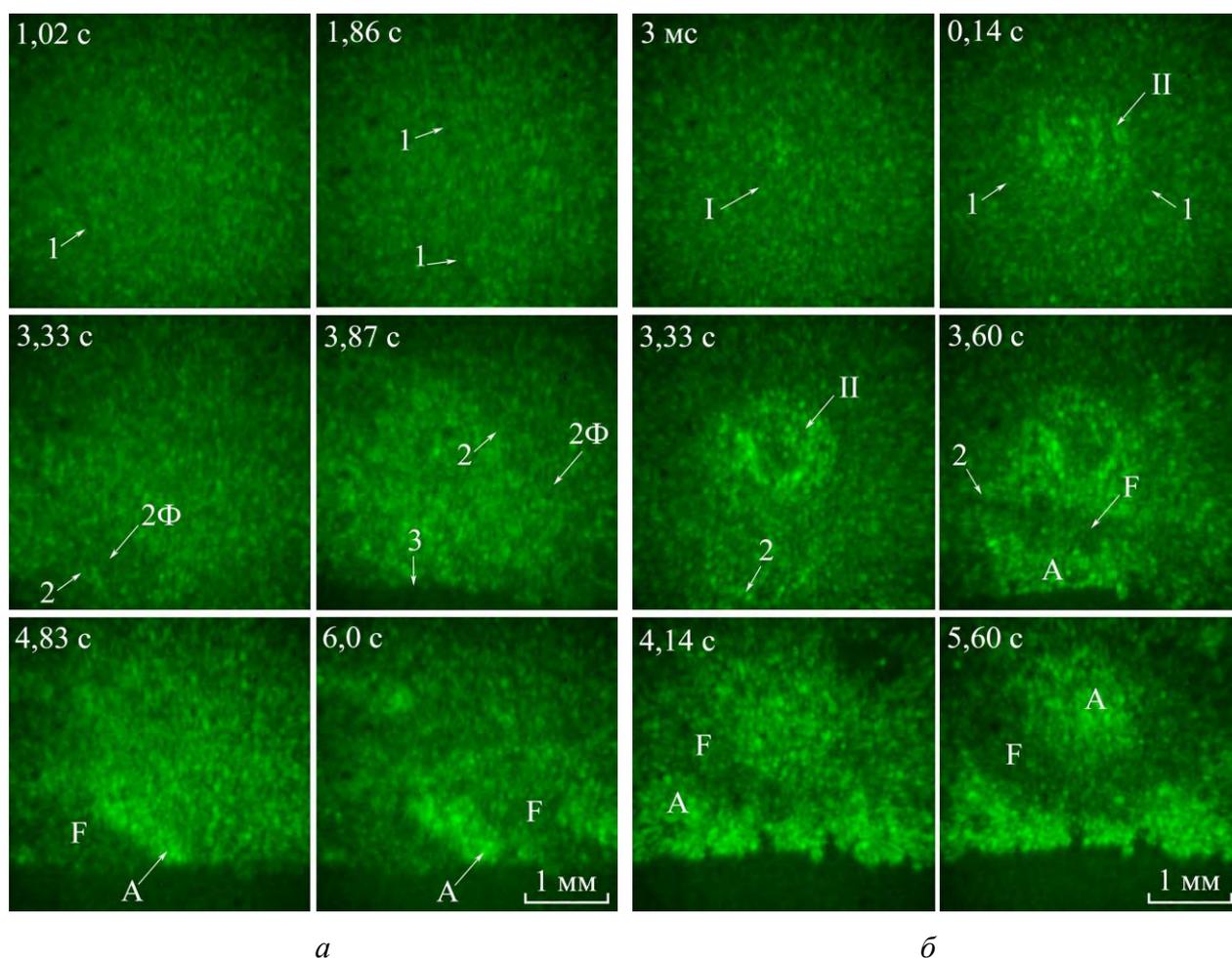


1, 2 – средняя яркость; 1', 2' – коэффициент корреляции; а – инициирование сбоку образца; б – инициирование в области наблюдения; $t_1^1, t_1^2, t_2^1, t_2^2, t_3^1, t_3^2, t_4^1, t_4^2$ – начало первой волны горения в области наблюдения, окончание первой волны, начало второй волны, окончание второй волны для первого образца; $t_1^1, t_1^2, t_2^1, t_2^2, t_3^1, t_3^2, t_4^1, t_4^2$ – те же временные параметры для второго образца

Рисунок 5.42 – Средняя интенсивность и коэффициент корреляции изображений лазерного монитора для двух образцов нанопорошка алюминия

Вторая стадия горения начинается в верхней части образца, где образец более рыхлый, и обеспечивается более эффективный контакт с воздухом (область 2). По мере распространения вторая волна проходит в области инициирования, выравнивая поверхность образца. После прохождения волны горения (время 7,63 с) в месте инициирования остается углубление, которое в процессе остывания

сглаживается. При остывании образца наблюдается значительная усадка. Вторая стадия сопровождается значительным изменением коэффициента отражения поверхности (момент времени t_3^1) и уменьшением коэффициента корреляции. Значение коэффициента корреляции также дает информацию о скорости изменения поверхности. Минимум коэффициента корреляции соответствует наибольшей скорости изменения поверхности. Для процесса 2 на рисунке 5.42, б характерно наличие колебаний средней яркости на второй стадии горения. Локальный максимум в момент времени 3,39 с соответствует локальному минимуму коэффициента корреляции, что подтверждает колебание поверхности в это время.



a – инициирование слева от области наблюдения; *б* – инициирование в области наблюдения;
 1 – первая волна горения, I – начальный нагрев в области инициирования, 2 – вторая волна горения, 2Ф – фронт второй волны горения, II – появление продуктов сгорания, 3 – усадка,
 А – продукты сгорания алюминия, F – продукты сгорания железа

Рисунок 5.43 – Кадры скоростной видеозаписи горения смеси $\text{nanoAl}+\text{nanoFe}$

Схожие отличия горения в области лазерного воздействия и в стороне наблюдаются также для смеси $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ (рисунок 5.43). При прохождении первой волны горения коэффициент отражения поверхности меняется незначительно. Тем не менее прохождение фронта волны горения визуально различается (показано стрелкой 1). Вторая волна горения, как и при горении наноAl , различается отчетливо. Ее прохождение сопровождается значительным изменением яркости изображений. В отличие от наноAl , при остывании смеси $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ яркость изображений уменьшается значительно. Это связано с образованием железосодержащих продуктов сгорания, имеющих рыжий цвет и меньший коэффициент отражения, по сравнению с продуктами сгорания алюминия.

Аналогично иницированию нанопорошка алюминия, во время лазерного воздействия в области иницирования образуются продукты сгорания (показаны стрелкой 2). Одновременно начинает распространяться первая волна горения (показана стрелками 3). Вторая волна горения начинается в верхней части образца и проходит вниз образца, в том числе повторно в области иницирования. В процессе прохождения первой волны горения образуются продукты с высоким коэффициентом отражения, предположительно содержащие алюминий. Яркость изображений растет, образец становится более светлым по сравнению с исходным. Во время остывания происходит усадка образца и формирование более темных продуктов сгорания. Образец приобретает неоднородную структуру по сравнению с нанопорошком алюминия. В области иницирования, как правило, присутствует кольцо, в стороны от области иницирования расходятся борозды.

При мощности иницирующего лазера 200 мВт в области воздействия жидкая фаза не наблюдалась (рисунки 5.36, б; 5.37, б). Жидкая фаза не наблюдалась и при иницировании лазером мощностью 2 Вт (рисунки 5.41, 5.43). Мы полагаем, что пространственного разрешения дистанционной схемы лазерного монитора недостаточно для регистрации мелких капель жидкости в процессе горения. При использовании лазерного монитора с фокусным расстоянием 8 см наблюдались процессы образования пор и жидкой фазы на поверхности образца, заполнение пор

продуктами из объема с $\times 10$ оптическим увеличением. Для случая, представленного на рисунке 5.44, область наблюдения лазерного монитора практически совпадала с областью лазерного воздействия. При иницировании горения нанопорошка алюминия лазерным излучением мощностью 2 Вт и продолжительностью воздействия 0,3 с присутствует жидкая фаза во время иницирования. Жидкая фаза алюминия присутствует во время иницирования и окисляется после отключения иницирующего лазера. Размер капель составил 20–60 мкм.

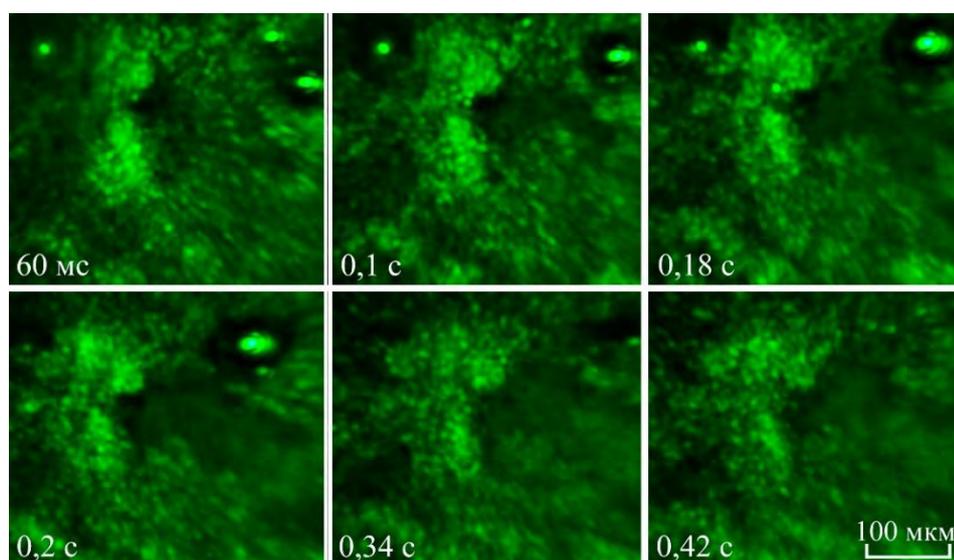
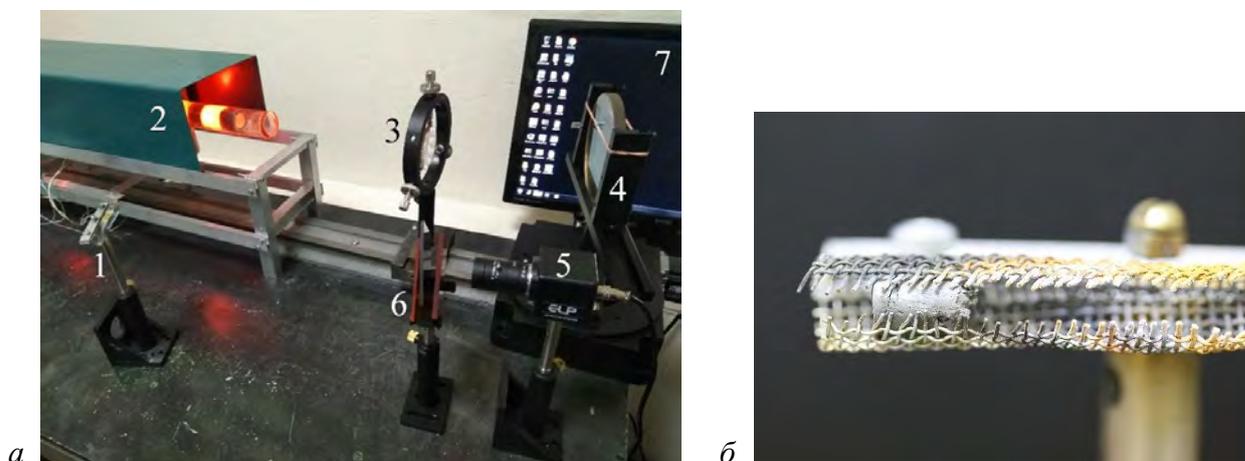


Рисунок 5.44 – Результаты визуализации поверхности образца наноAl во время первой волны горения с использованием традиционного короткофокусного лазерного монитора

5.5.3. Наблюдение горения модельного высокоэнергетического материала с использованием лазерного монитора

Примером объекта, горение которого сопровождается факелом и интенсивным разлетом продуктов сгорания, является твердое топливо на основе микропорошка алюминия [367]. Нами использовалась модельная алюминизированная твердотопливная смесь, содержащая 16% инертного связующего СКДМ-80, 68 % перхлората аммония и 16 % микропорошка алюминия АСД-6. Образец имел форму цилиндра диаметром 8 мм и высотой 12 мм. Образец размещался горизонтально и закреплялся с помощью сетчатого основания, в центральной части которого имелся зазор для наблюдения с использованием лазерного монитора, как показано на

рисунке 5.45, б. Горение инициировалось газовой горелкой и сопровождалось интенсивным свечением и разлетом продуктов сгорания [295].

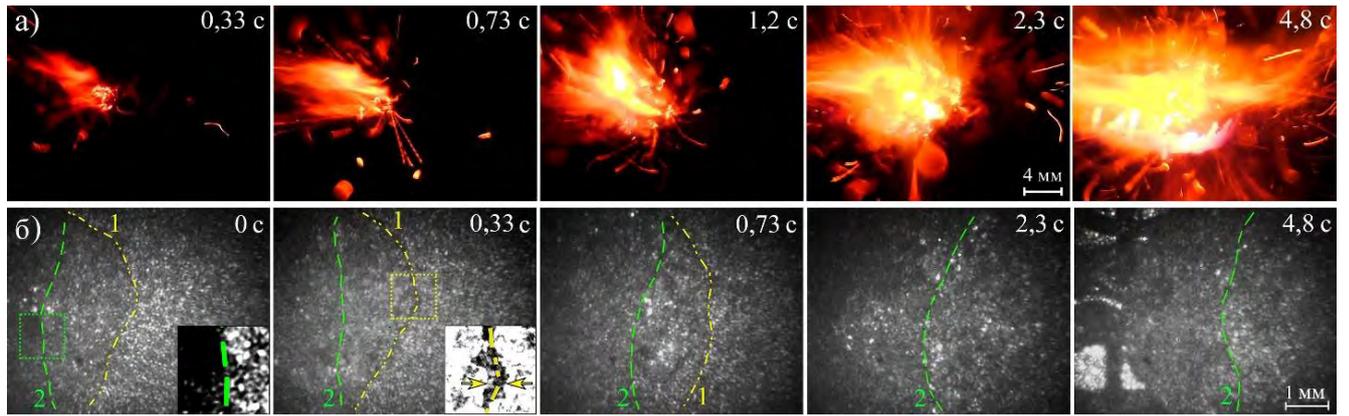


1 – объект наблюдения, 2 – усилитель яркости, 3 – линза, 4 – вогнутое зеркало, 5 – USB-камера,
6 – фильтры, 7 – компьютер

Рисунок 5.45 – Фрагмент схемы лазерного монитора для наблюдения горения модельного твердого топлива (а) и внешний вид образца (б)

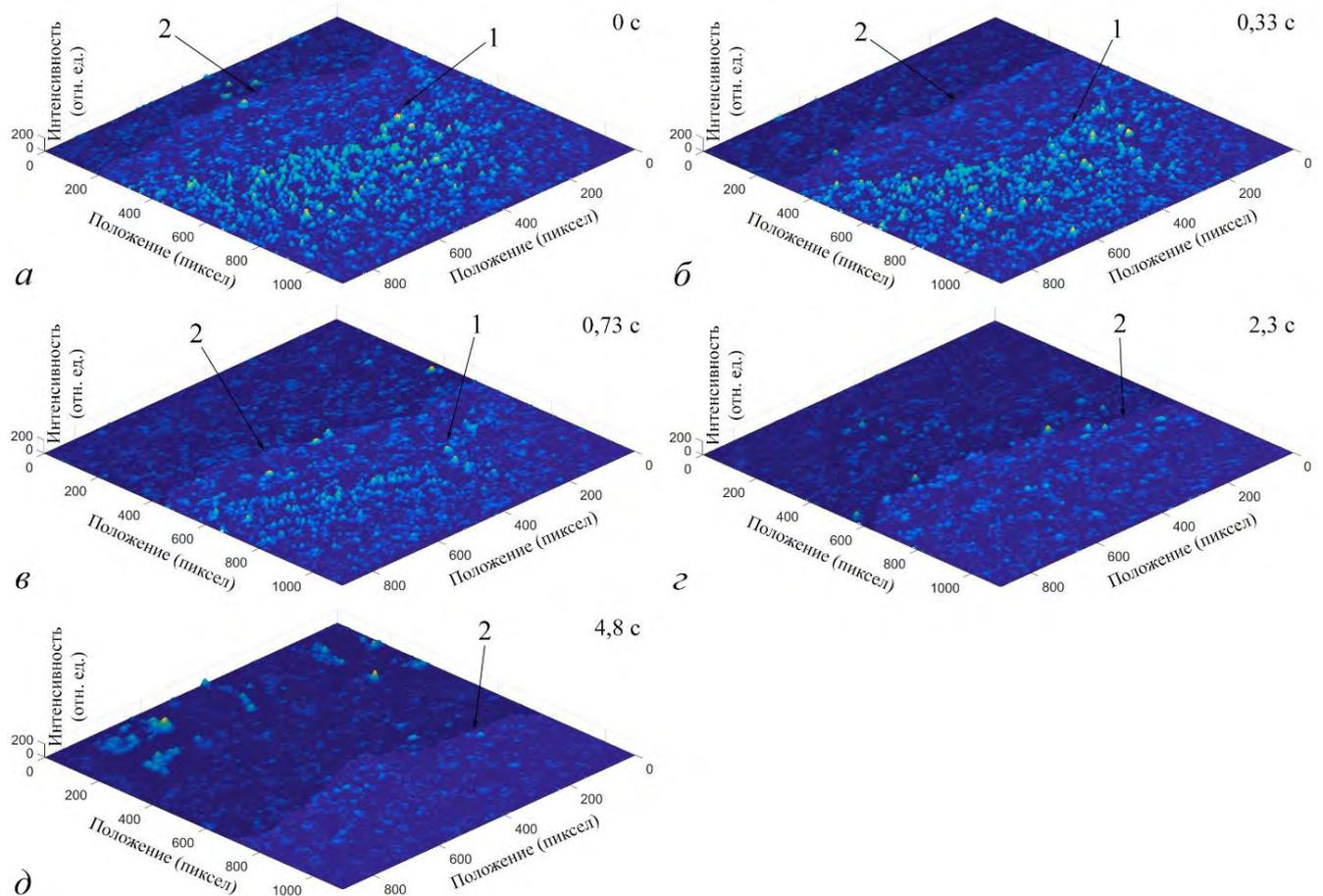
На рисунке 5.46, а показаны кадры процесса горения смеси при прямом наблюдении. Разброс продуктов достигал ~ 20 см. Очевидно, что наблюдать горящую поверхность с помощью лазерного монитора с коротким фокусным расстоянием, подобного представленному на рисунке 5.33, без риска повреждения линзы невозможно. Поэтому нами применялась схема на рисунке 5.45, а с увеличенным до 50 см расстоянием до объекта исследования.

На рисунке 5.46, б показан процесс горения, записанный с использованием лазерного монитора. Фронт горения, распространяющийся по поверхности образца, визуально хорошо выражен (штрихпунктирная желтая линия 1 на рисунке 5.46, б). Пунктирной зеленой линией обозначена примерная граница твердой части образца и факела. Разлетающиеся с поверхности продукты горения размывают эту границу. Ориентировочное положение фронта горения и границы образца оценивалось по кадрам скоростной записи. Затем положение уточнялось путем варьирования яркости и контрастности изображений лазерного монитора, а также путем анализа трехмерного представления изображений (рисунок 5.47).



Время отсчитано от начала записи; штрихпунктирная линия (1) – фронт горения; пунктирная линия (2) – граница сплошной части образца, вкладки – фронт и граница образца

Рисунок 5.46 – Кадры скоростной видеозаписи горения модельного твердого топлива, полученные путем прямой видеорегистрации (а) и с использованием лазерного монитора (б)



а–д – различные моменты времени; 1 – фронт горения; 2 – граница твердой части образца и факела

Рисунок 5.47 – Трехмерное представление изображений лазерного монитора на рисунке 5.46, б

По кадрам видеозаписи возможно оценить скорость и характер перемещения фронта горения и границы твердой части образца. В частности, средняя скорость распространения видимого фронта горения составила 1,4 мм/с. В момент времени 2,3 с видимый фронт горения вышел за пределы области наблюдения. Ширина фронта, показанная на вкладке на рисунке 5.46, б, составила 100–200 мкм.

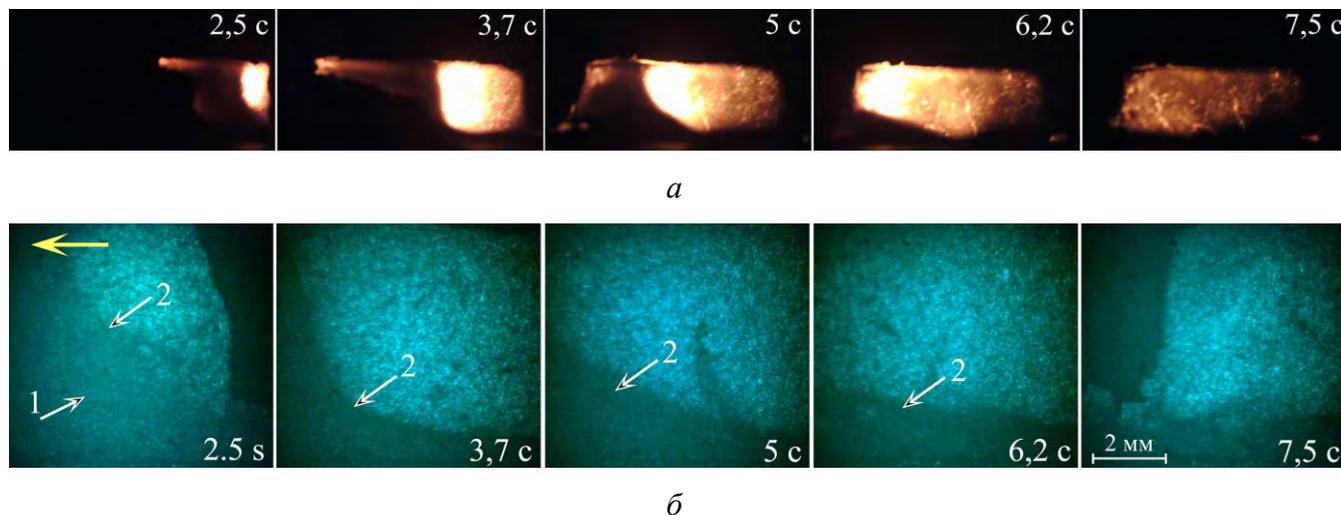
За фронтом образовался факел, который наблюдался на изображениях лазерного монитора как турбулентность из мерцающих пятен на поверхности. После того, как образец уменьшился в процессе горения, он начал двигаться внутри сетчатого каркаса до полного сгорания. Через 4,8 с наблюдалась поверхность образца и сетка за ним. На краю образца, т.е. в области более интенсивного разлета продуктов сгорания, поверхность имела меньшее отражение.

5.5.4. Результаты применения лазерного монитора с перемещаемой областью наблюдения

По сравнению с известными лазерными мониторами с неподвижной областью наблюдения, лазерный монитор с перемещаемой областью наблюдения на основе дистанционной схемы с поворотной платформой расширяет возможности наблюдения, позволяя исследовать всю сторону образца во время распространения горения. На рисунке 5.48, а показаны кадры видеозаписи процесса горения нанопорошка алюминия в собственном свете. Одновременно проводилась запись изображений лазерным монитором (рисунок 4.27) при повороте платформы. На рисунке 5.48, б показаны кадры скоростной съемки процесса горения нанопорошка алюминия при повороте платформы с постоянной скоростью 0,16 °/с. Скорость подобрана экспериментально и примерно соответствовала скорости горения. Кадры были горизонтально отражены для получения реального изображения.

Съемка в собственном свете дает панорамное изображение образца, при этом наиболее яркий фронт горения засвечивает изображение. Применение лазерного монитора позволяет наблюдать поверхность сквозь яркое свечение. Наблюдая поверхность горения нанопорошка алюминия, можно сделать вывод, что скорость

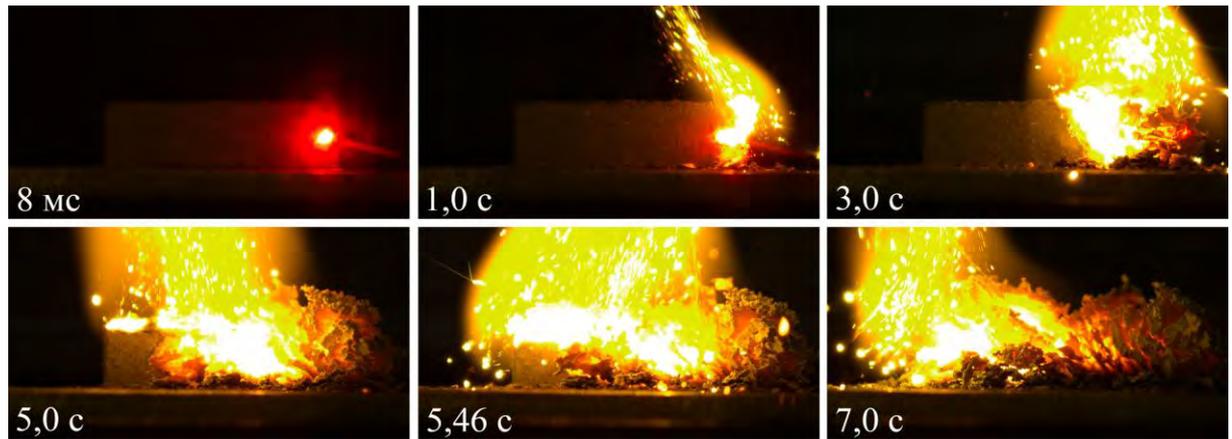
горения практически постоянная по образцу, при этом образец горит ровным фронтом. Также наблюдаются растрескивание образца и его усадка.



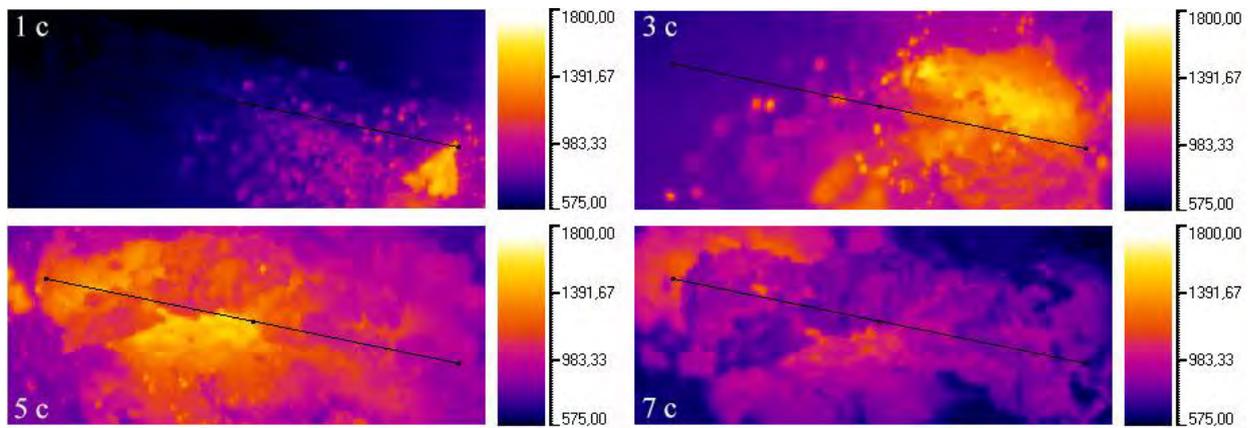
Желтой стрелкой показано распространение горения. 1 – первая волна, 2 – фронт второй волны

Рисунок 5.48 – Горение нанопорошка алюминия в воздухе при видеозаписи в собственном свечении (а) и с использованием лазерного монитора при повороте платформы (б)

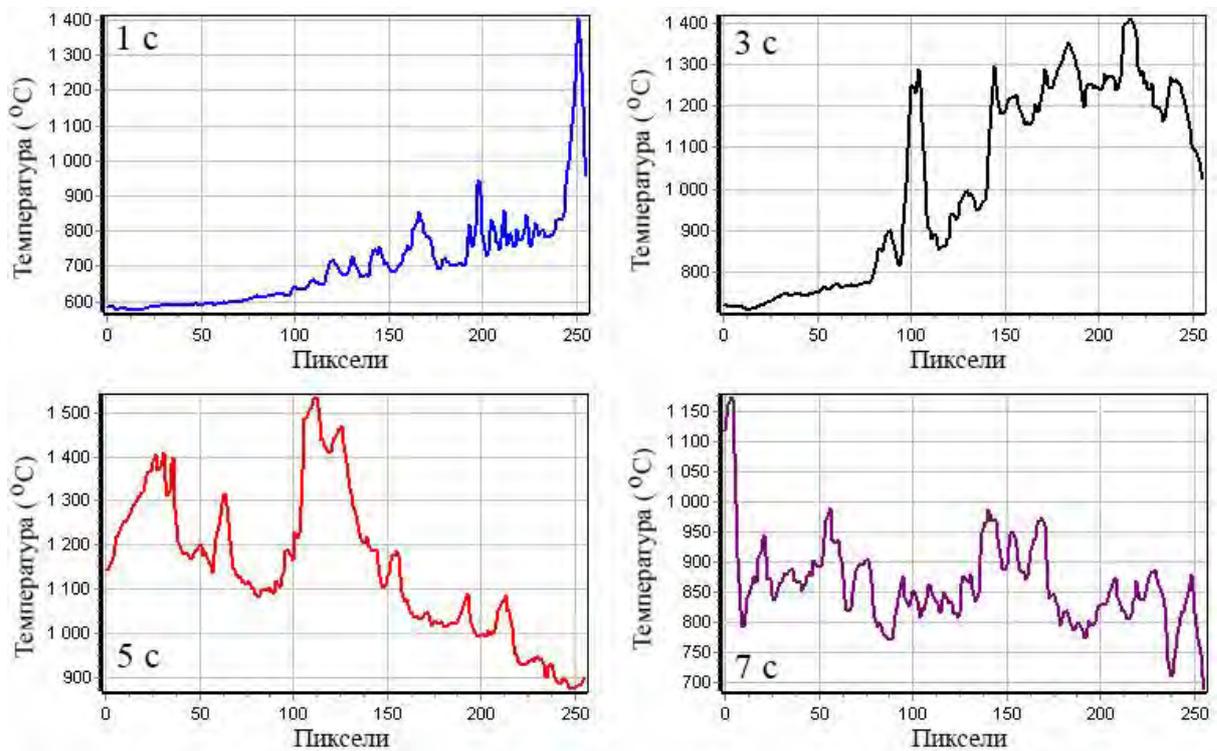
Металлотермические реакции широко применяются в технологических процессах металлургического производства. В таких реакциях происходит экзотермическое взаимодействие смеси порошков металлов с оксидами. Примером таких реакций является горение термитных смесей $\text{TiO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$, $\text{ZrO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$, $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{наноAl} + \text{C}$ в воздухе. Горение таких смесей протекает при высокой температуре, с выделением энергии, и сопровождается ярким свечением и разлетом продуктов сгорания. На рисунке 5.49 в качестве примера приведены кадры горения смеси $\text{TiO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$ при использовании скоростной и тепловизионной камер. ИК-камера размещалась над образцом (рисунок 4.2, б, в). Профили температуры, измеренные ИК-камерой (рисунок 5.49, в), показывают, что температура в области максимальной яркости составляет 1400–1540 °С. Горение термитных смесей наблюдалось с использованием схемы лазерного монитора для дистанционного наблюдения процессов высокотемпературного горения с поворотной платформой (рисунок 4.27).



a



б



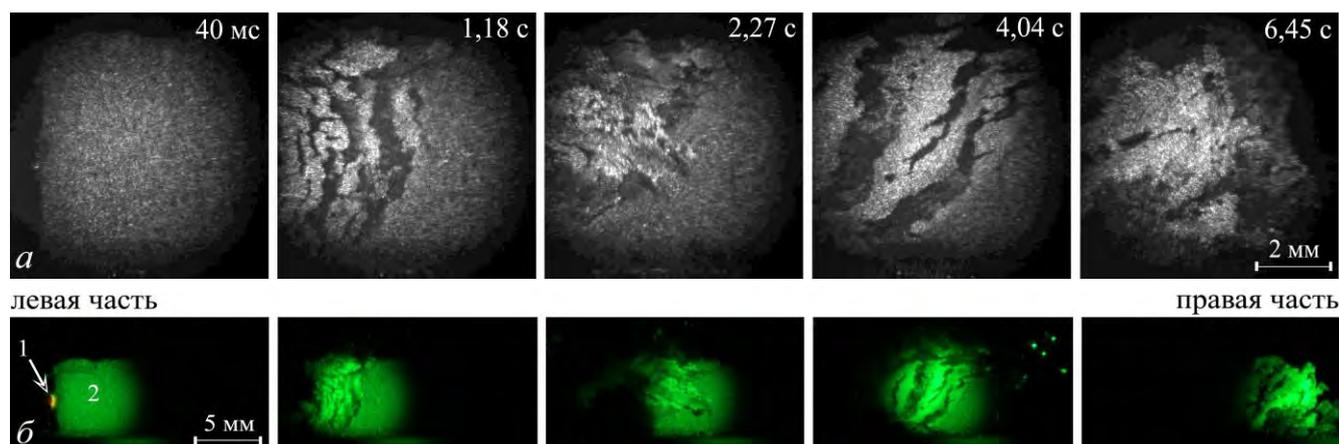
в

Рисунок 5.49 – Горение смеси TiO_2 +наноAl+C в собственном свечении, записанное с использованием скоростной (а) и ИК-камеры (б), и профили температуры (с)

В этой части работы нами использовались две скоростные камеры: Photron Fastcam SA1 регистрировала изображения лазерного монитора; Phantom Miro C110 регистрировала собственное свечение горения. Обращает внимание, что нейтральный светофильтр 13, установленный перед камерой 11 (рисунок 4.27), полностью не подавляет излучение на длине волны усилителя яркости, и в области наблюдения лазерного монитора одновременно реализуется режим лазерной подсветки, что позволяет наблюдать распространение первой волны горения [298]. Интенсивность излучения плазменного слоя над поверхностью образца при прохождении первой волны горения меньше интенсивности излучения лазерного монитора, отраженного от поверхности объекта. Вторая волна горения нанопорошка алюминия имеет большую яркость, чем отраженное от поверхности излучение лазерного монитора, и не позволяет в полной мере использовать режим лазерной подсветки.

Режим лазерной подсветки реализован нами путем установки узкополосного фильтра с полосой пропускания 510 ± 5 нм перед объективом камеры Phantom Miro C110, регистрирующей собственное свечения образца. На рисунке 5.50 приведены изображения горения смеси $\text{TiO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$, полученные с пассивной фильтрацией и с использованием лазерного монитора. Инициирование осуществлялось с торца образца слева. Область наблюдения перемещалась по мере горения образца слева направо. Так как лазерный монитор дает перевернутое изображение, для удобства сопоставления изображения лазерного монитора трансформировались.

Сравнение полученных изображений показывает, что лазерная подсветка с пассивной узкополосной фильтрацией практически полностью подавляет засветку от иницирующего излучения и широкополосное собственное свечение. Это позволяет качественно оценивать распространение горения по образцу. При этом, собственное свечение на длине волны фильтрации добавляет яркость изображения в этой области, что снижает детализацию изображений. Присутствуют также пересвеченные фрагменты на изображениях.

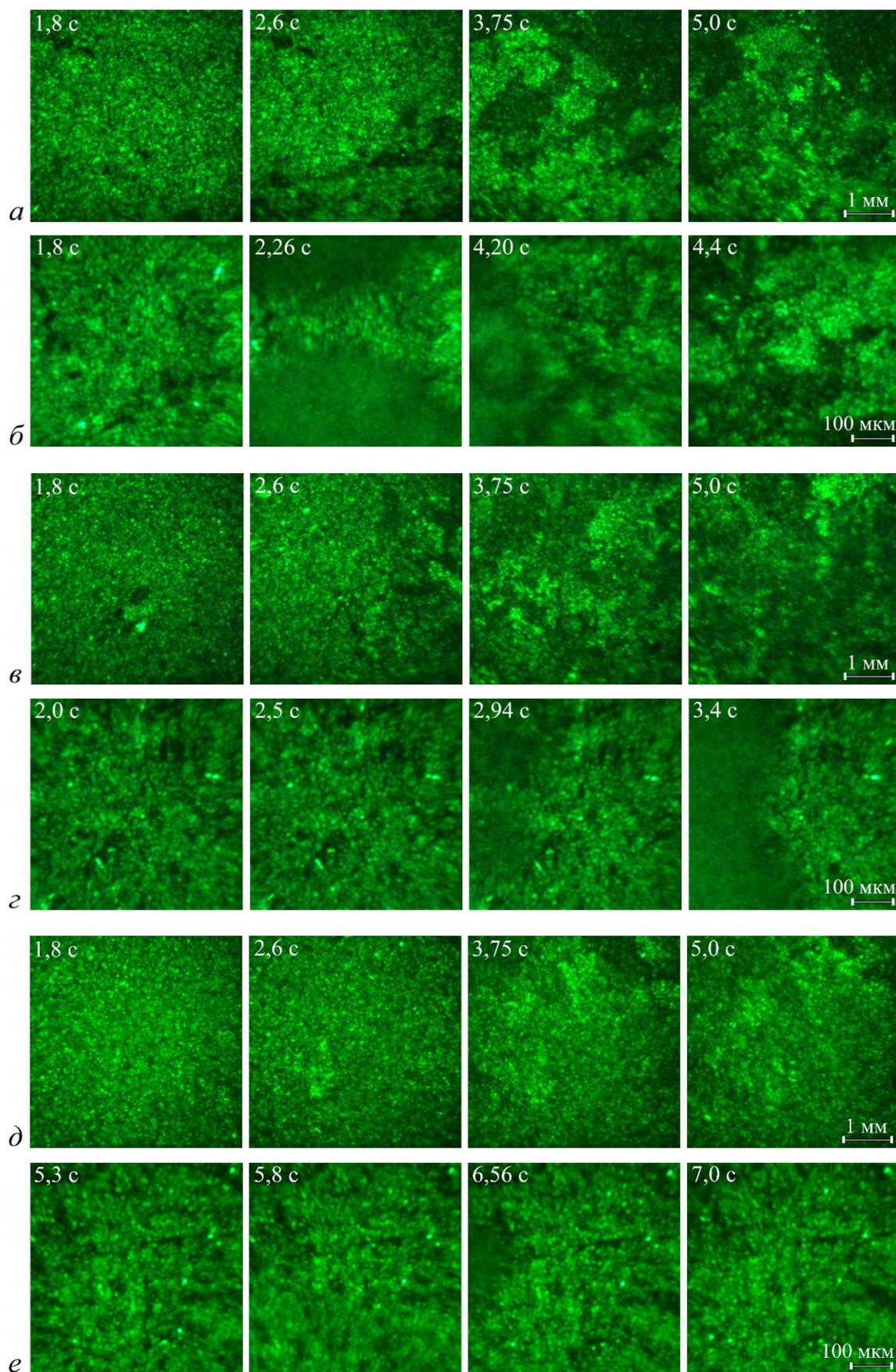


1 – место лазерного инициирования, 2 – область наблюдения

Рисунок 5.50 – Горение смеси TiO_2 +наноAl+C в воздухе при видеозаписи с использованием лазерного монитора (а) и пассивной фильтрации (б) при повороте платформы

Применение лазерного монитора позволяет наблюдать поверхность с высокой детализацией, при этом полностью отсутствуют пересвеченные фрагменты. Вращение фокусирующего зеркала позволяет перемещать область наблюдения лазерного монитора по мере распространения горения и наблюдать изменение поверхности в различных частях образца.

На рисунке 5.51 приведены результаты визуализации поверхности термитных смесей Nb_2O_5 +наноAl+C, TiO_2 +наноAl+C и ZrO_2 +наноAl+C с различным увеличением (пространственное разрешение 12 мкм и 5 мкм). На изображениях отсутствуют детали, характерные для капель. При относительно малом увеличении (рисунки 5.51, а, в, е) газовая фаза практически не видна, о ее наличии свидетельствует разрыхление поверхности. При большем увеличении видны сгустки газовой фазы при прохождении волны горения в области наблюдения. Визуальное наблюдение с использованием лазерного монитора свидетельствует о закономерности горения термитных смесей TiO_2 +наноAl+C, Nb_2O_5 +наноAl+C и ZrO_2 +наноAl+C по механизму «твердое тело → газ», минуя жидкую фазу.



a, б – TiO_2 +наноAl+C; *в, г* – Nb_2O_5 +наноAl+C; *д, e* – ZrO_2 +наноAl+C

Рисунок 5.51 – Горение термитных смесей при различном увеличении лазерного монитора

5.6. Возможности бистатического и двухканального лазерных мониторов при исследовании горения энергетических материалов

С использованием схемы на рисунке 4.52 осуществлялась визуализация горения наноAl и смеси наноAl+наноFe. Основные результаты представлены в работах [297, 298]. На рисунке 5.52 показаны кадры визуализации горения образцов наноAl, полученные лазерным монитором без лазерной подсветки (моностатическим) и с лазерной подсветкой (бистатическим). На рисунке 5.53 приведены аналогичные последовательности кадров, полученные во время горения смеси наноAl+наноFe.

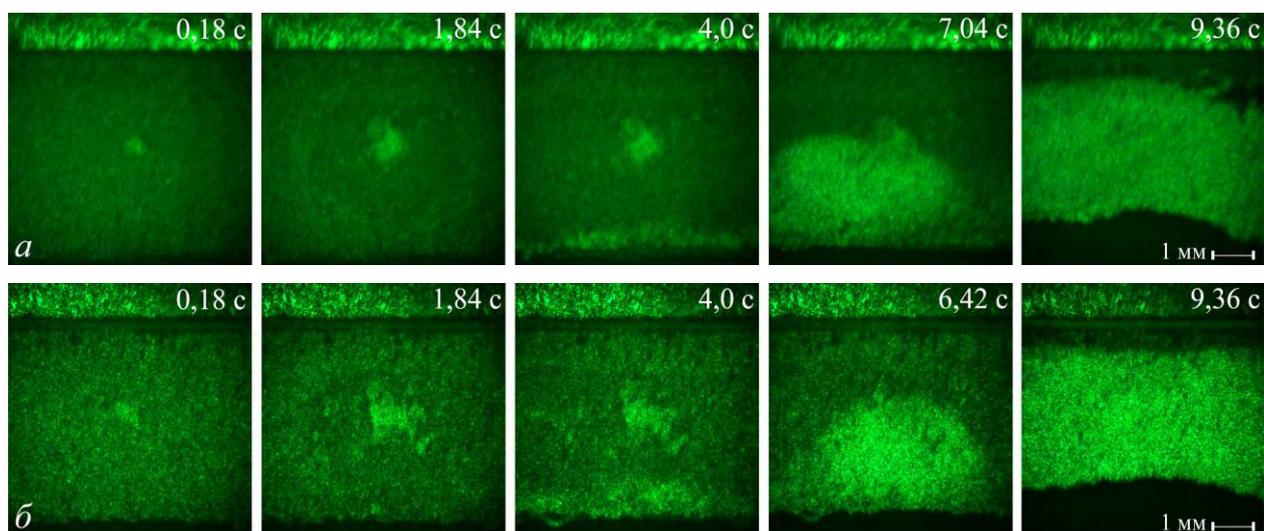


Рисунок 5.52 – Кадры скоростной видеозаписи лазерного инициирования и горения наноAl, полученные с использованием моностатического (*a*) и бистатического (*б*) лазерных мониторов в различные моменты времени от начала инициирования

Из представленных изображений следует, что независимая лазерная подсветка значительно увеличивает яркость и контраст изображений лазерного монитора. Смесь наноAl-наноFe имеет более темный цвет по сравнению с наноAl. Поэтому без подсветки даже граница образца до горения практически неразличима. Сложно увидеть образовавшиеся пустоты и более темные железосодержащие продукты. С подсветкой видна не только граница образца, но и детали поверхности. Продукты сгорания также выглядят более контрастными. Нанопорошок алюминия без

добавок горит равномерно, в результате продукты сгорания относительно ровные. Они визуализируются как моностатическим, так и бистатическим лазерными мониторами. Тем не менее, с лазерной подсветкой граница между выгоревшей частью образца и несгоревшим слоем вдоль подложки видна более отчетливо. В частности, на рисунке 5.53, *а* слой вдоль подложки выглядит однородным, а на рисунке 5.53, *б* видна разница между более темным частично прогоревшим слоем вдоль продуктов сгорания и тонким слоем исходного наноAl вдоль подложки. Более отчетливо видны полости, образовавшиеся при усадке в нижней части образцов.

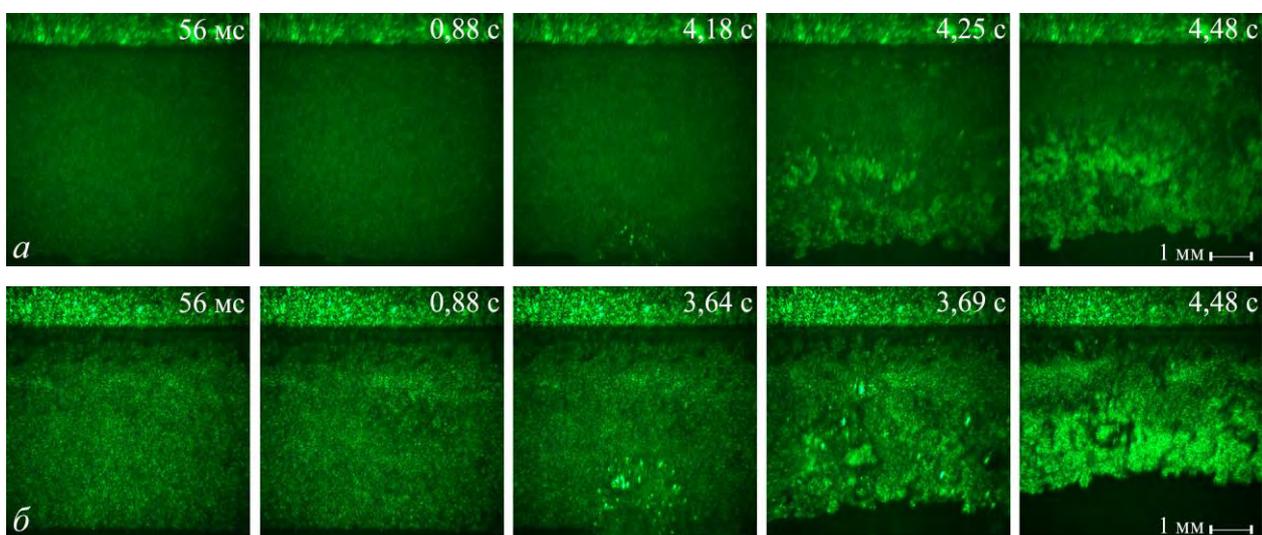


Рисунок 5.53 – Кадры скоростной видеозаписи лазерного инициирования и горения наноAl+наноFe, полученные с использованием моностатического (*а*) и бистатического (*б*) лазерных мониторов в различные моменты времени от начала инициирования

Для сравнения проведена визуализация наноAl с использованием лазерного монитора с подсветкой от CuBr-лазера с емкостной накачкой (рисунок 4.54). Результаты визуализации представлены на рисунке 5.54. Положение образцов и элементов схемы для рисунков (*а*) и (*б*) сохранялось одинаковым, излучение лазера подсветки контролировалось механическим затвором. Из полученных данных следует, что в качестве лазера подсветки могут использоваться лазеры как с традиционной, так и с емкостной накачкой. В целом, для изображений бистатического лазерного монитора характерен высокий спекл-контраст, обусловленный когерентной подсветкой. В то же время, следует отметить, что при

лазерной подсветке от CuBr-лазера с емкостной накачкой наблюдалось периодическое движение спеклов, не связанное с движением поверхности. Вероятно, это обусловлено работой ГРТ с емкостной накачкой при предельно низком напряжении 6 кВ, до которого заряжалась собственная накопительная емкость ГРТ. Поскольку накопительные емкости усилителя яркости и лазера подсветки заряжались от одного импульсного источника питания, вероятно, не обеспечивалась высокая стабильности разряда в ГРТ с емкостной накачкой.

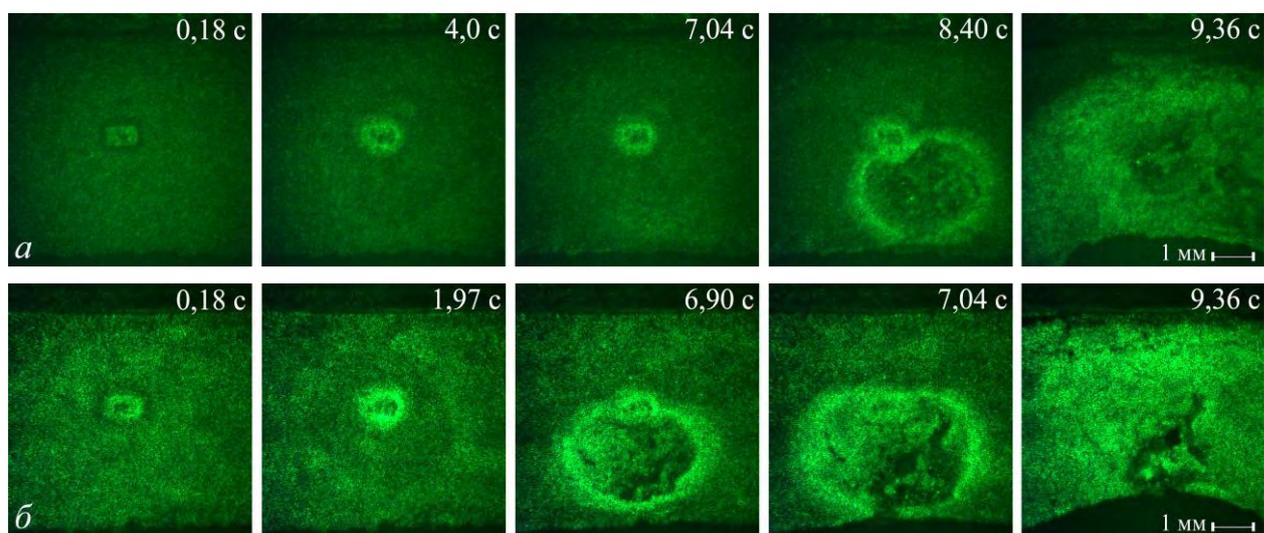
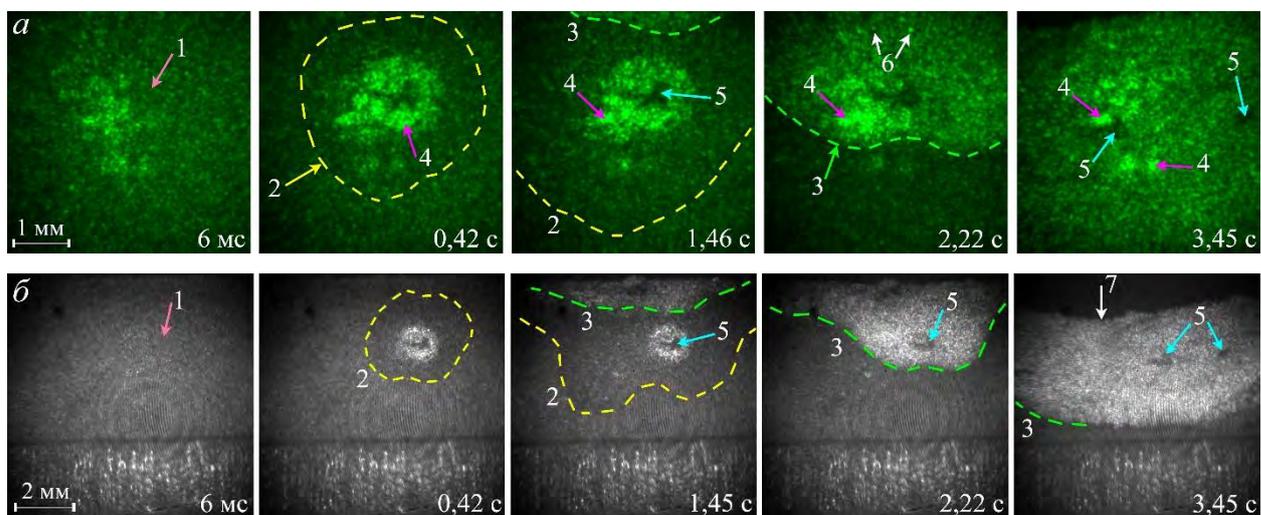


Рисунок 5.54 – Кадры скоростной видеозаписи лазерного инициирования и горения nanoAl, полученные с использованием моностатического (а) и бистатического (б) лазерных мониторов в различные моменты времени от начала инициирования

Возможности предложенного двухканального лазерного монитора проверялись при визуализации горения nanoAl и смесей nanoAl+АСД-6М+микроFe и nanoAl+АСД-6М+nanoFe. На рисунке 5.55 представлены кадры горения образца nanoAl в воздухе, зарегистрированные с помощью предлагаемого двухканального лазерного монитора. Области наблюдения обоих каналов перекрывались, поэтому область лазерного инициирования видна на обеих последовательностях кадров. На кадрах обозначены характерные особенности горения нанопорошка алюминия: две стадии горения, образование продуктов с более высоким отражением на второй стадии горения и агломерация частиц.

Разное разрешение позволяет исследовать поверхность образца с разным

пространственным разрешением. Агломерация и наличие жидкой фазы в зоне воспламенения лучше видны при большем увеличении. Распространение волны горения по образцу лучше видно при меньшем увеличении. Согласно рисунку 5.55, б, распространение первой волны после зажигания относительно равномерно во всех направлениях. Достигнув верхней части образца, первая волна горения распространяется быстрее. Вторая волна горения также быстрее распространяется по верху. В случае горения наноAl вторая волна горения не начинается в области воспламенения, хотя в точке воздействия лазера практически сразу появляются продукты горения с высоким отражением, предположительно нитрид алюминия. Вторая волна горения повторно проходит через зону возгорания, выравнивая поверхность. В частности, заполняется полость, образовавшаяся в месте взаимодействия лазерного излучения с поверхностью образца. Когда вторая волна горения проходит большую часть образца, происходит значительная усадка.

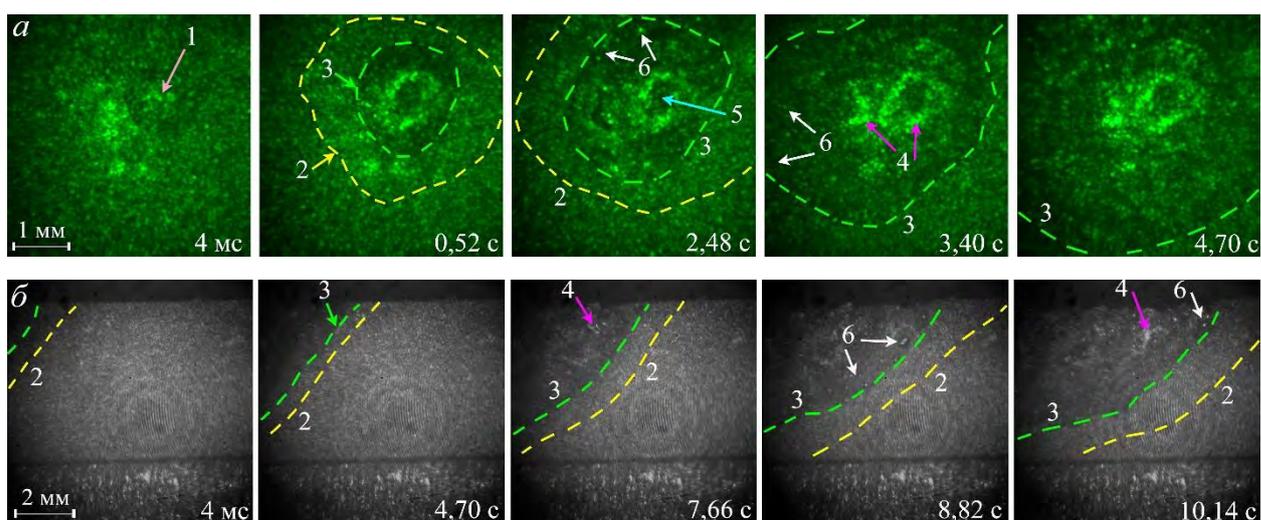


a – камера 2 (рисунок 4.58); *б* – камера 1; 1 – область лазерного инициирования; 2 – первая волна горения; 3 – вторая волна; 4 – агломераты; 5 – полости; 6 – жидкая фаза; 7 – усадка

Рисунок 5.55 – Кадры скоростной видеозаписи горения наноAl, полученные двухканальным лазерным монитором (отображенные по отношению к оригинальным)

На рисунке 5.56 представлен процесс инициирования и горения смеси наноAl+АСД-6М+микроFe при визуализации в соседних областях. Канал ВА1 (камера 2) регистрировал область лазерного инициирования. Канал ВА2 (камера 1)

регистрировал соседнюю область. После 4,7 с горение выходит за пределы зоны наблюдения ВА1 и переходит в зону наблюдения ВА2. До этого времени в зоне ВА2 не происходит значительных изменений. Горение представленной смеси в целом неравномерное. Во время лазерного воздействия образуются алюминий содержащие продукты с высоким отражением. Наблюдается кольцевое распространение волны горения, которое при удалении от места инициирования превращается в полосы. Кольца и полосы имеют более темный цвет, следовательно, состоят преимущественно из продуктов, содержащих железо. Продукты сгорания смеси $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{микроFe}$ обычно темнее, чем у наноAl без добавок. Поверхностное отражение практически не меняется после первой волны горения; первая волна определяется как движение поверхности. За первой волной следует вторая волна, при этом горение снова не проходит через область инициирования.



a – камера 2 (рисунок 4.58); *б* – камера 1; 1 – область лазерного инициирования; 2 – первая волна горения; 3 – вторая волна горения; 4 – агломераты; 5 – полости; 6 – жидкая фаза

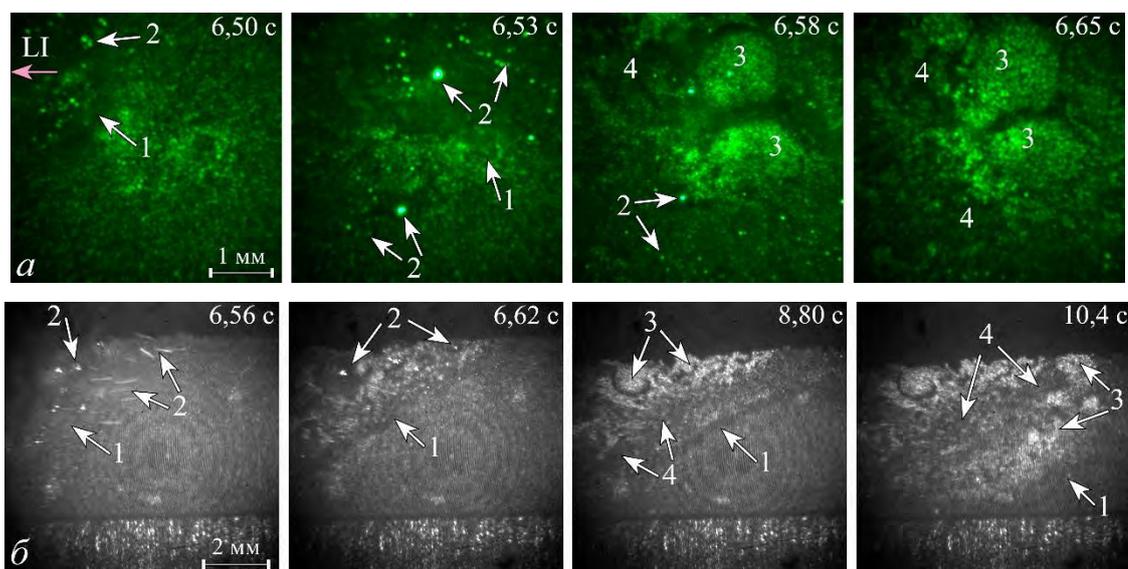
Рисунок 5.56 – Кадры скоростной видеозаписи горения смеси $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{микроFe}$, полученные двухканальным лазерным монитором (отображенные)

Задержка между первой и второй волнами горения незначительная. Полость, образовавшаяся в месте воздействия лазера, не исчезает и присутствует в продуктах сгорания (рисунок 5.57). Как и в случае горения нанопорошка алюминия без добавок, горение вдоль верхней поверхности образца $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{микроFe}$

идет быстрее, чем ближе к подложке. На наш взгляд, это связано с большей площадью контакта с воздухом, а также с отводом тепла на алюминиевую подложку. При горении смеси $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{микроFe}$ жидкая фаза существенная по сравнению с горением наноAl . Жидкость видна вдоль фронта второй волны горения.



Рисунок 5.57 – Продукты сгорания наноAl (а) и смесей $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{микроFe}$ (б) и $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{наноFe}$ (в)



а – камера 2 (рисунок 4.58); б – камера 1; 1 – фронт горения, 2 – жидкая фаза / разлетающиеся продукты, 3 – алюминий содержащие продукты (белые), 4 – железо содержащие продукты (темные), LI – положение области лазерного воздействия

Рисунок 5.58 – Кадры скоростной видеозаписи горения смеси $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{наноFe}$, полученные двухканальным лазерным монитором (отображенные)

На рисунке 5.58 представлена последовательность кадров визуализации двух областей образца смеси $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{наноFe}$, записанных одновременно двумя скоростными камерами. Области наблюдения усилителей яркости граничили друг с другом, но не перекрывались. В отличие от изображений, приведенных на

рисунках выше, область лазерного инициирования находилась не в поле зрения ВА2, а левее. Сначала горение проходило через поле зрения ВА2, затем через поле зрения ВА1. Поскольку зоны наблюдения разные, время для каждого канала выбрано так, чтобы показать наиболее выразительные кадры, демонстрирующие изменения в структуре поверхности.

Предложенный двухканальный лазерный монитор позволяет изучать горение одновременно на двух участках образца, при этом увеличение каналов может различаться. При большом увеличении подробнее представлено появление и распространение жидкой фазы. Большое поле зрения дает информацию о характере распространения горения по образцу. В частности, жидкая фаза присутствует вблизи области зажигающего лазерного воздействия. Сравнение видеозаписей обоих каналов позволяет сделать вывод, что разлетающиеся продукты горения на рисунке 5.58, б представляют собой сферические капли, которые различимы на рисунке 5.58, а при большем увеличении. По мере распространения горения вдоль образца жидкая фаза за фронтом горения незначительная. В отличие от наноAl без добавок, и подобно горению смеси наноAl+АСД-6М+микроFe горение смеси наноAl+АСД-6М+наноFe визуально распространяется в виде полос. За темной полосой (в основном продукты железа) следует белая полоса (в основном продукты алюминия). Можно предположить, что по мере распространения волны горения сначала начинает окисляться нанопорошок железа, а затем нанопорошок алюминия.

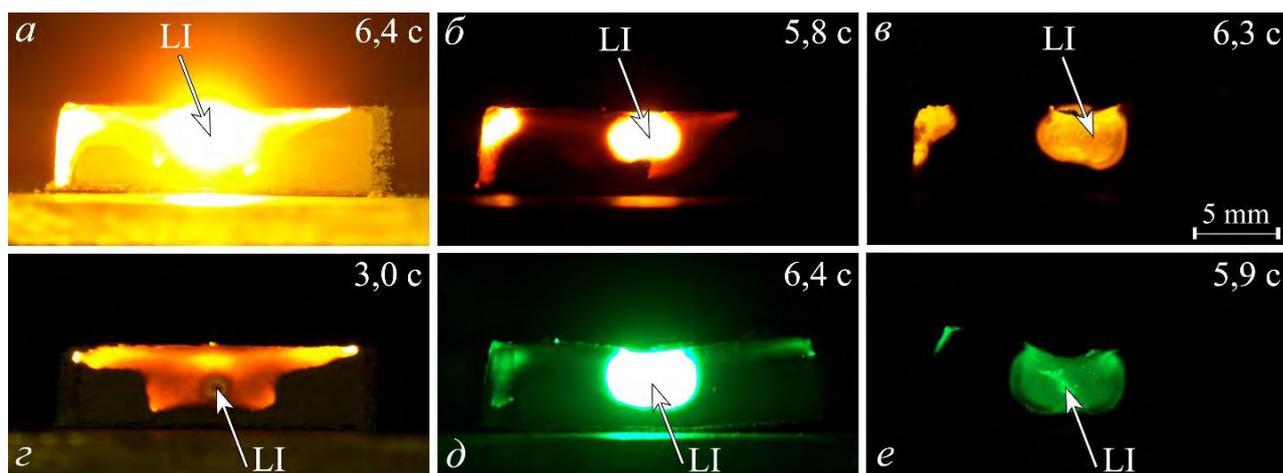
5.7. Системы визуализации горения энергетических материалов с применением лазерной подсветки

Скоростная визуализация – важный компонент большинства современных исследований горения, который может использоваться как основной метод исследования, так и в дополнение к другим методам визуализации. Наиболее простым и широко применяемым методом наблюдения горения энергетических материалов является пассивная скоростная видеорегистрация, типовая схема которой приведена на рисунке 4.1. В большинстве исследований, проводимых

нашим коллективом, пассивная видеорегистрация используется в дополнение к лазерному мониторингу. Пассивная фильтрация позволяет наблюдать за распространением светящегося слоя по поверхности образца. Визуализация изменений поверхности, экранированной ярким светящимся слоем, с использованием лазерного монитора, одновременно с наблюдением за распространением яркого светящегося слоя по поверхности предоставляет новые интересные данные о процессе горения нанопорошков металлов.

Пассивная видеорегистрация горения высокоэнергетических материалов ограничена большим диапазоном изменения температуры и яркости свечения. В частности, из-за значительного отличия яркости первой и второй волн горения нанопорошка алюминия невозможно выбрать фильтр, обеспечивающий наблюдение обеих волн. Одна из волн либо не видна, либо имеет высокую яркость, приводящую к засветке камеры. На рисунке 5.59 приведены кадры во время горения, полученные с различными светофильтрами. Применение фильтров с относительно высоким пропусканием (β , γ , δ) позволяет наблюдать за распространением первой волны и появлением второй волны горения, при этом вторая волна горения имеет высокую яркость, что не позволяет наблюдать ее детально. Установка светофильтров с малым пропусканием (ϵ , e), наоборот, дает возможность наблюдать распространение второй волны горения, при этом первая волна не видна. Применение узкополосных фильтров по информативности практически аналогично применению нейтральных.

Лазерная подсветка является активным методом визуализации, при котором объект освещается непрерывным или импульсным излучением. Узкополосное лазерное излучение практически без поглощения проходит через светящийся плазменный слой, покрывающий поверхность образца в области горения, отражается от поверхности и регистрируется видеокамерой. Для подавления широкополосной фоновой засветки используются светофильтры, которые устанавливаются перед объективом видеокамеры.



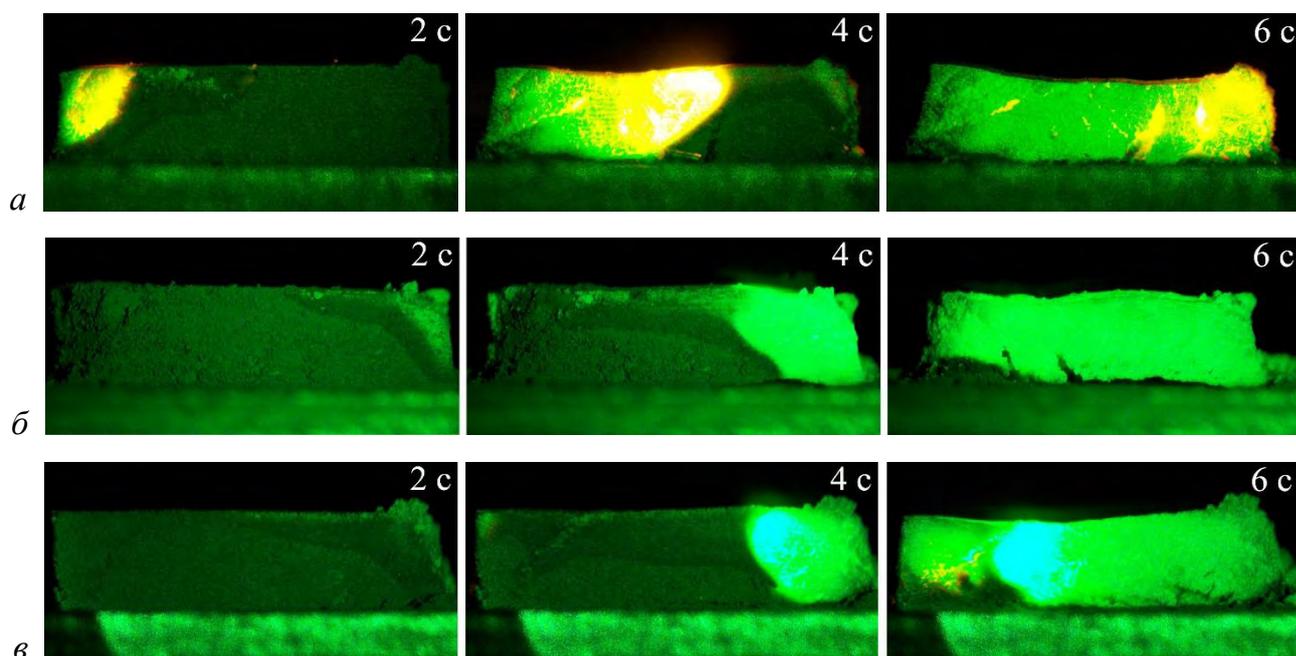
a – без фильтра; *б* – нейтральный светофильтр с пропусканием 2 %; *в* – нейтральный светофильтр с пропусканием 0,3 %; *г* – нейтральный светофильтр с пропусканием 15 %; *д* – полосовой фильтр 510 ± 5 нм с максимумом пропускания 80 %; *е* – полосовой фильтр 510 ± 5 нм с максимумом пропускания 0,7 %. LI – область лазерного воздействия

Рисунок 5.59 – Кадры во время горения шести различных образцов nanoAl , записанные скоростной камерой с различными фильтрами

С использованием схем, представленных на рисунке 4.9 проводилась визуализация горения нанопорошка алюминия и смесей на его основе с использованием лазерной подсветки. На рисунке 5.60 показаны кадры, полученные при использовании схем на рисунке 4.9 (камера Phantom Miro C110). Полученные изображения показывают, что применение лазерной подсветки и узкополосных интерференционных фильтров позволяет полностью подавить широкополосную засветку, создаваемую первой волной горения. В то же время засветка, создаваемая второй волной горения, частично остается. Особенно явно она присутствует на рисунке 5.60, *a*, *в*, когда мощность подсветки меньше (200 мВт) и экспозиция больше (500 мкс). В случае на рисунке 5.60, *б* мощность лазерной подсветки выше (380 мВт), а экспозиция меньше (250 мкс). Это позволило снизить влияние засветки, создаваемой горящим образцом. Тем не менее, в ходе второй волны горения, излучаемое поверхностью свечение приводит к нечеткости изображения.

Проведенное исследование показало, что относительно недорогой и компактный твердотельный лазер с длиной волны 532 нм может использоваться в качестве лазера подсветки для скоростной визуализации горения нанопорошков

металлов. При этом следует принимать во внимание необходимость снижения влияния лазерных спеклов. На рисунках 5.61, 5.62 показаны изображения поверхности наноAl и термитной смеси наноAl+Fe₂O₃, полученные с использованием относительно простой схемы на рисунке 4.6, в которой объект исследования освещался излучением DPSS-лазера LS-1-LN-532-200, рассеянным диффузором [287, 293]. Изображения записывались камерой Fastec HiSpec 1. При такой подсветке на поверхности присутствуют спеклы с высоким контрастом.



a – излучение твердотельного лазера 532 нм (рисунок 4.9, *a*); *б* – излучение CuBr-лазера 510,6 нм (рисунок 4.9, *б*); *в* – излучение CuBr-лазера 510,6 нм (рисунок 4.9, *в*)

Рисунок 5.60 – Кадры во время горения трех различных образцов наноAl, записанные скоростной камерой с лазерной подсветкой

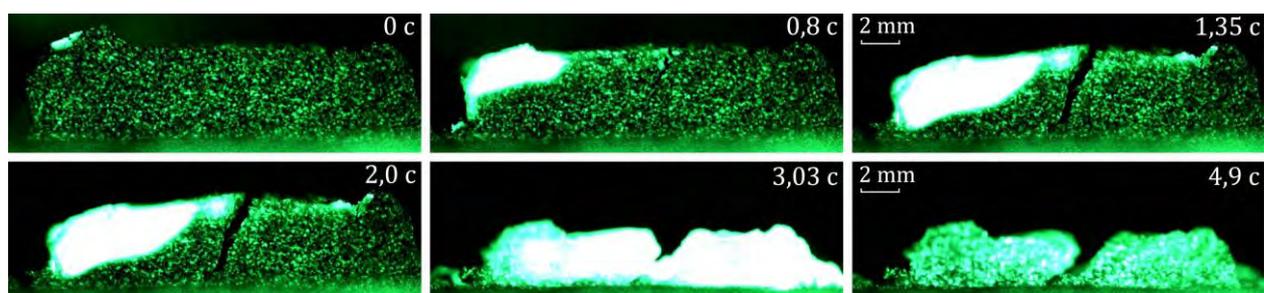


Рисунок 5.61 – Кадры во время горения образца наноAl, записанные скоростной камерой с лазерной подсветкой 532 нм в различные моменты времени

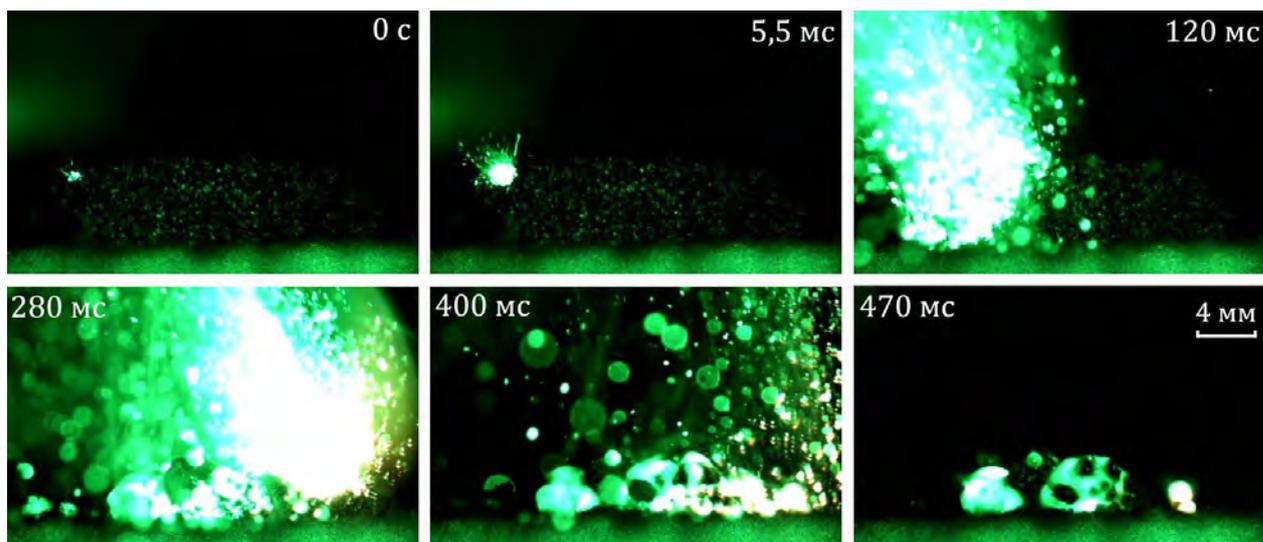


Рисунок – 5.62. Кадры во время горения образца смеси $\text{nanoAl} + \text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3$, записанные скоростной камерой с лазерной подсветкой 532 нм в различные моменты времени

Применение расширителя пучка в схеме с лазерной подсветкой (рисунок. 4.7) позволяет существенно снизить контраст спеклов. На рисунках 5.63, 5.64 показаны изображения поверхности nanoAl и смеси $\text{nanoAl} + \text{nanoFe}$, полученные с использованием схемы на рисунке 4.7, в которой объект исследования освещался излучением DPSS-лазера LS-1-LN-532-200 через расширитель пучка и диффузор [288]. Применялась камера Photron Fastcam SA1 (монохромная).

По результатам наблюдения можно сделать вывод, что метод визуализации с внешней лазерной подсветкой хорошо подходит для панорамного наблюдения процессов. Он позволяет оценить стадии и скорость процессов, охарактеризовать характер горения образца. Однако для полного подавления фоновой засветки необходимо увеличить мощность освещения и уменьшить пропускание фильтра. Лазерный монитор – это активная оптическая система, которая позволяет преодолеть ограничения лазерной подсветки. Это система, основанная на лазерной подсветке и активной узкополосной фильтрации, что позволяет полностью исключить влияние засветки в температурном диапазоне горения энергетических материалов и наблюдать поверхность независимо от яркости ее свечения. При этом, мощность подсветки лазерного монитора может быть уменьшена до десятков милливатт, что важно при исследовании легковоспламеняющихся веществ.

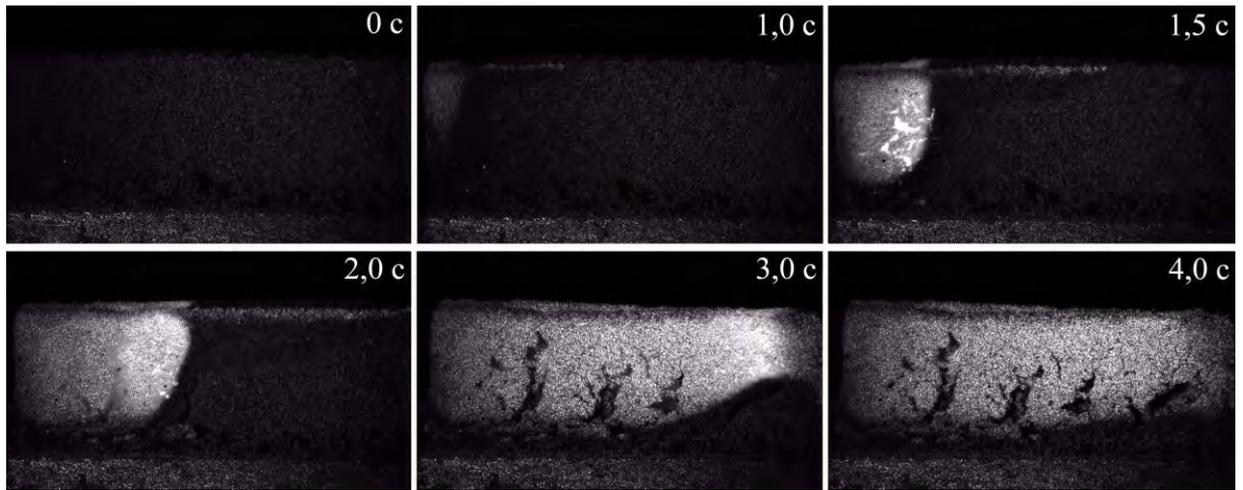


Рисунок 5.63 – Кадры во время горения образца смеси nanoAl записанные скоростной камерой с лазерной подсветкой 532 нм в различные моменты времени

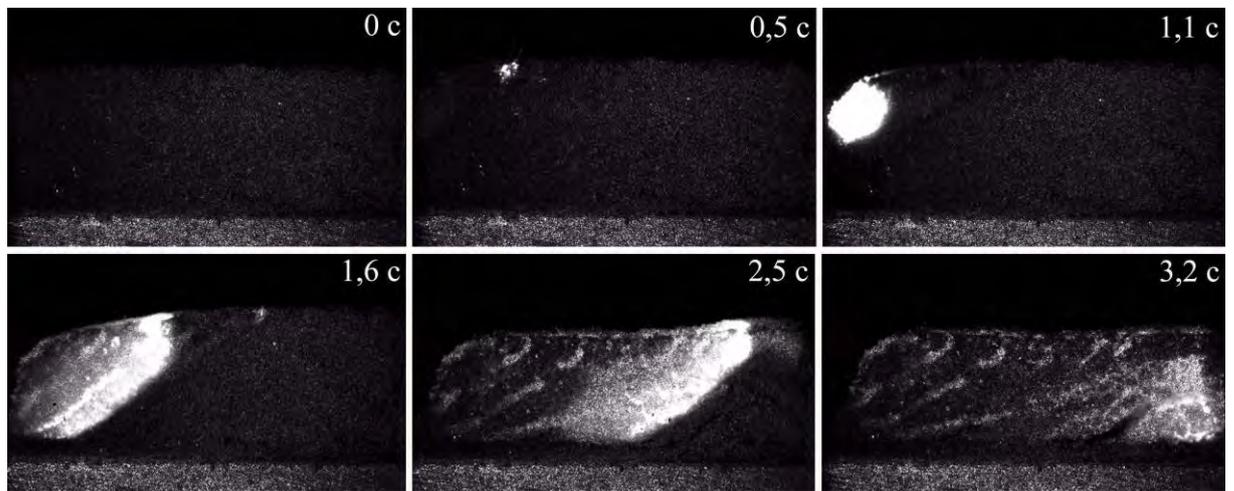
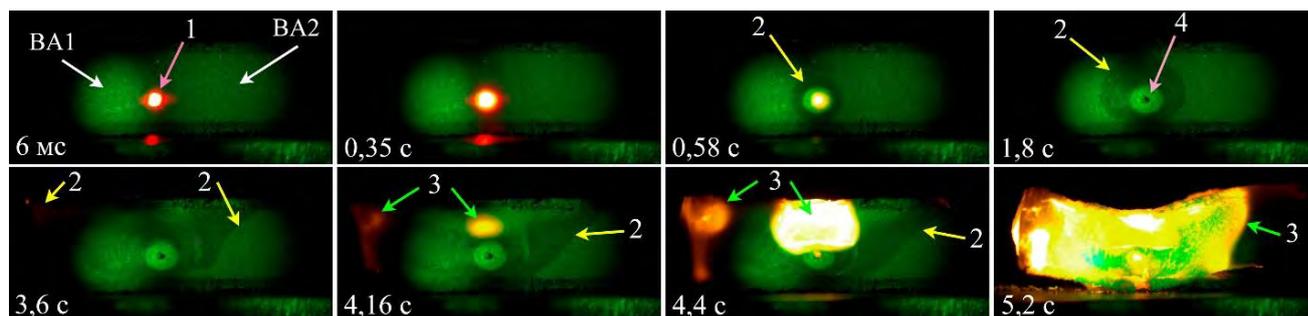


Рисунок 5.64 – Кадры во время горения образца смеси $\text{nanoAl}+\text{nanoFe}$, записанные скоростной камерой с лазерной подсветкой 532 нм в различные моменты времени

Изображения, полученные с использованием лазерного монитора, отличаются от обычных изображений, снятых с использованием стандартных фотографических приемов, в том числе с лазерной подсветкой. Это обусловлено тем, что лазерный монитор – это проекционная система, построенная на основе лазерного проекционного микроскопа. Поэтому она имеет еще одно преимущество визуализации, которое заключается в большом оптическом увеличении. Лазерный монитор может дать микроскопическое увеличение, которое проблематично получить с использованием макрообъективом в схеме с лазерной подсветкой или пассивной видеорегистрации.

При практическом использовании лазерного монитора имеет смысл одновременно наблюдать изображение поверхности образца с микроскопическим увеличением и общий вид процесса горения путем пассивной видеорегистрации или с применением лазерной подсветки. Согласно данным, представленным в разделе 5.1, энергия отраженного от поверхности излучения подсветки, создаваемого усилителем яркости, существенно превосходит интенсивность свечения горящего материала и может регистрироваться с применением второй скоростной или USB камеры. Применение узкополосного фильтра 510 ± 5 нм, дополнительно или вместо нейтрального фильтра (например, фильтра 20 перед камерой 18 на рисунке 4.26) дает возможность одновременной реализации лазерного мониторинга и лазерной подсветки в одном диагностическом комплексе. Такая возможность реализована нами при наблюдении термитных смесей в разделе 5.5.4 (рисунок 5.50) в моностатической дистанционной схеме лазерного монитора. Аналогичный подход может быть применен в двухканальном и бистатическом лазерных мониторах. В случае двухканального лазерного монитора, излучение усилителей яркости освещает объект наблюдения в двух областях, что обеспечивает сопутствующую лазерную подсветку большей части образца. На рисунке 5.65, 5.66 показаны результаты такой визуализации с использованием камеры Phantom Miro C110 с объективом Canon Macro Lens EF 180.

На рисунке 5.65 представлены кадры скоростной съемки горения nanAl с подсветкой усиленным спонтанным излучением усилителей яркости и установленным нейтральным светофильтром с пропусканием 0,5 %. Как следует из представленных данных, использование подсветки от усилителей яркости и нейтрального светофильтра позволяет частично подавить широкополосное собственное освещение и четко наблюдать распространение первой низкотемпературной волны горения, а также появление и движение фронта второй высокотемпературной волны горения. При этом свечение, сопровождающее вторую волну горения, намного ярче, чем для первой волны, и поверхность образца остается экранированной.

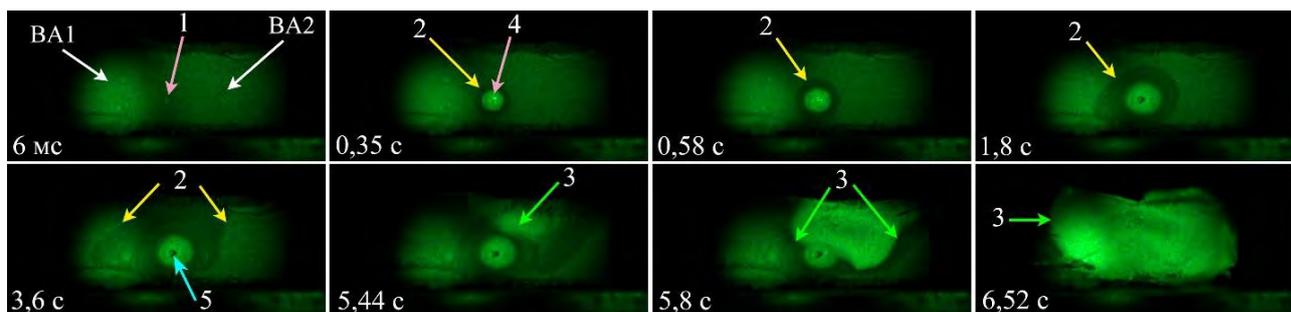


1 – точка лазерного иницирования; 2 – первая волна горения; 3 – вторая волна горения; 4 – продукты сгорания, образующиеся при лазерном взаимодействии; BA1, BA2 – области, освещаемые излучением усилителей яркости

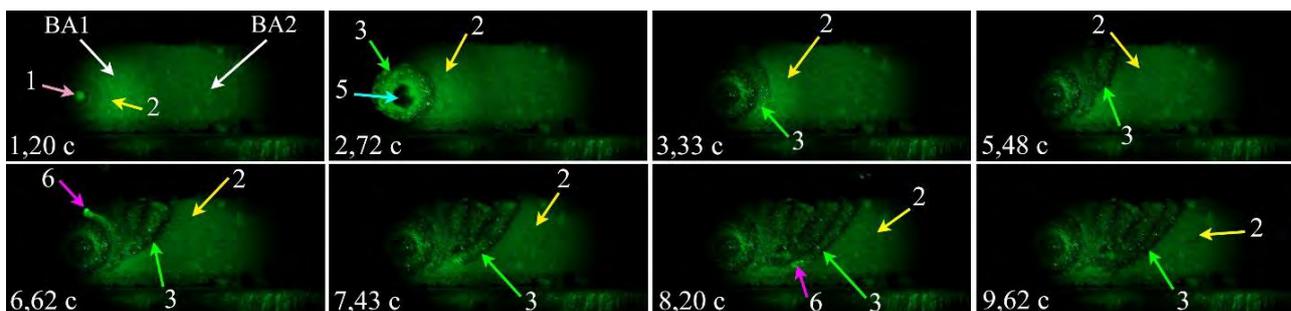
Рисунок 5.65 – Кадры горения nanoAl, полученные с лазерной подсветкой от усилителей яркости с установленным нейтральным светофильтром

На рисунке 5.66 представлены кадры скоростной визуализации горения nanoAl и смеси nanoAl+АСД-6М+микроFe, записанные с установленными нейтральным светофильтром с пропусканием 0,5 % и узкополосным фильтром 510 ± 5 нм с максимальным пропусканием 80 %. Это решение позволило полностью исключить широкополосную фоновую засветку и записывать изображения на длине волны генерации усилителей яркости. Кроме того, излучение иницирующего лазера также не видно, что позволяет наблюдать изменение поверхности образца и образование продуктов горения в момент лазерного воздействия.

В случае бистатического лазерного монитора, большая часть образца или образец полностью, могут быть подсвечены с применением расширителя пучка (ОЗ на рисунке 4.45). На рисунке 5.67 приведены кадры видеозаписи горения смеси nanoAl+nanoFe, зарегистрированные USB-камерой (LAPSUN USB-HDMI Microscopic Camera) с объективом Canon Macro Lens EF 180 mm. Таким образом, с применением независимой лазерной подсветки, возможно одновременное наблюдение поверхности образца путем пассивной регистрации отраженного от объекта наблюдения излучения лазера подсветки и путем лазерного мониторинга.



а



б

1 – точка лазерного иницирования; 2 – первая волна горения; 3 – вторая волна горения; 4 – продукты сгорания, образующиеся при лазерном взаимодействии; 5 – пустоты, образовавшиеся в области воздействия; 6 – разлетающиеся продукты; ВА1, ВА2 – области, освещаемые излучением усилителей яркости

Рисунок 5.66 – Кадры горения nanoAl (а) и $\text{nanoAl}+\text{ACD-6M}+\text{microFe}$ (б), полученные с лазерной подсветкой от усилителей яркости с установленными нейтральным и узкополосным светофильтрами

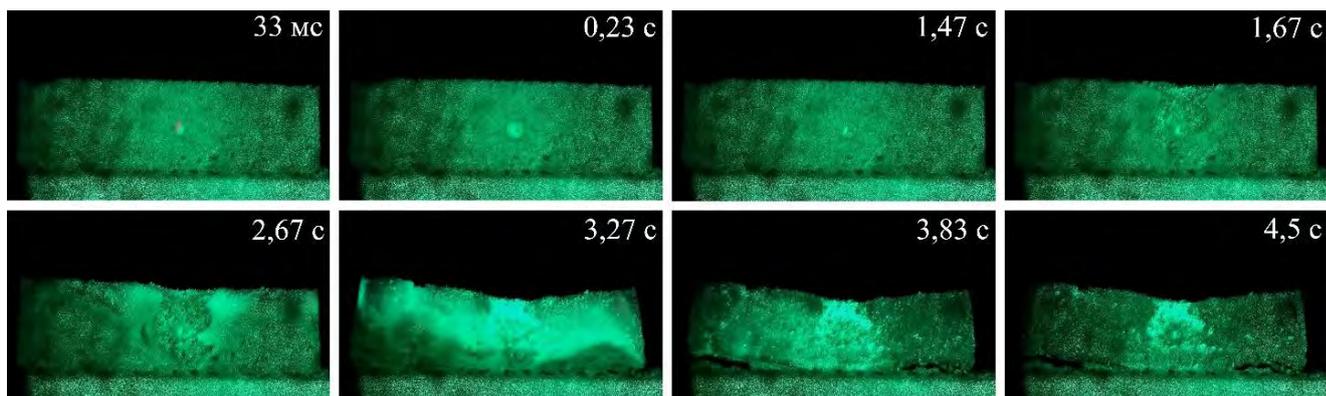


Рисунок 5.67 – Кадры горения смеси $\text{nanoAl}+\text{nanoFe}$, зарегистрированные USB-камерой в бистатическом лазерном мониторе с применением узкополосной фильтрации

5.8. Выводы по главе 5

1. Активные системы визуализации на основе лазерной подсветки и усиления яркости дают возможность регистрировать не испускаемое излучение горящего образца, а отраженное от поверхности зондирующее лазерное излучение. Такие системы рекомендуется использовать для исследования поверхности горения, экранированной интенсивным свечением. Показано, что при температуре 3000 К, которая может достигаться при горении нанопорошков металлов, энергия свечения образца в 10^4 – 10^5 раз меньше собственных шумов усилителя яркости и её влиянием на изображение лазерного монитора можно пренебречь.

2. Лазерный мониторинг и лазерная подсветка могут использоваться как отдельные методы исследования, и в составе одного лабораторного прибора. Лазерная подсветка с применением полосовых фильтров формирует изображение, подобное традиционному фотографическому. Светофильтры могут быть подобраны в зависимости от цели эксперимента для полного или частичного подавления широкополосного излучения. С использованием лазерной подсветки практически невозможно полностью подавить широкополосную засветку, в то же время такая визуализация удобна для панорамного обзора горящего образца с целью определения общих закономерностей горения.

3. Изображения лазерного монитора отличаются от изображений, зарегистрированных стандартными фотографическими методами, так как лазерный монитор является проекционной системой, построенной по принципу лазерного проекционного микроскопа. Она дает не только возможность полного подавления широкополосной засветки, но и обеспечивает оптическое увеличение заданной области наблюдения, в том числе перемещаемой. Методика визуализации с усилителем яркости позволяет получать новые данные о морфологических изменениях поверхности и распространении волн горения на поверхности ВЭМ.

4. Лазерный монитор позволяет исследовать изменение коэффициента отражения поверхности нанопорошка металла во время высокотемпературного горения. Усиление яркости активной среды на парах бромида меди обеспечивает

достаточное для визуального анализа качество изображений поверхности нанопорошка металла при коэффициенте отражения 0,084–0,33 %. Впервые идентифицированы стадии процесса горения и характерные изменения поверхности путем анализа поведения коэффициента отражения поверхности.

Показана возможность использования усредненной яркости пикселей и коэффициента корреляции изображений лазерного монитора для получения количественной информации о продолжительности стадий горения, количестве стадий, интервале между стадиями, динамике изменения поверхности. С применением быстродействующих фотодиодов интенсивность изображений лазерного монитора может отображаться и анализироваться в режиме реального времени без цифровой обработки. Полученные временные зависимости рекомендуется использовать на практике для упрощения анализа видеозаписей путем выявления изменений оптических свойств наблюдаемых объектов *in situ*. Исследование изменения коэффициента отражения в сочетании с видеозаписями эволюции поверхностей образцов во время горения нанопорошка помогут установить закономерности горения, что позволит разработать методы управления процессом горения и получения материалов с требуемыми свойствами.

5. Применение лазерного монитора позволило изучить стадийность процессов горения и установить закономерности изменения поверхности нанопорошка алюминия на различных стадиях горения. С использованием лазерного монитора подтверждено двухстадийное горение нанопорошка алюминия в воздухе. Визуализация горения смесей нано- и микропорошков металлов позволила определить стадии процесса горения по определенным признакам, в частности, по наличию индукционных периодов между стадиями, расширению продуктов сгорания и образованию пустот и трещин. Метод лазерного мониторинга выявил неравномерность процесса горения с образованием различных продуктов на определенных стадиях, тем самым подтвердив образование гетерогенных структур при многоступенчатом горении. При наблюдении термитной смеси $\text{Al-Fe}_2\text{O}_3$ показано, что использование лазерного монитора позволяет наблюдать не только за

распространением волны горения, но и за распространением волны нагрева. Распространение волны нагрева не удастся идентифицировать при прямой скоростной визуализации.

6. Лазерный монитор для визуализации горизонтальной поверхности тонких слоев нанопорошков металлов позволил наблюдать неоднородность распространения горения по поверхности образца, образование продуктов горения и участков с частичным прогоранием. Впервые использована совмещенная схема лазерного монитора, в которой луч иницирующего лазера фокусировался на объекте объективом, формирующим изображение лазерного монитора, что обеспечивало высокое пространственное разрешение системы визуализации. Такие устройства мы рекомендуем использовать для исследования поверхности горения тонких пленок нанопорошков металлов *in situ*, многослойных материалов, лазерной интеграции металлических нанопорошков в полимеры и в других приложениях.

7. Предложенная система визуализации на основе зеркальной оптики позволила увеличить расстояние наблюдения и осуществить визуализацию в режиме реального времени процессов высокотемпературного горения, сопровождающихся интенсивным свечением и разлетом продуктов. Использование двух схем лазерного монитора с коротким и длинным фокусным расстоянием рекомендуется использовать для наблюдения динамики процесса горения как с микрометровым, так и с субмиллиметровым пространственным разрешением.

В качестве перспективного усовершенствования дистанционного лазерного монитора мы предлагаем поворотную проекционную систему для визуализации перемещения фронта горения и изучения однородности и равномерности процесса. Предлагаемый подход позволяет контролировать изменение скорости и характера горения по всему образцу. Преимуществом разработанной проекционной системы является неподвижность объекта исследования и возможность наблюдения поверхности горящих материалов на значительном расстоянии от оптических элементов. Перспективным применением такой системы являются ВЭМ, горение которых характеризуется значительной неоднородностью.

8. На сегодня качество скоростной съемки ограничивается быстродействием применяемых скоростных видеокамер. В связи с этим, дальнейшее совершенствование систем визуализации поверхностей горения ВЭМ связано с повышением разрешения кадров скоростной видеозаписи за счет применения камер с более высоким быстродействием, которое обеспечит разрешение кадров не менее 1024×1024 пикселей на частоте работы усилителя яркости.

9. Предложено простое применение метода корреляции цифровых изображений для обработки изображений лазерного монитора для получения количественной информации об изменениях поверхности горящих нанопорошков. Коэффициент корреляции в дистанционной схеме, как и в короткофокусной (традиционной) схеме лазерного монитора, находятся в соответствии с временными параметрами стадий процесса горения. Метод корреляции изображений лазерного монитора может использоваться как в качестве самостоятельного инструмента для анализа изображений, так и в совокупности с анализом средней яркости изображений. Применение обоих способов обработки изображений позволяет более точно определять временные параметры процесса горения.

10. Показана возможность использования бистатического лазерного монитора для наблюдения поверхности нанопорошков металлов во время горения. Применение двухпроходowego излучения активной среды в качестве излучения подсветки позволяет существенно упростить оптическую схему бистатического лазерного монитора и снизить интенсивность подсветки. Подобно моностатическому лазерному монитору, бистатический лазерный монитор позволяет нам изучать динамику изменений поверхности нанопорошка металла, анализируя соответствующие кадры высокоскоростной видеозаписи. При использовании независимой лазерной подсветки достигнуто существенное увеличение контраста изображений, что важно при исследовании металлических нанопорошков. Бистатический лазерный монитор является перспективным инструментом для исследования металлических нанопорошков, которые поглощают практически весь падающий свет и легко воспламеняются.

11. Реализованный в работе двухканальный лазерный монитор позволил контролировать поверхность горящего нанопорошка одновременно на двух участках образца или на одном участке с разным увеличением. Взаимное влияние излучения усилителей яркости устраняется задержкой импульсов накачки на время, превышающее время жизни инверсии в активной среде. Такой лазерный монитор позволил визуализировать различное поведение горения в разных областях образца. Разработанная двухканальная лазерная система компактна по сравнению с известными лазерными системами на парах металлов с двумя активными элементами и построена на основе единого импульсного источника заряда накопительных конденсаторов. Синхронная работа усилителей яркости обеспечивается одним транзисторным генератором импульсов и линиями задержки на основе переменных индуктивностей (ферровариометров) с точностью синхронизации импульсов излучения ± 1 нс.

12. Для исследования горения нанопорошков металлов в работе также использовался метод лазерной подсветки, позволяющий осуществлять обзорное наблюдение за процессом горения, и позволяет частично преодолеть интенсивную фоновую засветку. При этом, лазерная подсветка может быть интегрирована в бистатический или двухканальный лазерный монитор. Предлагаемый подход сочетает в себе два метода исследования поверхности высокотемпературных объектов и позволяет визуализировать различное поведение горения в области лазерного зажигания и при распространении волны горения по образцу. Пространственное разрешение каждого канала системы возможно регулировать в соответствии с исследовательской задачей, изменяя параметры визуализирующей оптики. Перспективным применением такой системы является исследование неоднородности процесса горения нанопорошков металлов и энергетических материалов на их основе.

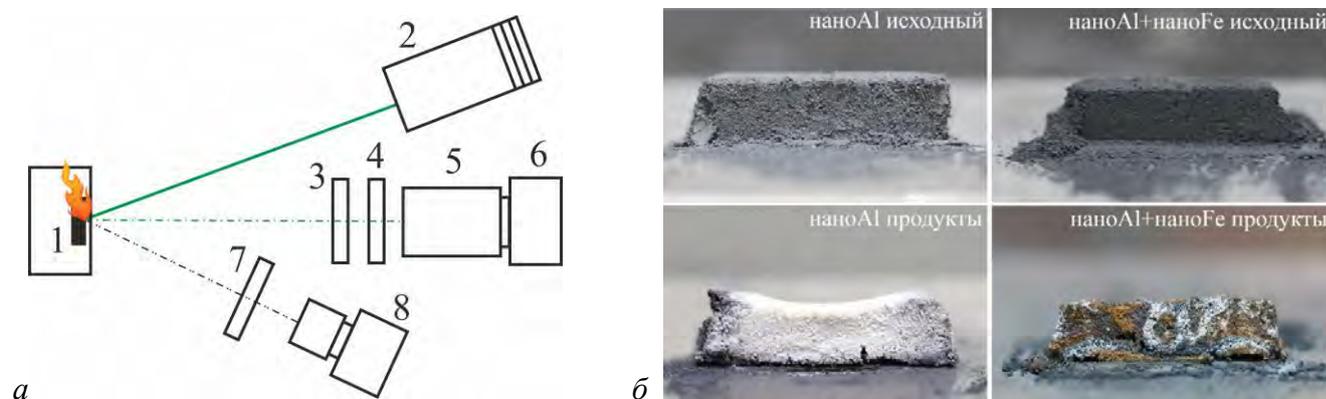
Глава 6. Лазерная спекл-диагностика поверхности горения нанопорошков металлов

6.1. Схема скоростной видеорегистрации лазерных спекл-изображений

Во время горения нанопорошков металлов поверхность претерпевает изменения, связанные с происходящими физико-химическими процессами. В пятой главе диссертации с помощью лазерного монитора показано, что во время горения изменяется как структура поверхности, так и коэффициент отражения, что имеет принципиальное значение при использовании оптических методов. Неровности на поверхности нанопорошка диффузно отражают освещающий свет от поверхности. При когерентном источнике света, отраженный свет формирует нерегулярное спекл-поле в пространстве, которое может быть записано с помощью цифровой камеры. На рисунке 6.1 представлена схема, которая применялась нами в первых экспериментах [368, 369], а также внешний вид образцов нанопорошков. Образцы формировались в виде параллелепипедов с размерами $20 \times 5 \times 3$ мм. Луч твердотельного лазера с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 50 мВт освещал центральную область объекта. Диаметр пятна лазерного излучения на объекте исследования составлял 0,7–0,9 мм. Интерференционный фильтр с полосой пропускания 532 ± 5 нм устанавливался для регистрации отраженных лазерных спеклов и фильтрации фонового излучения горящего образца. Для записи спекл-изображений использовалась скоростная монохромная камера Phantom Fastcam SA1 с объективом Canon Macro Lens EF 100 мм. Внешний вид горения в собственном свете регистрировался USB-камерой.

В ходе исследования процесса горения, было обращено внимание на изменение спекл-изображений при горении (рисунок 6.2). Изменение спекл-изображений, формируемых поверхностью в процессе горения, соответствует изменению структуры поверхности образца и коэффициента отражения. Это дало нам основание предположить, что сходство соседних лазерных спекл-изображений,

то есть их коэффициент корреляции, характеризует стадийность и скорость процесса горения.



1 – образец; 2 – лазер 532 нм; 3, 7 – нейтральные светофильтры;

4 – полосовой фильтр 532 ± 5 нм; 5 – объектив; 6 – скоростная камера; 8 – USB-камера

Рисунок 6.1 – Схема регистрации лазерных спекл-изображений (а) и образцы nanoAl и смеси nanoAl+nanoFe (б)

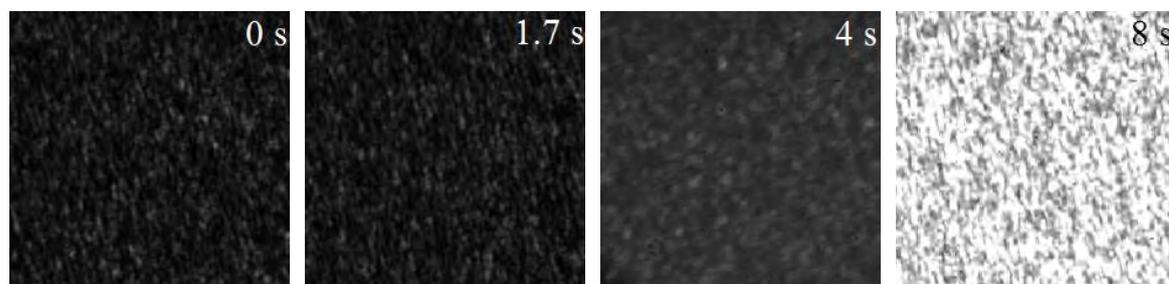


Рисунок 6.2 – Лазерные спекл-изображения при горении нанопорошка алюминия в различные моменты времени

6.2. Методика обработки спекл-изображений

Процедура обработки спекл-изображений с использованием корреляционной функции заключается в определении максимального значения коэффициента корреляции соседних спекл-изображений. На рисунке 6.3 представлена иллюстрация изменения цифровых спекл-изображений при микроперемещении. Пусть в ходе протекания процесса спекл-изображение переместилось из позиции 1

в позицию 2. Выбирается область спекл-изображения для анализа и представляется в виде двумерного массива пикселей с текущими координатами:

- позиция 1: $I_s = f(x, y)$ ($x = 1, 2, \dots, N; y = 1, 2, \dots, M$),
- позиция 2: $I_t = g(x, y)$ ($x = 1, 2, \dots, N; y = 1, 2, \dots, M$).

После движения точка с координатами (x_1, y_1) перемещается в положение с координатами (x_2, y_2) . Если последующее изображение содержит элементарную площадку g , коррелирующую с исходной элементарной площадкой f , тогда можно утверждать, что спеклы переместились из позиции f в позицию g . Пусть значение уровней серости в элементарной площадке перед движением равно $f(x, y)$, после движения значение уровней серости равно $g(x, y)$.

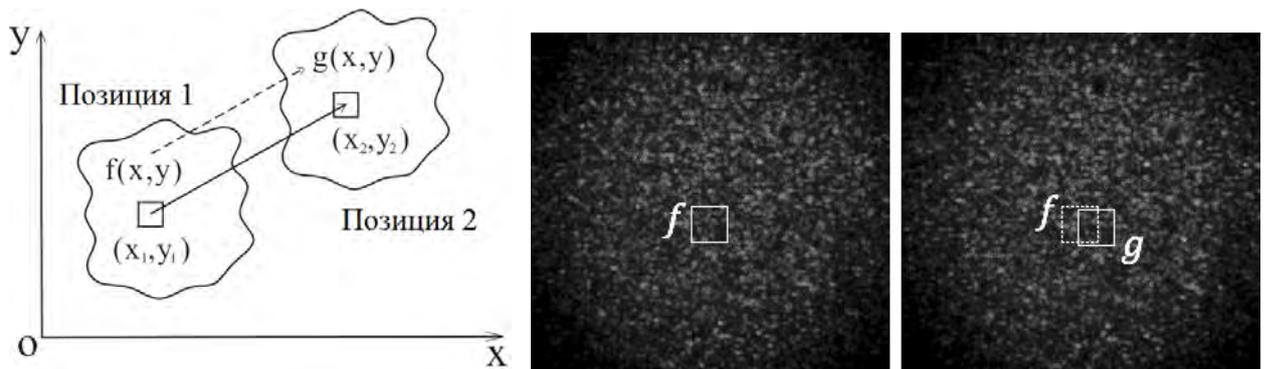


Рисунок 6.3 – Изменение цифровых спеклов при микроперемещении

Для определения положения площадки g реализован алгоритм в среде программирования MatLab, который состоит из трех основных этапов.

1. Выбирается некоторое окно на предшествующем спекл-изображении, которое сканируется на следующем. Если выбранное окно слишком малое по количеству пикселей, в нем будет недостаточно информации для корректного расчета. Если выбранное окно содержит слишком много пикселей, затраты ресурсов на его обработку будут необоснованными. В работе [370] оптимальный размер окна варьируется от 31×31 до 61×61 точек, однако критерии, по которым авторы проводили эти оценки, не приводятся.

Нами проведена оптимизация размера окна, исходя из минимума погрешности определения перемещения [170].

2. Рассчитывается коэффициент корреляции спекл-изображений и находится позиция максимального значения.

В литературе известен ряд формул для расчета коэффициента корреляции [371–377], наиболее распространенные из них следующие:

$$C_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) \cdot g(x_i', y_j')] }{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f^2(x_i, y_j) \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g^2(x_i', y_j')}} , \quad (6.1)$$

$$C_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \cdot [g(x_i', y_j') - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [g(x_i', y_j') - \bar{g}]^2}} , \quad (6.2)$$

$$C_3 = (C_2)^2 = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \cdot [g(x_i', y_j') - \bar{g}] \right\}^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [g(x_i', y_j') - \bar{g}]^2} , \quad (6.3)$$

где $f(x_i, y_j)$ – значение уровня серости площадки (x_i, y_j) в позиции 1 (рисунок 6.3); \bar{f} – среднее значение уровня серости всего изображения в позиции 1; $g(x_i', y_j')$ – значение уровня серости в позиции 2; \bar{g} – среднее значение уровня серости всего изображения в позиции 2.

3. Выбирается значение коэффициента корреляции в окрестности максимума, соответствующее смещению на один пиксель, и делается интерполяция с шагом 0,01 пикселя или меньше для определения более точного положения максимума. Значение коэффициента корреляции в положении максимума является коэффициентом корреляции двух спекл-изображений.

В настоящей работе тестирование описанного алгоритма проводится с использованием тестовых спекл-структур с известным смещением. В работе [377] синтезирован набор спеклов, сдвинутых в горизонтальном и в вертикальном направлении с шагом 0,1 пикселя. На электронном ресурсе [378] доступны наборы спекл-изображений с известным смещением, которые использовались нами для

исследования алгоритма обработки и корреляционных формул (6.1)–(6.3). На рисунке 6.4 представлена траектория смещения спекл-структуры [378] и смещение, определенное с применением тестируемого алгоритма. Представленные данные показывают субпиксельную точность определения перемещений, что является достаточным для дальнейшего использования метода в ходе данной диссертационной работы.

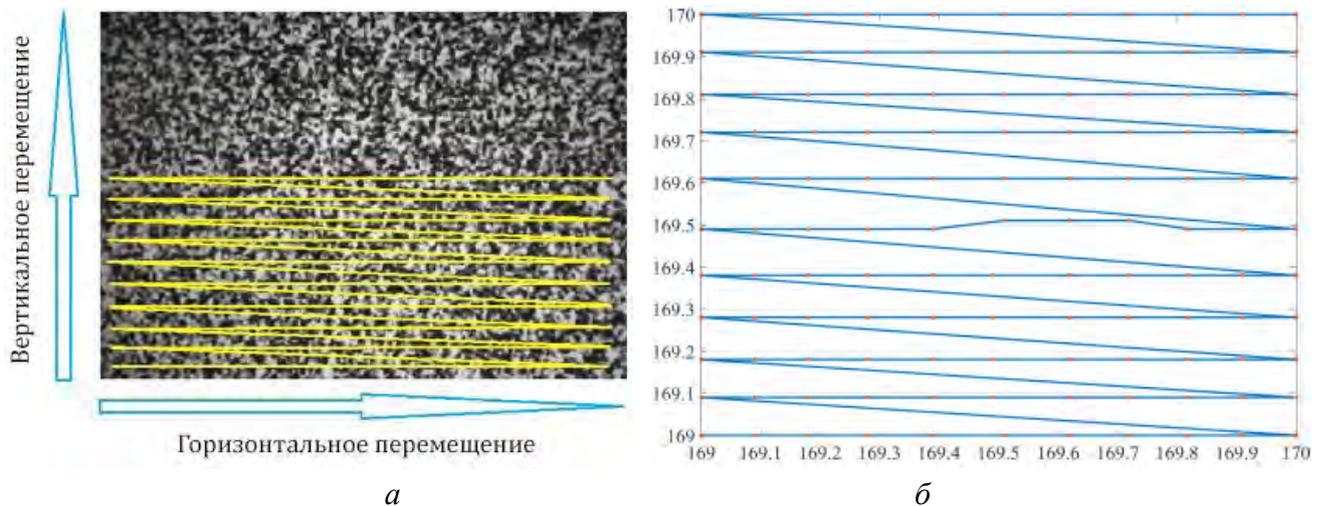
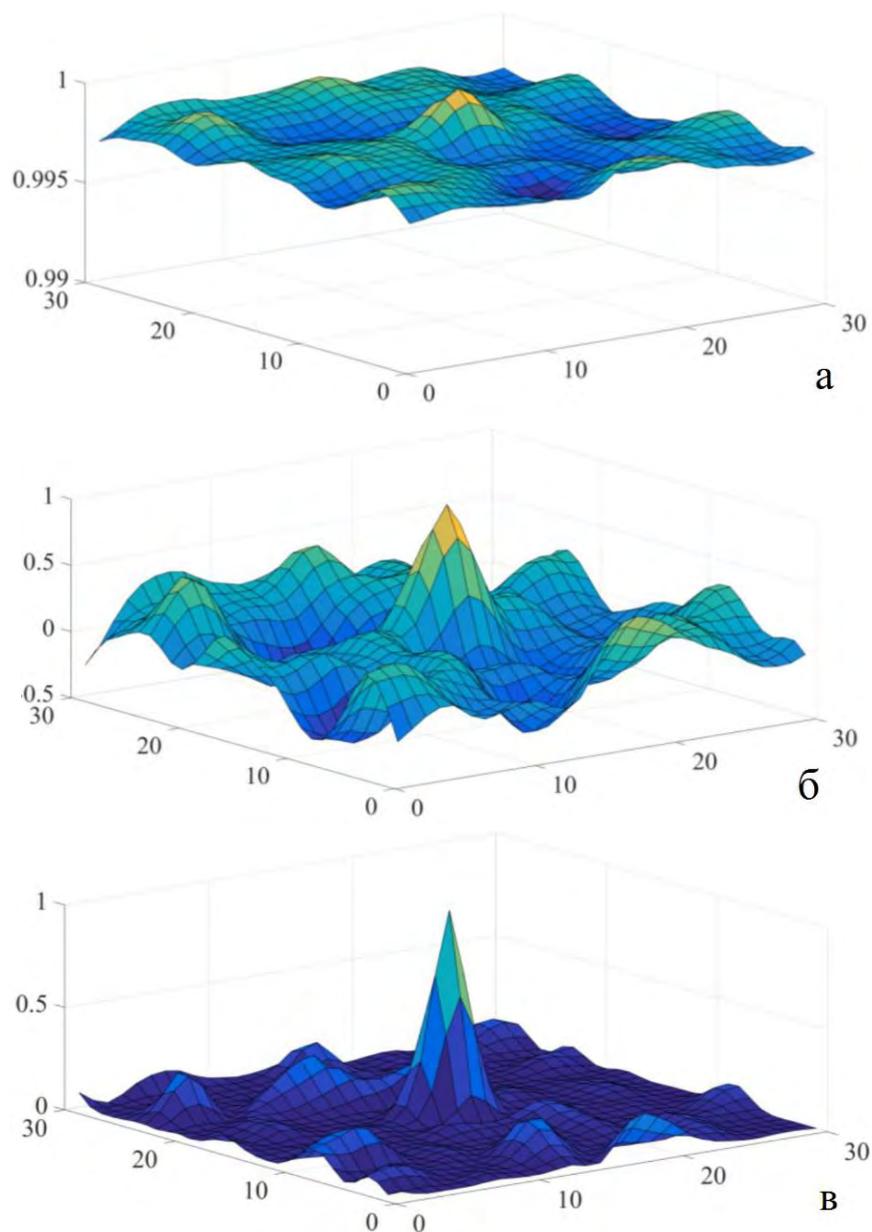


Рисунок 6.4 – Спекл-изображение и реальная траектория его перемещения [378] (а) и траектория смещение изображения, определенная с использованием тестируемого алгоритма (б)

На рисунке 6.5 представлены распределения коэффициента корреляции, рассчитанные по формулам (6.1)–(6.3) для высококонтрастного спекл-изображения, заимствованного из [378]. Расчеты показали, что распределение коэффициента корреляции, рассчитанного по формуле (6.1), не содержит четко выраженного максимума. Расчет по формуле (6.2) дает множество пиков, на фоне которых отчетливо выделяется основной пик. Расчет по формуле (6.3) дает наилучшую унимодальность. Разница между основным пиком и остальными значительная. Однако вывод, какая из формул обеспечивает наименьшую погрешность определения перемещения, не очевиден.

На рисунке 6.6 показаны зависимости абсолютной погрешности определения смещения от размера окна спекл-изображения при расчете коэффициента корреляции с использованием различных формул. Расчет по формулам (6.1) и (6.2)

дал практически одинаковый результат: абсолютная погрешность смещения составила 0,022 пикселя для высококонтрастного спекл-изображения и 0,044 пикселя для низкоконтрастного спекл-изображения. Расчет по формуле (6.3) дал почти двукратное увеличение погрешности определения смещения независимо от наличия четкого основного пика на распределении коэффициента корреляции (рисунок 6.5, в). Предположительно, это связано с увеличением ошибки интерполяции из-за значительной разницы в значениях коэффициента корреляции в области основного пика.



а – расчет по формуле (6.1); б – расчет по формуле (6.2); в – расчет по формуле (6.3)

Рисунок 6.5 – Распределение коэффициента корреляции

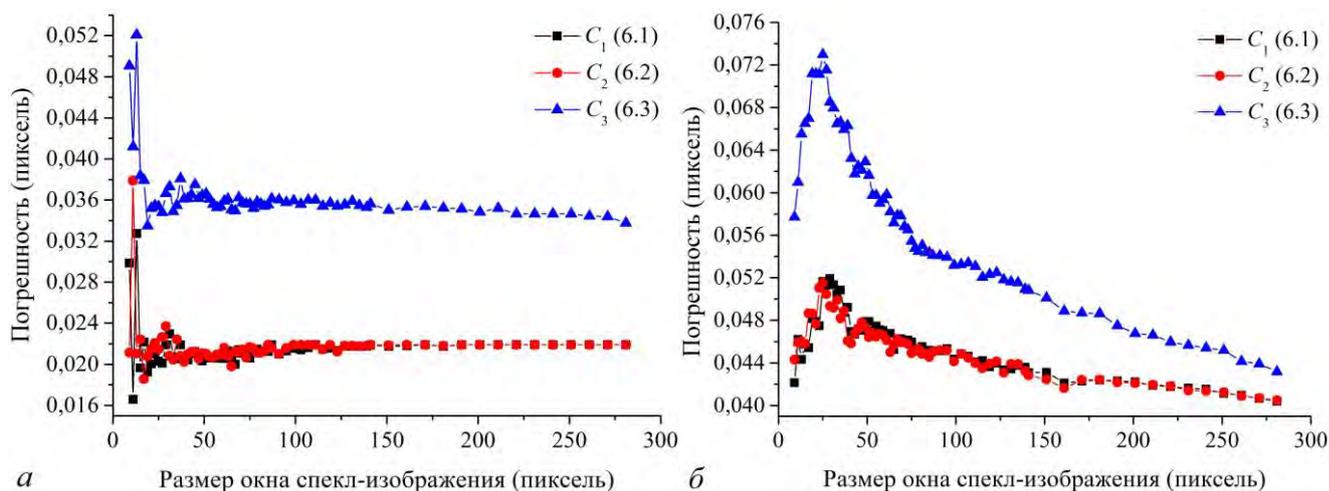


Рисунок 6.6 – Абсолютная погрешности смещения от размера окна спекл-изображения с высоким (а) и низким (б) контрастом при расчете по формулам (6.1)–(6.3)

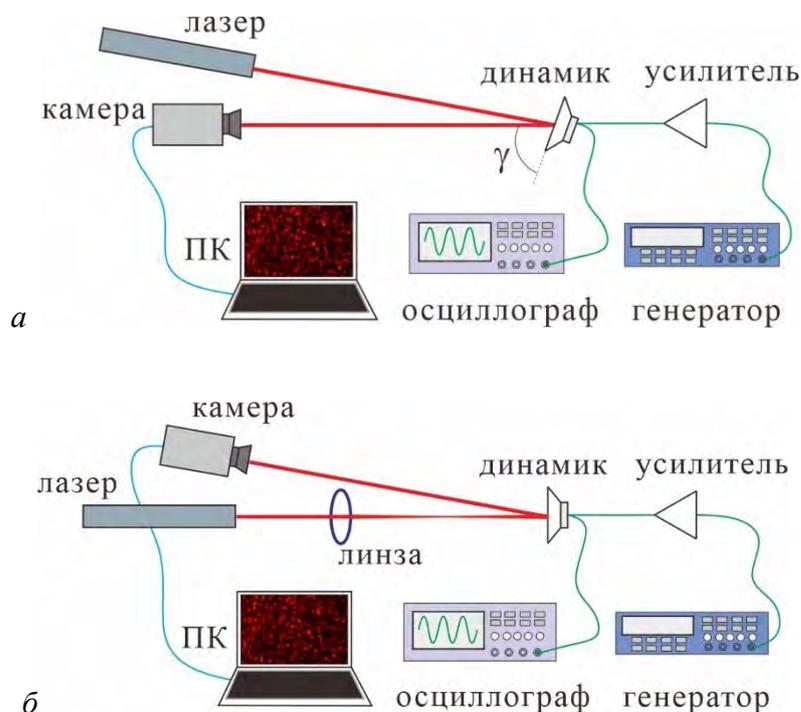
При размере окна спекл-изображения менее 30×30 пикселей точность определения смещения значительно меняется. Таким образом, для получения достоверных результатов, размер окна следует задавать не менее 30×30 пикселей. В случае низкоконтрастных спекл-изображений окно большего размера дает более высокую точность (рисунок 6.6, б).

Проведенное исследование погрешности определения смещения спекл-изображений с использованием различных формул и спекл-изображений с известным смещением, показало, что формулы (6.1) и (6.2) дают наилучшую точность определения смещения спекл-структуры. Однако формула (6.1) дает распределение коэффициента корреляции со слабо выраженным максимумом, что при работе с зашумленными спекл-изображениями может дать ненадежные результаты. В связи с этим, в дальнейшей работе нами использовалась формула (6.2). Исследование оптимального размера спекл-изображения, необходимого для определения коэффициента корреляции показало, что размер должен превышать 30×30 пикселей для высококонтрастных спекл-изображений. Для низкоконтрастных спекл-изображений рекомендуемый размер составляет более 150×150 пикселей. Так как при исследовании поверхности нанопорошка спекл-изображения имеют низкий контраст (рисунок 6.2), поэтому размер окна для расчета коэффициента корреляции принимался больше 300×300 пикселей.

Спекл-изображения существенно зависят от характеристик излучения, освещающего объект исследования. Спекл-изображения с низким контрастом и мелкой зернистостью вносят трудность и неопределенность для анализа и обработки. В работе [171] нами исследовалось влияние расходимости лазерного излучения и длины волны излучения на величину искажений гармонического сигнала, а также влияние расстояния между элементами оптической схемы на искажения гармонического сигнала и чувствительность. Исследования проводились путем записи лазерных спекл-изображений с вибрирующей поверхности с последующей цифровой обработкой. Исследование влияния условий освещения на лазерные спекл-изображения проводилось с использованием схем на рисунке 6.7. Тестовым объектом служил конусный динамик компьютерной колонки, сигнал на который подавался с цифрового генератора гармонических сигналов. Диаметр диффузора динамика составлял 7 см. Амплитуда напряжения динамика измерялась цифровым осциллографом Rigol DS1052E. К сожалению, нам неизвестны характеристики данной акустической системы (частотная характеристика, фазовая характеристика) и качество преобразования частоты электрического сигнала в механические колебания. Поскольку к динамику прикладывается одночастотное гармоническое напряжение, можно полагать, что колебания конуса динамика являются гармоническими.

Освещение объекта осуществлялось He-Ne-лазером (632 нм) мощностью 5 мВт или полупроводниковым лазером мощностью 5 мВт (532 нм). Диаметр луча и расходимость гелий-неонового лазера и полупроводникового лазера составляли 0,8 мм, 1,2 мм и 3 мрад, 2 мрад, соответственно. Луч лазера направлялся на диффузор. Спекл-изображения записывались с помощью камеры Fastec CMOS HiSpec 1 с объективом Navitar DO-5095. Цифровая камера размещалась на расстоянии 50 см от динамика. Анализировались амплитуда декодированного сигнала и искажения при считывании информации с колеблющегося диффузора громкоговорителя от угла наблюдения (рисунок 6.7, а) и расходимости лазерного излучения (рисунок 6.7, б). Исследования проводились в различных условиях:

диаметр пятна на поверхности объекта варьировался путем изменения расстояния между диффузором и линзой; использовались два разных источника излучения; использовались линзы с разным фокусным расстоянием, которые обеспечивали освещение объекта светом с разной расходимостью.



a – изменение угла наблюдения γ ; *б* – изменение диаметра пятна на поверхности динамика

Рисунок 6.7 – Схемы исследования лазерных спекл-изображений

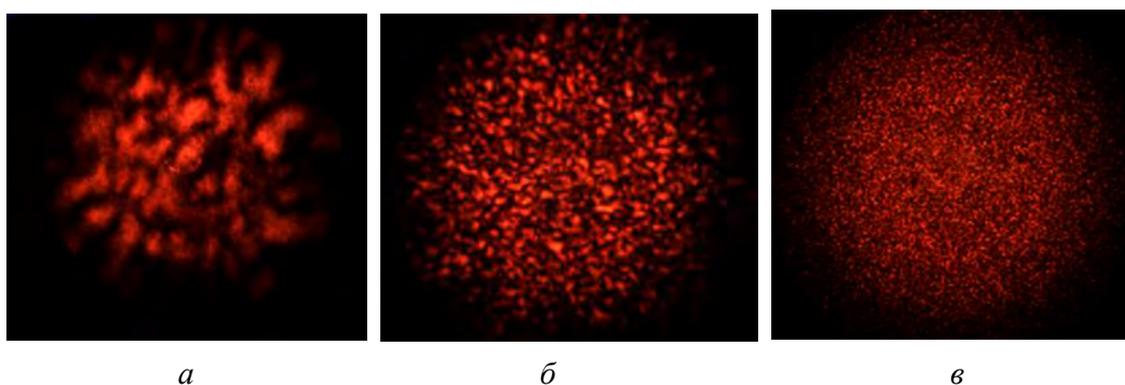
Поскольку спекл-изображения записываются цифровой камерой, значительная ошибка может быть вызвана соотношением размера спекла и размера пикселя камеры. В случае, когда размер спеклов сравним с размером пикселя сенсора камеры или меньше, записанный рисунок спеклов будет иметь низкое разрешение, что приведет к ухудшению точности декодирования изменения поверхности. В том случае, когда размер спекла на несколько порядков больше размера пикселя, разрешение записанного спекл-рисунка, конечно, будет высоким, однако при тех же размерах спекл-изображения, количество информации, содержащейся в нем, будет намного меньше. Следовательно, в последнем случае потребуется увеличение размера спекл-изображения, что приведет к увеличению времени обработки.

Известно, что размер спеклов прямо пропорционален расстоянию между объектом и камерой и обратно пропорционален диаметру лазерного луча [379]. Средний размер спекла определяется формулой:

$$\sigma = \frac{1,2 \cdot \lambda \cdot L}{D}, \quad (6.4)$$

где λ – длина волны лазерного излучения, L – расстояние между отражающей поверхностью и регистратором, D – диаметр пучка на отражающей поверхности. Следовательно, при постоянной длине волны и постоянном расстоянии между камерой и отражающей поверхностью средний размер спекла увеличивается с уменьшением диаметра пучка.

В схеме на рисунке 6.7, b диаметр пучка изменялся путем перемещения линзы. При $F=11$ см лазерный луч проходил через линзу, фокусировался на расстоянии 11 см и затем расширялся. На рисунке 6.8 представлены спекл-изображения, регистрируемые при расстоянии между динамиком и линзой 11, 17 и 47 см. Как и ожидалось, с увеличением расстояния между динамиком и линзой от 11 до 47 см диаметр пучка излучения увеличивался при уменьшении размера спеклов.

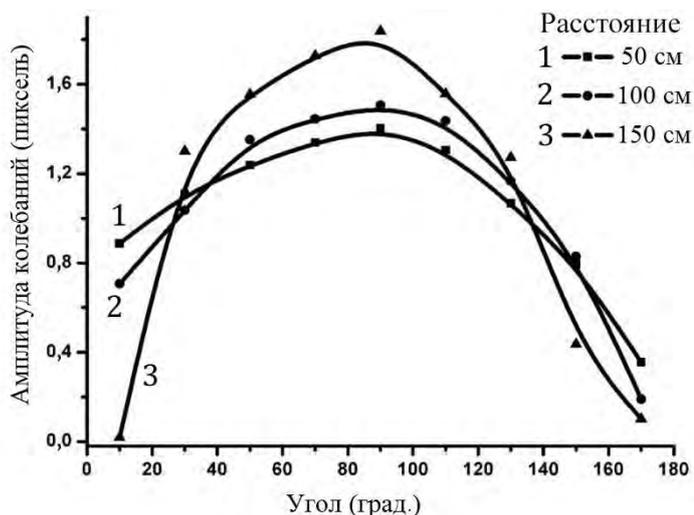


a – 11 см; b – 17 см, v – 47 см; расстояние между лазером и диффузором 50 см

Рисунок 6.8 – Спекл-изображения поверхности диффузора громкоговорителя на разных расстояниях до фокусирующей линзы (рисунок 6.7, b)

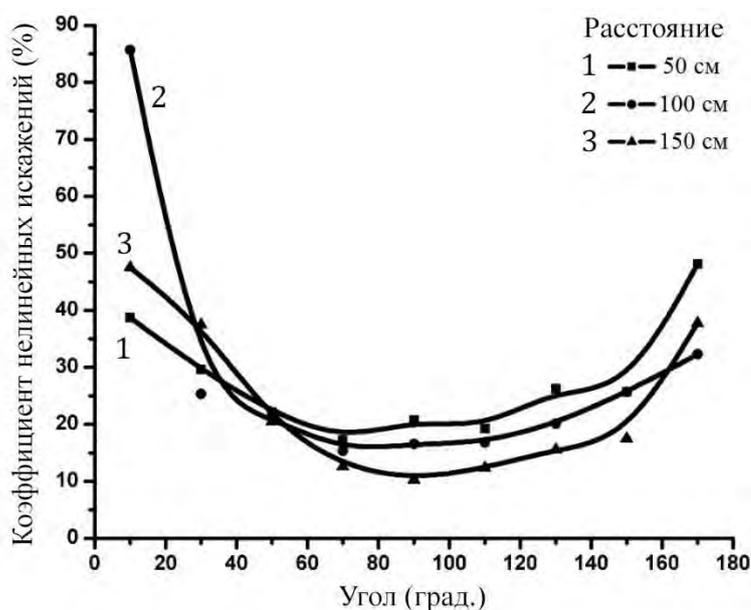
При использовании метода лазерных спеклов на практике, необходимым параметром является угол наблюдения. На рисунке 6.9 приведена зависимость амплитуды колебаний спекл-изображений, рассчитанных на основе

последовательности кадров видеозаписи, от угла наблюдения (γ на рисунке 6.7, а) при различных расстояниях от поверхности динамика до цифровой камеры. На рисунке 6.10 представлены значения коэффициента нелинейных искажений (K_n) для этих же случаев.



Амплитуда напряжения на динамике – 3 В, частота – 50 Гц, скорость съемки – 500 кадров/с,
размер спекл-изображений – 40×40 пикселей

Рисунок 6.9 – Зависимость амплитуды декодированного сигнала от угла наблюдения



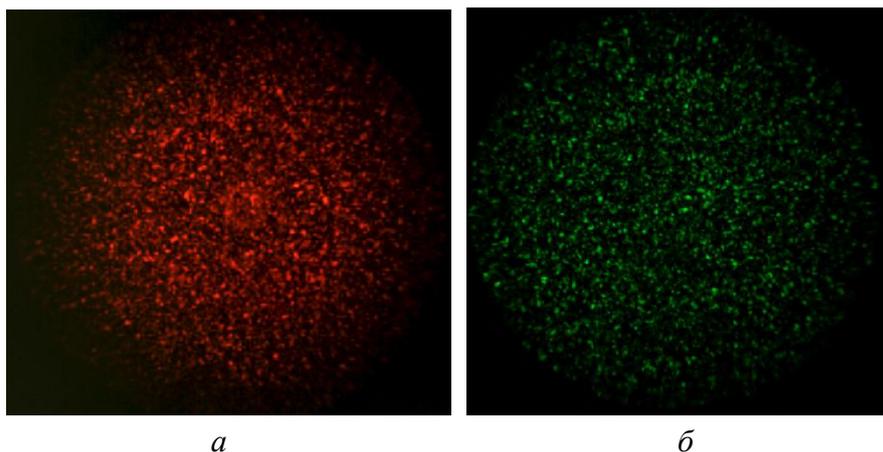
Амплитуда напряжения на динамике – 3 В, частота – 50 Гц, скорость съемки – 500 кадров/с,
размер спекл-изображений – 40×40 пикселей

Рисунок 6.10 – Зависимость коэффициента нелинейных искажений декодированного сигнала от угла наблюдения

Из представленных данных следует, что чем ближе угол к нормали, тем больше амплитуда колебаний. Для разного расстояния амплитуда также различная. Чем больше отклонение угла от нормали, тем быстрее спадает амплитуда колебаний спекл-изображений. Зависимость K_n от угла наблюдения также показывает, что чем ближе угол падения лазерного луча к 90° , тем меньше K_n . Тем не менее, искажения возрастают незначительно (в пределах 5%) при отклонении от нормали $\pm 20^\circ$. Это значение принималось во внимание в нашей дальнейшей работе по применению метода корреляции цифровых спекл-изображений для контроля поверхности образца нанопорошка металла во время горения.

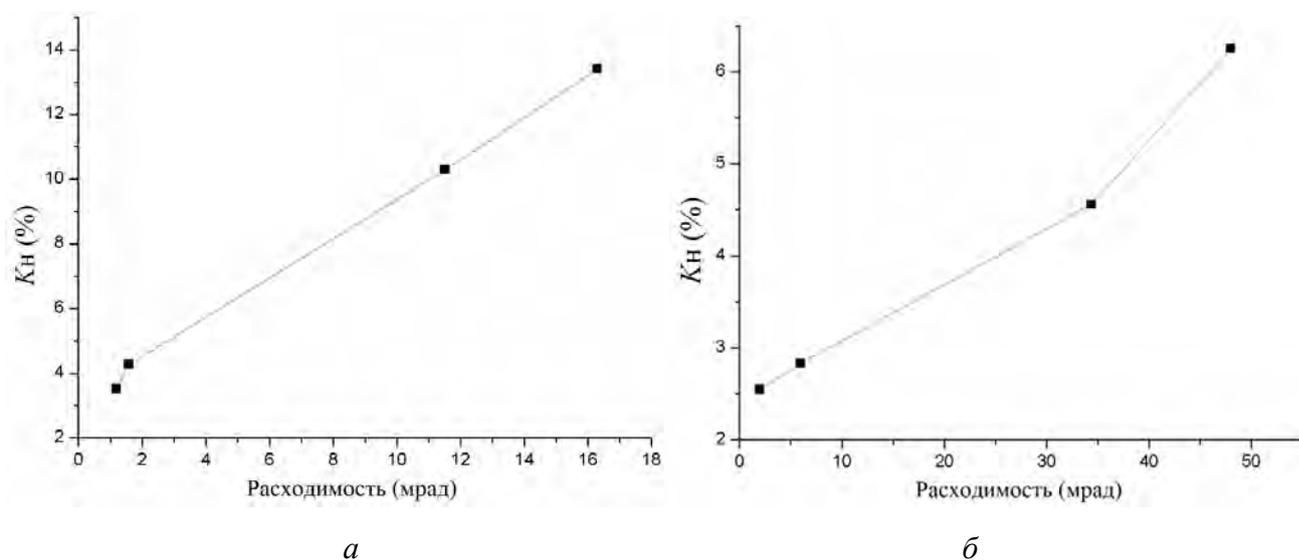
Влияние расходимости пучка на качество обработки спекл-изображений исследовалось в схеме на рисунке 6.7, б с использованием линз с различным фокусным расстоянием и двух источников излучения: He-Ne лазера (632 нм) и зеленого полупроводникового лазера (532 нм). На рисунке 6.11 представлены спекл-изображения при использовании различных лазеров. Так как измерения проводились на одинаковом расстоянии, то размеры спеклов, в среднем, одного порядка величины, отличия обусловлены различными параметрами пучка.

На рисунке 6.12 приведена зависимость K_n декодированного сигнала от значения расходимости пучка при использовании He-Ne лазера и зеленого полупроводникового лазера. Угол расходимости изменялся путем установки линз с различным фокусным расстоянием: 8 см, 11 см и 50 см. Из представленных на рисунке 6.12 данных следует, что расходимость пучка лазера подсветки влияет на качество получения информации в результате обработки спекл-изображений. С увеличением расходимости лазерного пучка, освещающего объект исследования, значение коэффициента нелинейных искажений K_n увеличивается с использованием как He-Ne-лазера, так и полупроводникового лазера. В то же время при использовании зеленого полупроводникового лазера, значение K_n значительно меньше, чем при использовании He-Ne-лазера. В целом, чем меньше угол расходимости лазерного пучка, тем меньше значение K_n , т.е. обеспечивается меньшая ошибка извлечения информации при обработке спекл-изображений.



Расстояние между поверхностью диффузора и камерой 50 см; частота регистрации 500 Гц

Рисунок 6.11 – Спекл-изображения, полученные с использованием He-Ne лазера (*a*) и зеленого полупроводникового лазера (*б*)



Амплитуда напряжения – 2 В; частота сигнала – 50 Гц; частота регистрации – 500 Гц

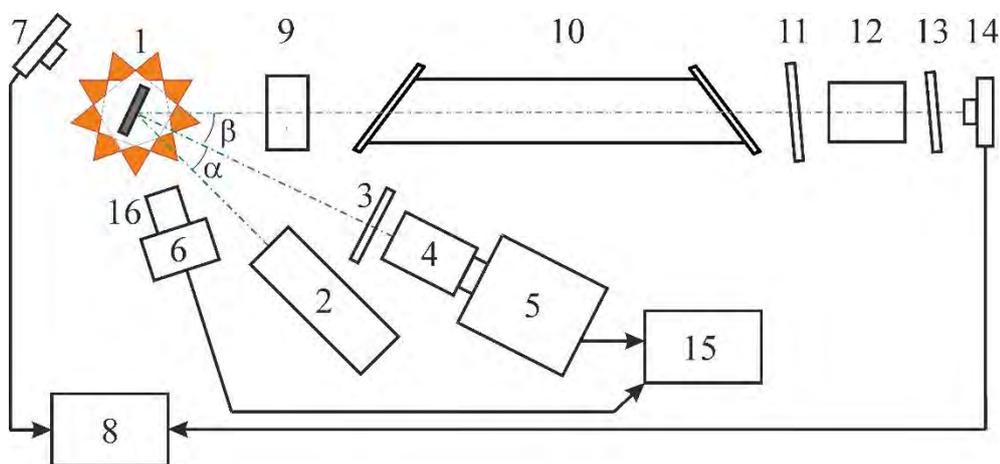
Рисунок 6.12 – Зависимость коэффициента нелинейных искажений декодированного сигнала от расходимости пучка при использовании He-Ne-лазера (*a*) и полупроводникового лазера (*б*)

6.3. Динамика лазерных спеклов при горении нанопорошков металлов

Определение микроперемещений при исследовании процесса горения имеет ограниченное использование, так как в процессе горения поверхность изменяется главным образом за счет морфологических изменений. Поэтому в данной работе основным информативным параметром метода цифровой корреляции изображений

является значение коэффициента корреляции, а не величина перемещения изображений, соответствующая максимальному коэффициенту корреляции. Поэтому используемый метод мы называем методом лазерной спекл-корреляции.

Экспериментальная установка на рисунке 6.13 была предложена для исследования временных параметров процесса горения нанопорошков с использованием метода лазерной спекл-изображений и валидации данного метода контроля процесса горения [380]. Установка сочетает в себе четыре метода контроля для одновременного исследования горения: скоростную регистрацию спекл-изображений, метод прямого наблюдения с использованием цифровой камеры, анализ средней яркости изображений лазерного монитора, регистрацию яркости свечения образца фотодиодом. Лазерные спеклы формировались излучением твердотельного лазера с диодной накачкой (DPSS) с длиной волны 532 нм. Усилитель яркости освещал поверхность образца через линзу с фокусным расстоянием 100 мм и усиливал отраженный свет на длинах волн 510,6 и 578,2 нм, обеспечивая область наблюдения диаметром $\sim 0,9$ мм.



1 – образец нанопорошка; 2 – лазер подсветки 532 нм; 3 – узкополосный фильтр 532 ± 5 нм; 4, 16 – макрообъективы; 5 – скоростная камера; 6 – USB-камера; 7, 14 – фотодиоды; 8 – осциллограф; 9 – линза; 10 – усилитель яркости на парах бромида меди; 11 – нейтральный фильтр; 12 – согласующий объектив; 13 – диффузор; 15 – ПК

Рисунок 6.13 – Экспериментальная установка для комплексного исследования горения

Как показано в 4 главе диссертации (раздел 4.6), средняя яркость усиленных изображений соответствует интенсивности света, отраженного от поверхности образца нанопорошка. Использовался фотодиод Thorlabs DET10A / M (14 на рисунке 6.13) для регистрации средней яркости излучения, отраженного от поверхности объекта исследования и усиленного усилителем яркости. Объектив Navitar DO-5095 обеспечивал согласование луча усилителя яркости с размером сенсора фотодиода через нейтральный фильтр и диффузор, который устанавливался для равномерного распределения света по поверхности фотодиода. Для регистрации сигналов фотодиодов использовался осциллограф АКИП-4122/10.

Лазерные спеклы формировались излучением DPSS-лазера, освещающего объект со средней мощностью 20 мВт в области наблюдения лазерного монитора. Скоростная монохромная камера Phantom Fastcam SA1 с объективом Canon Macro Lens EF 100 мм размещалась на расстоянии 40 см от образца и записывала серию лазерных спекл-изображений со скоростью 500 кадров/с. Разрешение камеры составляло 1024×1024 пикселей. Для регистрации спекл-изображений использовался подход, подобный [153] для удаленного извлечения информации из вторичного спекл-изображения. Макрообъектив устанавливался на бесконечность, чтобы камера фокусировалась на дальнем поле, так что сам объект был расфокусирован. Оптическая ось камеры устанавливалась перпендикулярно поверхности образца. Угол α между оптической осью камеры и лазерным лучом DPSS составлял $\sim 20^\circ$, угол β между оптической осью камеры и оптической осью лазерного монитора составлял 25° (рисунок 6.13). Узкополосный фильтр 532 нм блокировал свет усилителя яркости и свечение горящего образца, обеспечивая регистрацию только спекл-изображений, формируемых излучением DPSS лазера.

USB-камера ELP-U8BFHD01M-MFV с объективом 5–50 мм использовалась для записи горения в собственном свете одновременно с записью спеклов скоростной камерой и сигналов средней яркости изображений лазерного монитора. Второй фотодиод Thorlabs DET10A / M (7 на рисунке 6.13) регистрировал яркость свечения, излучаемого образцом во время горения. Этот фотодиод располагался на

расстоянии 20 см от образца. Зажигание образцов нанопорошка осуществлялось открытым огнем спички.

Для оценки изменения поверхности объекта в области наблюдения в процессе горения, был рассчитан коэффициент корреляции двух соседних лазерных спекл-структур с использованием формулы (6.2). Соответственно, чем быстрее изменяется поверхность и чем больше эти изменения, тем меньше значение коэффициента корреляции между изображениями.

Поверхность образца нанопорошка может испытывать микроперемещения в области наблюдения вследствие нагрева. Нами использовалась подобласть изображения для сравнения лазерных спеклов во время расчета, чтобы исключить влияние микроперемещений. Например, возьмем подобласть изображения размером 400×400 пикселей из изображения размером 1024×1024 пикселей слева на рисунке 6.14, *a*. На рисунке 6.14, *b* показан кадр, следующий за кадром на рисунке 6.14, *a*. Выделенные области на обоих спекл-изображениях совпадают; разница изображений заключается в том, что спеклы переместились. Микроперемещения до того, как волна горения достигнет области наблюдения, возникают из-за деформации образца. Используя метод обхода [152, 171, 381, 382], было обнаружено, что наиболее похожий элемент изображения внутри изображения размером 1024×1024 пикселей дает наибольшее значение коэффициента корреляции, несмотря на существующее перемещение. Это значение использовано для дальнейшего анализа изменений поверхности горящего образца.

Лазерные спекл-паттерны, записанные в различные моменты горения нанопорошка алюминия, представлены на рисунке 6.15. Изображения (*a*) и (*б*) соответствуют распространению первой волны горения в области наблюдения, их яркость меняется незначительно по сравнению с исходной. По сравнению с (*a*) и (*б*), изображения (*в*) и (*г*) существенно отличаются от исходных (рисунок 6.14). Помимо изменения структуры спеклов, яркость изображения изменилась из-за изменения коэффициента отражения поверхности образца. В то же время яркость и структура спекл-изображений незначительно различаются при последовательном сравнении

двух соседних изображений.

Когда тепловые волны распространяются в области наблюдения, и изменяется структура поверхности, соответственно изменяется спекл-паттерн, что приводит к уменьшению значения коэффициента корреляции. Минимальные значения в моменты времени $\sim 1,6$ с и ~ 3 с на рисунке 6.16 соответствуют наиболее быстрым и значительным изменениям поверхности образца. Для оптимизации размера подобласти спекл-паттерна для расчета коэффициента корреляции, была построена серия кривых для одного и того же процесса горения. Размер подобласти увеличивался с шагом 40 пикселей по ширине и высоте.

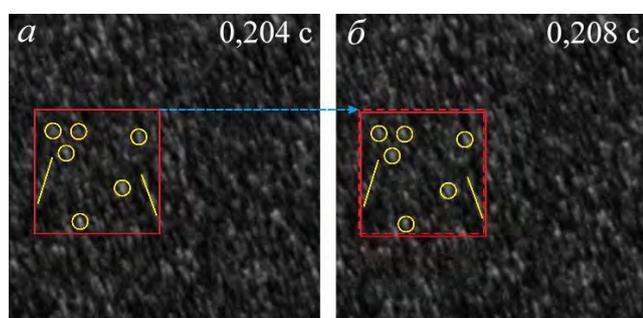


Рисунок 6.14 – Лазерные спекл-изображения поверхности образца нанопорошка алюминия до прихода фронта горения в область наблюдения в различные моменты времени (а) и (б)

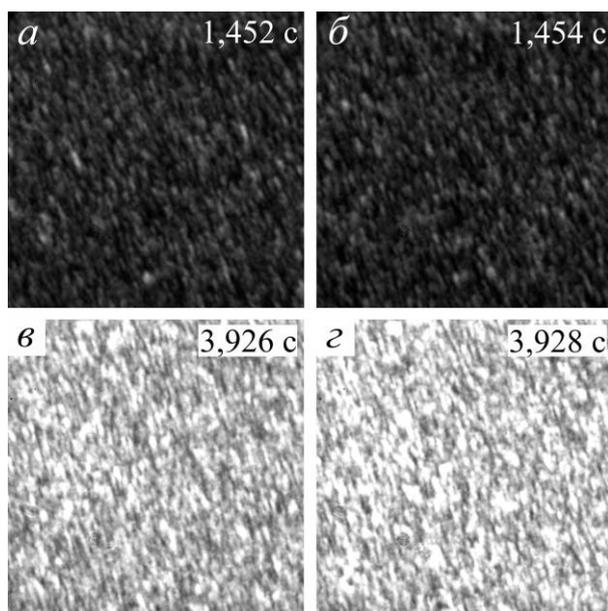


Рисунок 6.15 – Лазерные спекл-изображения поверхности нанопорошка алюминия во время прохождения первой (а), (б) и второй волны горения (в), (г) в области наблюдения

Как следует из результатов расчета коэффициента корреляции, представленных на рисунке 6.16, размера подобласти 80×80 пикселей уже достаточно для оценки тренда процесса горения. Когда размер подобласти составляет 400×400 пикселей, значение коэффициента корреляции изменяется менее чем на 5%, и менее чем на 3% при размере подобласти 520×520 пикселей. Поэтому дальнейшее увеличение размера подобласти не целесообразно, и в дальнейшем для расчета коэффициента корреляции использовался размер подобласти спекл-изображения 520×520 пикселей.

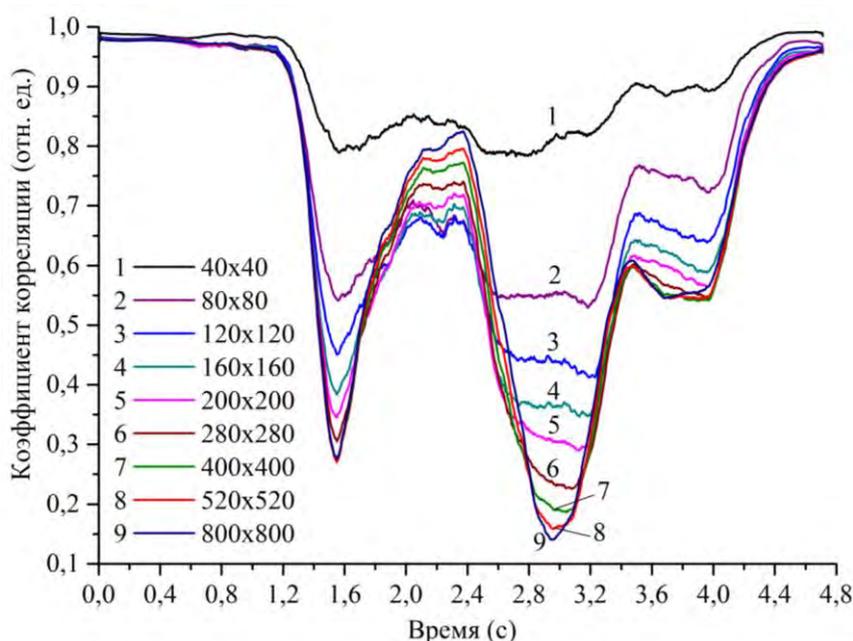
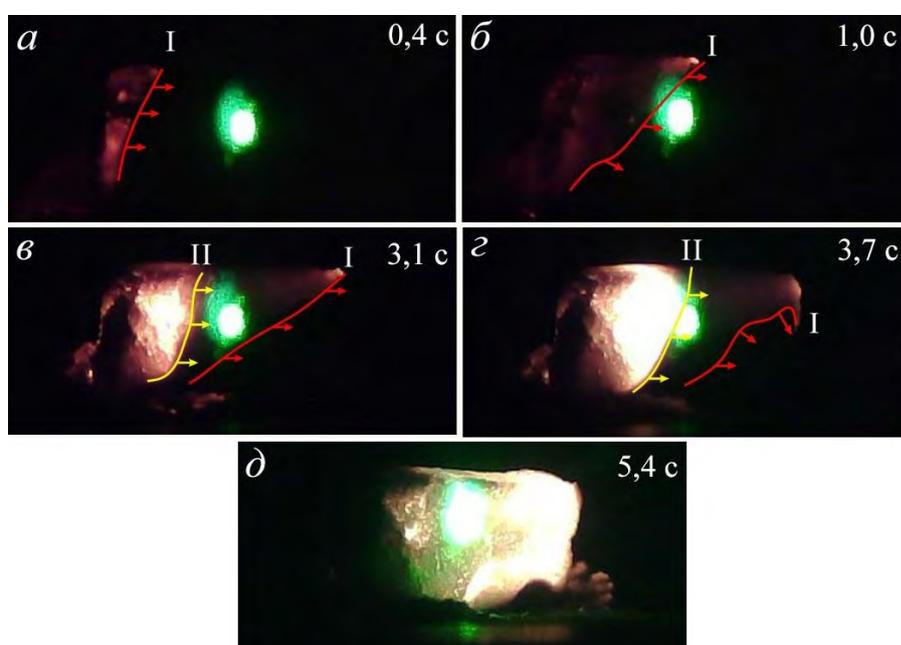


Рисунок 6.16 – Временные зависимости коэффициента корреляции при горении образца нанопорошка алюминия для различных размеров подобласти спекл-паттерна

Изображения, полученные в результате прямого наблюдения процесса горения образца nanoAl , записанные USB-камерой, представлены на рисунке 6.17. Изображения позволяют оценить направление распространения фронта горения и внешний вид свечения нагретой поверхности. После воспламенения на краю образца первая тепловая волна с низкой температурой распространяется по образцу (рисунок 6.17, а), и достигает области наблюдения (рисунок 6.17, б). При распространении первой волны изменяется поверхность образца нанопорошка, что

приводит к изменению лазерных спекл-изображений. Впоследствии процесс горения ускоряется; вторая волна горения появляется вне области наблюдения (рисунок 6.17, *в*). Состояние горения переходит в тепловой взрыв с ярким свечением, температура повышается. Фронт горения достигает поля наблюдения (рисунок 6.17, *з*). На рисунке 6.17, *д* представлено изображение, на котором вторая волна горения распространяется через образец. Температура снижается по мере полного сгорания образца. Наблюдается видимая усадка образца после того, как вторая тепловая волна распространяется примерно на половину образца.



(*a*)– (*д*) – различные моменты времени; красные линии – распространение фронта первой низкотемпературной волны, желтые линии – распространение фронта второй высокотемпературной волны

Рисунок 6.17 – Горение нанопорошка алюминия в воздухе

Визуализация поверхности горения нанопорошка алюминия показала, что процесс носит флуктуационный характер. Направление, скорость распространения волн горения и превращение наночастиц в микронные продукты сгорания зависят от однородности образца, размеров агломератов, каналов теплопроводности в порошковой смеси и других факторов [286, 369]. Таким образом, при горении близких по массе образцов нанопорошков наблюдаются вариации характера

протекания и временных характеристик стадий горения.

С использованием экспериментальной установки на рисунке 6.13 оценивали следующие параметры, характеризующие процесс горения: коэффициент корреляции спекл-изображений, среднюю интенсивность спекл-изображений, среднюю интенсивность изображений лазерного монитора и общую интенсивность пламени во время горения. На рисунке 6.18 представлены экспериментальные кривые для двух образцов нанопорошка алюминия. Так как параметры лазерного излучения различные для DPSS-лазера и усилителя яркости на парах бромида меди, освещающих поверхность образца, интенсивность отраженного света для каждого из них также отличается. Однако тенденция изменения и временные параметры совпадают. Поэтому графики были нормализованы для лучшего представления. Полученные зависимости соотносятся друг с другом, что позволяет сравнивать результаты измерений разными методами.

На кривых коэффициента корреляции отмечается несколько характерных особенностей. Момент времени t_1 , когда начинает уменьшаться коэффициент корреляции, соответствует началу нагрева объема перед первой волной горения. Период времени между t_1 и t_2 характеризуется движением агломератов исходных частиц нанопорошка, температура в этот момент недостаточна для начала окисления. Метод корреляции лазерных спекл-изображений позволяет определить продолжительность и динамику зоны предварительного нагрева. Уменьшение интенсивности спекл-изображений в момент t_2 соответствует прохождению первой волны низкотемпературного горения в области наблюдения. В течение промежутка времени между t_2 и t_3 первая волна горения пересекает область наблюдения, незначительно уменьшая коэффициент отражения поверхности нанопорошка. По истечении времени t_3 коэффициент корреляции и яркость спекл-изображений остаются практически постоянными, что соответствует индукционному периоду между первой низкотемпературной и второй высокотемпературной волнами горения. Вторая волна горения, начавшаяся в левой части образца на рисунке 6.17, в, распространяется в области наблюдения до момента времени t_4 . Время t_5

соответствует моменту, когда вторая волна горения проходит через область наблюдения. Из-за усадки образца во время второй стадии горения изменение структуры поверхности образца в области наблюдения продолжается с момента прихода второй волны горения t_4 до затухания пламени во время остывания.

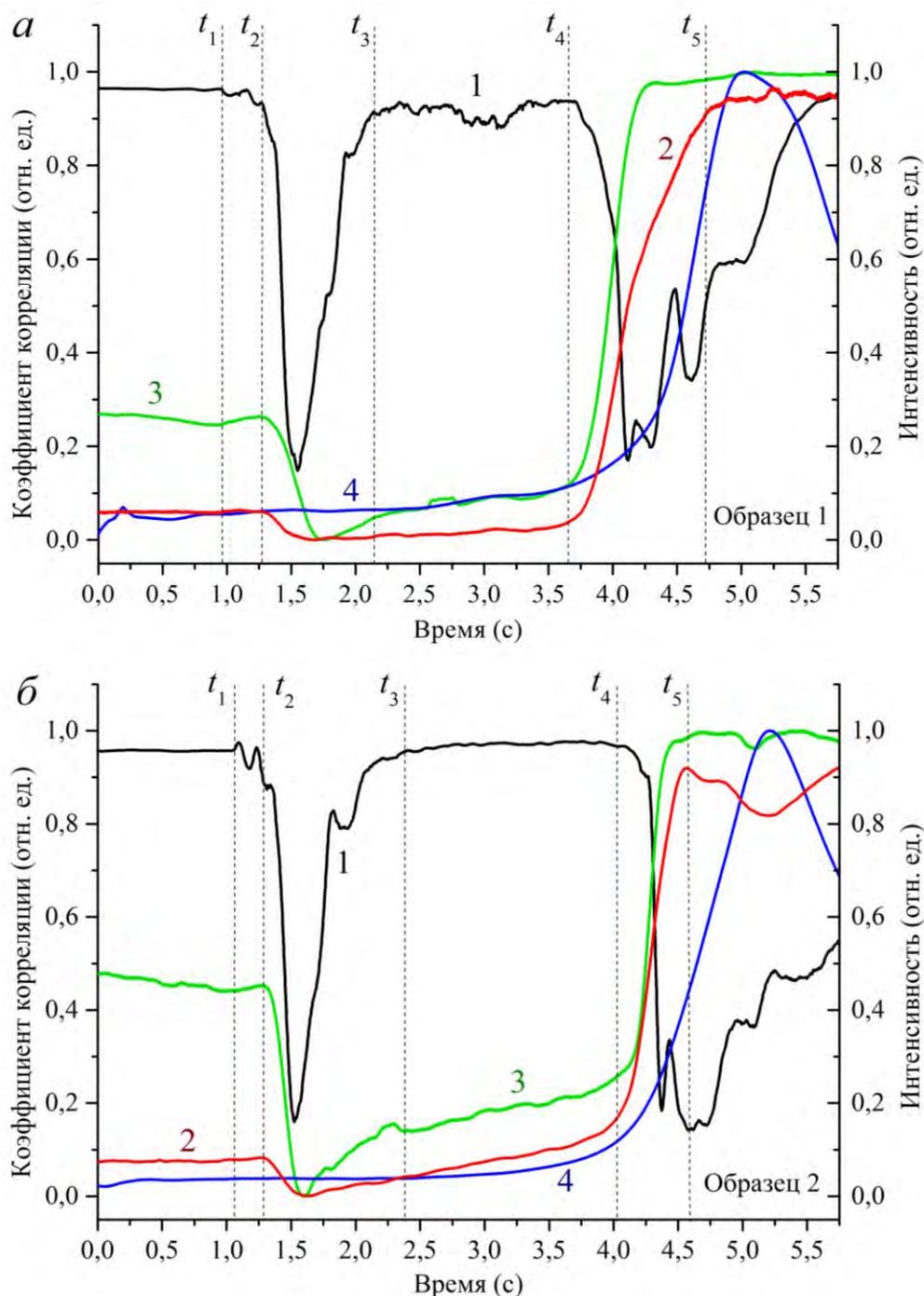


Рисунок 6.18 – Временные зависимости коэффициента корреляции спекл-изображений (1), средней интенсивности спекл-изображений (2), средней интенсивности изображений лазерного монитора (3), общей интенсивности пламени во время горения (4) для двух образцов нанопорошка алюминия (а), (б)

Кривая общей интенсивности пламени на рисунке 6.18 (образец 1) хорошо согласуется с кадрами видеозаписи на рисунке 6.17. Резкое увеличение яркости горения наблюдается практически одновременно со второй волной горения. Аналогичный характер горения наблюдается и для образца 2. Кривые средней интенсивности спекл-изображений и средней интенсивности изображений лазерного монитора дают примерно одинаковые сведения о временной эволюции поверхности, так как характеризуют изменение отражения поверхности образца. При этом интенсивность изображений лазерного монитора значительно изменяется по сравнению с интенсивностью спекл-изображений. Метод лазерного мониторинга имеет более высокую чувствительность за счет усиления яркости. Перед быстрым уменьшением интенсивности изображений лазерного монитора наблюдается ее незначительное увеличение, что совпадает с быстрым уменьшением коэффициента корреляции. Это означает, что структура поверхности в это время изменяется без заметного изменения коэффициента отражения.

В течение индукционного периода между первой и второй волнами горения отражательная способность поверхности практически постоянная. При этом структура поверхности может не изменяться (образец 2) или претерпевать механические изменения (образец 1), причиной которых является расширение и сжатие образцов из-за температурных градиентов. Как показывает кривая коэффициента корреляции спекл-изображений, механические изменения носят колебательный характер. В момент, когда вторая волна горения достигает области наблюдения (рисунок 6.17, г), интенсивности спекл-изображений и изображений лазерного монитора быстро возрастают, указывая на изменение отражательной способности поверхности образца. Примерно в это же время наблюдается быстрое уменьшение коэффициента корреляции спекл-изображений. После второй волны горения продукты сгорания начинают остывать, что сопровождается усадкой образца. В это время поверхность образца также изменяется, приводя к изменению спекл-изображений. Таким образом, используя коэффициент корреляции в качестве информативного параметра, возможно оценить время всего процесса структурных

изменений поверхности образца. Для восьми исследованных образцов нанопорошка алюминия суммарное время трех стадий горения в области наблюдения варьировалось от 3,1 до 5,2 с, длительность первой стадии горения составляла 0,7–0,9 с, а индукционный период варьировался от 0,8 до 2,2 с.

На рисунке 6.19 представлены характерные кривые горения двух образцов смеси порошков $\text{наноAl}+\text{наноFe}$. Как и при горении наноAl , кривые коэффициента корреляции также имеют два минимума, что соответствует изменению поверхности нанопорошка при распространении волн горения. Отличие заключается в том, что индукционный период между минимумами для смеси $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ намного короче, чем для наноAl без добавки. Кроме того, в начале первой волны горения наблюдаются значительные колебания коэффициента корреляции. Такой характер горения и увеличение скорости горения обусловлены каталитическим действием железа (оксида железа) на горение алюминиевого порошка [383–385].

Тенденция изменения средней интенсивности спекл-изображений и средней интенсивности изображений лазерного монитора одинаковы, за исключением первой стадии горения. Интенсивность спекл-изображений постепенно увеличиваются в течение первой стадии горения, периода индукции и второй стадии горения. Кривые интенсивности изображений лазерного монитора в начале первой стадии горения имеют спад, а затем рост.

Общая интенсивность пламени имеет несколько максимумов для всех образцов смеси $\text{наноAl}+\text{наноFe}$. Эти максимумы для образца 1 (рисунок 6.19) соответствуют кадрам прямой видеозаписи процесса горения $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ USB-камерой (рисунок 6.20). Из-за короткого периода индукции и нескольких локализаций, температура горения образца и яркость свечения увеличиваются с меньшей задержкой до момента воспламенения по сравнению с горением нанопорошка алюминия. Спад средней интенсивности спекл-изображений (кривая 2 на рисунке 6.19) и средней интенсивности изображений лазерного монитора (кривая 3 на рисунке 6.19) при охлаждении связано с образованием оксида железа желто-коричневого цвета (рисунок 6.1, б) на поверхности изделий, что приводит к

снижению отражательной способности поверхности. Для исследованных в работе [386] образцов $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ суммарное время трех стадий горения в области наблюдения варьировалась от 2,0 до 2,6 с, длительность первой стадии горения составляла 1,0–1,6 с.

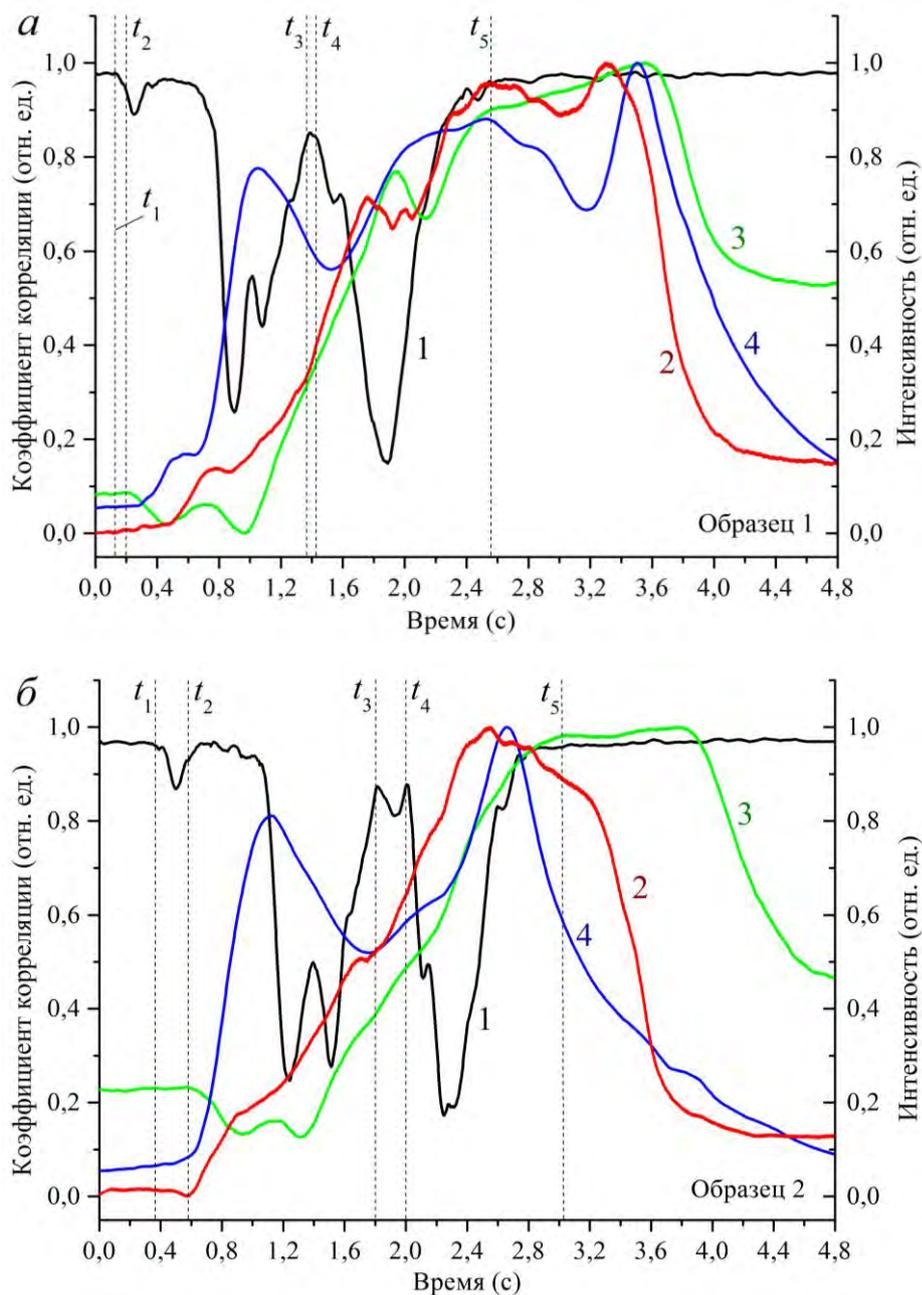


Рисунок 6.19 – Временные зависимости коэффициента корреляции спекл-изображений (1), средней интенсивности спекл-изображений (2), средней интенсивности изображений лазерного монитора (3), общей интенсивности пламени во время горения (4) для двух образцов смеси $\text{наноAl}+\text{наноFe}$ (а), (б)

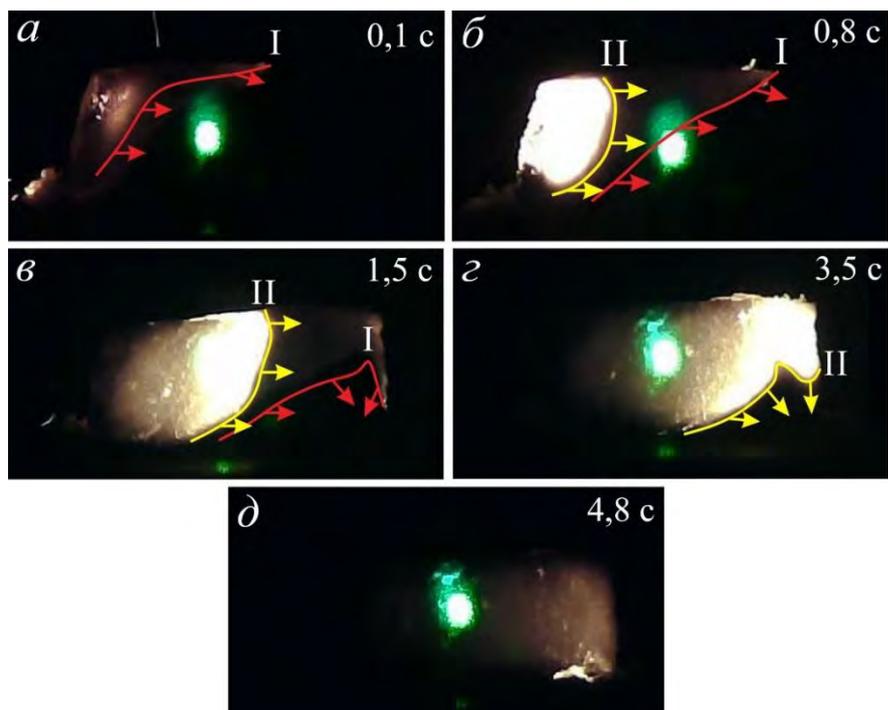


Рисунок 6.20 –Изображения горения смеси $\text{nanoAl}+\text{nanoFe}$ в воздухе в различные моменты времени (a)–(d): красные линии – распространение первой волны горения, желтые линии – распространение второй волны горения

В работе [387] продолжено использование метода корреляции лазерных спекл-изображений и программы расчета коэффициента корреляции [388] для исследования нанопорошка алюминия и смеси $\text{nanoAl}+\text{nanoFe}$. Результаты исследования представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Временные параметры горения

№	Длительность первой волны, с	Длительность второй волны, с	Индукционный период, с	№	Длительность первой волны, с	Длительность второй волны, с	Индукционный период, с
nanoAl				nanoAl+nanoFe			
1	1,19	1,92	0,33	1	0,89	1,17	0,15
2	1,31	1,95	0,68	2	0,62	0,90	0,43
3	1,32	0,86	0,65	3	0,88	1,19	0,38
4	1,05	1,72	0,78	4	1,08	0,88	0,18

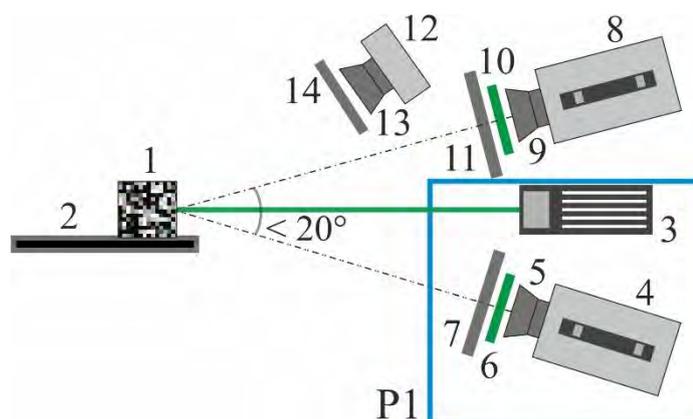
6.4. Применение метода лазерной спекл-корреляции для дистанционного контроля горения нанопорошков металлов

Экспериментальное исследование проводилось с применением двух оптических схем, представленных на рисунках 6.21 и 6.22 [389]. В обеих схемах использовались две скоростные камеры Photron Fastcam SA1 (HSC2) и Phantom Miro C110 (HSC1) для записи лазерных спекл-изображений, создаваемых одним лазером или одновременно двумя лазерами с разными длинами волн, а также USB-камера ELP-USBFHD01M-MFV для прямой видеозаписи горения в собственном свечении. Для формирования изображений использовались следующие объективы: Canon Macro Lens EF 180 mm устанавливался на камеру Phantom Miro C110; Sigma EX DG Macro 105 мм устанавливался на камеру Photron Fastcam SA1; Canon Macro Lens EF 100 мм устанавливался на USB-камеру. Предложенные схемы позволили изучить возможности предлагаемого метода дистанционного контроля горения и подтвердить достоверность обнаружения характерных изменений поверхности образца во время горения при различных условиях эксперимента. Скоростные камеры имели внешнюю синхронизацию от одного генератора импульсов Актаком AWG-4122, и одновременный внешний запуск для обеспечения одновременной регистрации спекл-изображений поверхности в процессе горения двумя скоростными камерами на одной или двух длинах волн. Скорость регистрации обеих камер устанавливалась равной 500 кадров/с при разрешении 1024×1024 пикселей, чтобы обеспечить время записи ~10 с, достаточной для записи всего процесса горения нанопорошка алюминия.

Перед объективами скоростных камер устанавливались узкополосные полосовые светофильтры на соответствующие длины волн, и нейтральные светофильтры для общего ослабления яркости, чтобы избежать насыщения камер из-за чрезмерной яркости. Нейтральный светофильтр устанавливался также перед объективом USB-камеры.

В качестве лазера подсветки 3 (ILAS1) использовался непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой (DPSS) с длиной волны 532 нм и

мощностью 50 мВт. Образец нанопорошка располагался на предметном столике так, чтобы луч лазера подсветки освещал поверхность перпендикулярно через слой плазмы в определенном месте, которое представляет собой зону контроля (рисунок 6.21). В данной работе в качестве зоны наблюдения был выбран геометрический центр образца. В общем случае, область наблюдения может быть произвольной. Шероховатость поверхности приводит к тому, что отраженный лазерный луч генерирует случайное фазовое распределение в окружающем пространстве. Это случайное распределение регистрируется скоростными камерами в виде пятнистой картины (спеклов) в дальней зоне. Поэтому фокусы объективов камер 4 и 7 устанавливались на бесконечность вместо фокусировки на поверхности объекта для получения лазерных спекл-изображений в эксперименте. Изменение поверхности в этой области несет информацию о течение процесса горения.



1 – образец нанопорошка; 2 – предметный столик; 3 – лазер с длиной волны 532 нм; 4 – камера HSC1; 5, 9, 13 – объективы; 6, 10 – полосовые фильтры 532 ± 5 нм; 7, 11, 14 – нейтральные светофильтры; 8 – камера HSC2; 12 – USB-камера

Рисунок 6.21 – Схема эксперимента для дистанционного контроля с одним лазером подсветки

Для дистанционного исследования высокотемпературного горения с использованием метода корреляции лазерных спекл-изображений, на практике имеет смысл лазер подсветки и камеру, регистрирующую спекл-изображения, располагать в одном функциональном блоке. Поэтому в экспериментах с одним лазером подсветки рассматривались два случая. В первом случае ILAS1 находился на фиксированном расстоянии L_{ILAS1} от объекта исследования, равном 0,4 м, а

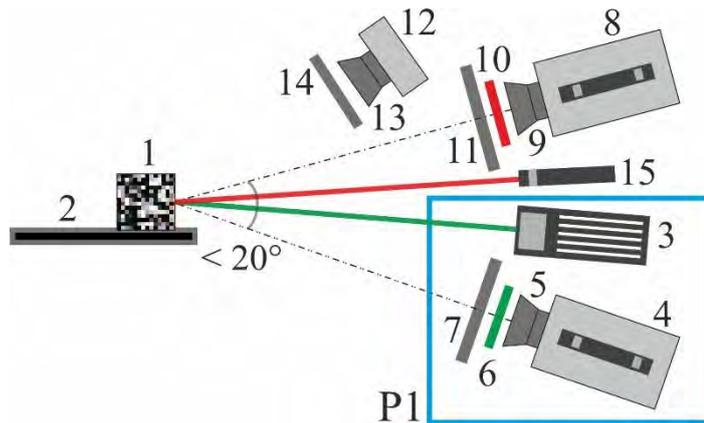
камера 4 (HSC1) располагалась на расстоянии L_{HSC1} , равном 0,4 м, 1 м, 2 м, 3 м, 4 м и 5 м, вдоль оптической оси объектива 5 так, чтобы спекл-изображения попадали в область зрения камеры HSC1. Фильтры 6 и 7 перемещались вместе с камерой HSC1. Соответственно, в первом случае диаметр пятна не изменялся, изменялось расстояние, на котором регистрировалось пространственное распределение спеклов.

Во втором случае ILAS1 и HSC1 помещались на одну платформу $P1$ и перемещались одновременно на аналогичные расстояния 0,4 м, 1 м, 2 м, 3 м, 4 м и 5 м вдоль оптической оси объектива 5. Без использования коллимирующей оптики, площадь лазерного пятна на поверхности образца увеличивается с увеличением расстояния до лазера подсветки L_{ILAS1} за счет расходимости излучения, то есть увеличивается область объекта, формирующая спекл-изображения. Это приводит к уменьшению средней яркости лазерных спекл-изображений, а также к изменению размера спеклов при постоянном фокусном расстоянии и диафрагме объектива. Разный размер контролируемой области, вероятно, приведет к тому, что временные параметры стадий горения (низкотемпературная и высокотемпературная волны, индукционный период), рассчитанные по последовательности спекл-изображений, будут отличаться от эксперимента к эксперименту не только из-за неоднородного горения самих образцов, но и из-за различного размера контролируемой области. Для корректного анализа коэффициентов корреляции изображений, полученных камерой 4 (HSC1) при различном расстоянии от объекта наблюдения, нами устанавливалась вторая камера HSC2, которая регистрировала спекл-изображения на фиксированном расстоянии 0,4 м от объекта исследования во всех экспериментах. Камеры HSC1 и HSC2 размещались по обе стороны от лазера подсветки под одинаковым углом <10 градусов, по подношению к лазерному лучу. Высота лазерного луча и оптических осей объективов 5 и 9 устанавливалась одинаковой для захвата спекл-изображений, формируемых всей областью наблюдения. Перед объективами скоростных камер устанавливались узкополосные фильтры на одинаковую длину волны 532 ± 5 нм.

Для исследования влияния расстояния $L_{ILAS1}=L_{HSC1}$ на корреляцию изображений предложена схема на рисунке 6.22. В отличие от схемы на рисунке 6.21, в схеме на рисунке 6.22 нами использовался второй лазер подсветки (ILAS2) – непрерывный диодный лазер с длиной волны 650 нм и мощностью 20 мВт, который располагался на расстоянии 0,4 м от объекта исследования, фиксированном для всей серии экспериментов. Использование диодного лазера обеспечивало второй канал регистрации спекл изображений на второй длине волны. Для записи спекл-изображений, формируемых одновременно двумя лазерами, перед объективами скоростных камер устанавливались разные узкополосные фильтры с длинами волн 532 ± 5 нм и 650 ± 5 нм. Таким образом, камера HSC1 записывала спекл-изображения, формируемые лазером ILAS1, а камера HSC2 – изображения, формируемые лазером ILAS2. Как и в экспериментах с одним лазером подсветки, в экспериментах с двумя лазерами подсветки лазер ILAS1 и камера HSC1 устанавливались на расстояниях 0,4 м, 1 м, 2 м, 3 м, 4 м и 5 м вдоль оптической оси объектива 5 так, чтобы спекл-изображения попадали в область зрения камеры HSC1. Время экспозиции HSC2 устанавливалось равным 100 мс во всех экспериментах; время экспозиции HSC1 устанавливалось равным 100 мс для визуально ярких изображений и 200 мс для визуально темных изображений.

Основой техники спеклов является особенность, что изменение характеристик образца может быть выражено в виде изменения временного или пространственного распределения спекл-поля. В частности, метод лазерной спекл-корреляции состоит в том, чтобы целенаправленно выделить изменяющиеся особенности спекл-структуры и использовать их в качестве характеристики изменения поверхности образца. Горение нанопорошка алюминия в воздухе протекает относительно монотонно в две стадии. Во время горения нанопорошка алюминия тепловые волны распространяются через область наблюдения за короткое время, изменяют структуру ее поверхности и приводят к изменению распределения спекл-поля. Изменения распределения спекл-полей может быть охарактеризовано схожестью двух соседних спекл-изображений, определяемых

коэффициентом корреляции. Для расчета коэффициента корреляции в этой работе использовалась корреляционная формула (6.2). Диапазон значений коэффициента корреляции составляет от 0 до 1; чем ближе значение к 1, тем меньше изменение в наблюдаемой области. Согласно результатам работы [169], размер изображения для расчета был выбран равным 500×500 пикселей в центральной части изображения.



1 – образец нанопорошка; 2 – предметный столик; 3 – лазер с длиной волны 532 нм (ILAS1); 4 – камера HSC1; 5, 9, 13 – объективы; 6 – полосовой фильтр 532 ± 5 нм; 7, 11, 14 – нейтральные светофильтры; 8 – камера HSC2; 10 – полосовой фильтр 650 ± 5 нм; 12 – USB-камера; 15 – лазер с длиной волны 650 нм (ILAS2)

Рисунок 6.22 – Схема эксперимента для дистанционного контроля с двумя лазерами подсветки

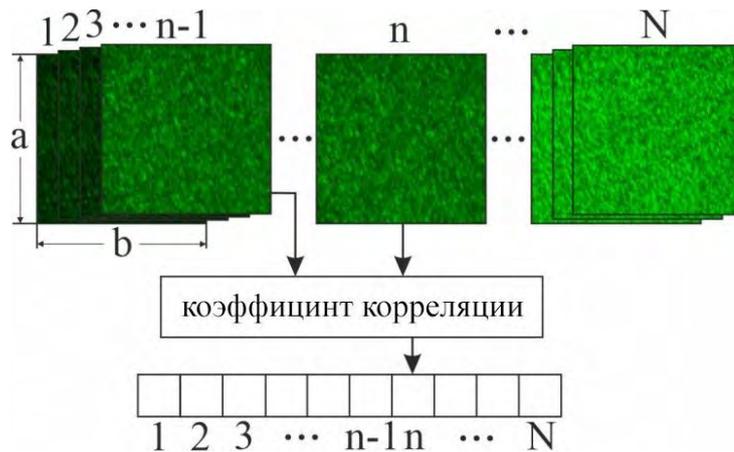


Рисунок 6.23 – Схема обработки спекл-изображений

Изменение коэффициента корреляции во времени дает возможность определения продолжительности тепловых волн в зоне наблюдения, скорости распространения тепловых волн и интервал между двумя тепловыми волнами.

Процедура обработки схематично показана на рисунке 6.23. Начиная с первого кадра, выбираются последовательно два соседних изображения в серии записанных лазерных спекл-изображений для вычисления коэффициента корреляции, а затем графически представляется кривая коэффициента корреляции всего процесса в реальном времени.

На рисунке 6.24 показаны спекл-изображения, зарегистрированные камерой HSC1 во время горения нанопорошка алюминия в схеме на рисунке 6.22 при расположении камеры HSC1 и лазера LAS1 на расстоянии 0,4 м до объекта. На рисунке 6.24 также приведены кадры видеозаписи горения нанопорошка алюминия в собственном свечении, примерно соответствующие тем же моментам времени. После инициирования горения сбоку от области наблюдения, первая низкотемпературная волна распространяется по образцу. Когда первая волна горения достигает область контроля, наблюдается быстрое изменение спекл-изображений, при этом яркость остается низкой. Когда первая волна проходит область, движение спеклов приостанавливается на некоторый промежуток времени (индукционный период). После индукционного периода вторая высокотемпературная волна горения распространяется в той же области, где прошла первая волна горения. Когда вторая тепловая волна горения проходит область наблюдения, резко изменяется не только внешний вид спеклов, но и их яркость из-за увеличения отражательной способности продуктов горения (4,5 секунды на рисунке 6.24). Когда процесс горения закончился, картина спеклов практически не меняется. Незначительное изменение яркости и некоторое движение спекл-изображений возможны вследствие остывания образца.

На рисунке 6.25 представлены изображения лазерных спеклов, записанные на расстоянии L_{HSC1} , равном 0,4 м и 5 м, с использованием схемы на рисунке 6.21 до начала горения и после окончания горения. Изображения на рисунке (а), (б) (камера HSC1) и на рисунке (в), (г) (камера HSC2) соответствуют расстоянию $L_{HSC1}=0,4$ м. Рисунки (д), (е) (камера HSC1) и рисунки (ж), (з) (камера HSC2) соответствуют случаю, когда только камера HSC1 располагалась на расстоянии $L_{HSC1}=5$ м, лазер

ILAS1 оставался на расстоянии $L_{ILAS1}=0,4$ м. В случае на рисунках (*и*), (*к*) (камера HSC1) и на рисунках (*л*), (*м*) (камера HSC2) лазер ILAS1 и HSC1 устанавливались вместе на платформе *PI* на расстоянии $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=5$ м от объекта контроля. В отличие от спеклов на рисунках (*а*), (*б*), спеклы на рисунках (*д*), (*е*) нечеткие и имеют существенно большие размеры. При одновременном перемещении ILAS1 и HSC1, спеклы, регистрируемые камерой HSC1, остаются четкими и незначительно увеличиваются в размере, при этом спеклы, регистрируемые камерой HSC2 значительно уменьшаются в размерах.

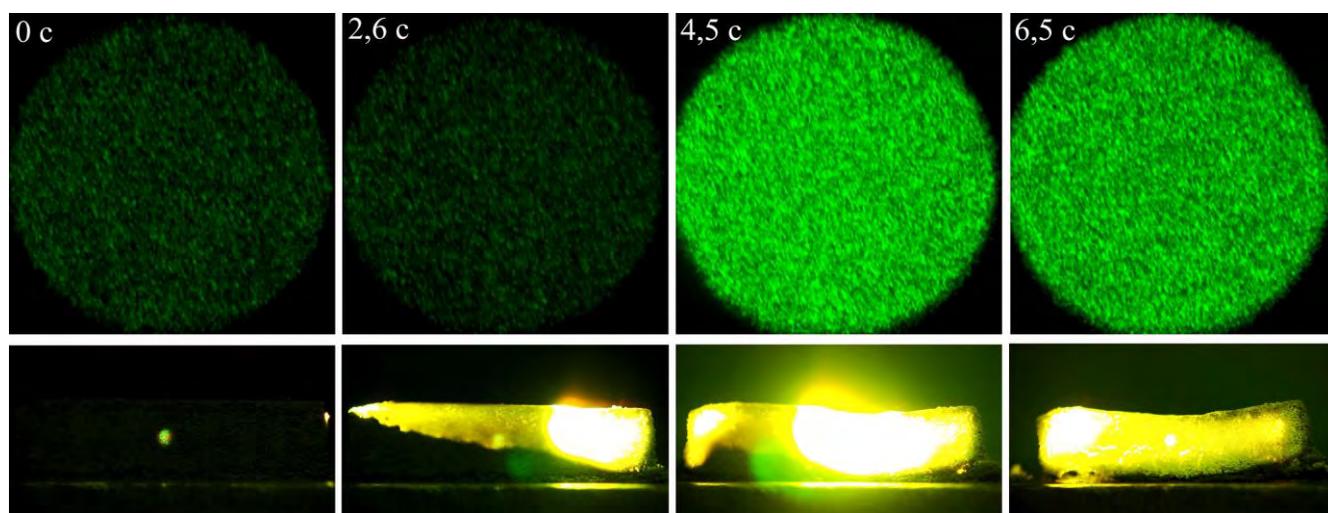
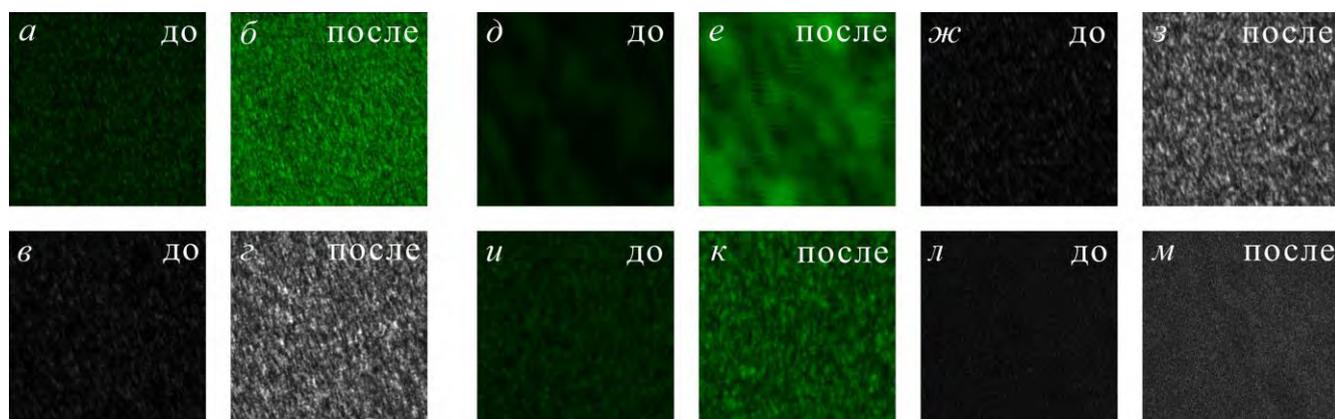


Рисунок 6.24 – Спекл-изображения процесса горения (верхний ряд) и изображения горящего образца нанопорошка алюминия в собственном свечении (нижний ряд)



а, б, д, е, и, к – камера HSC1; *в, з, ж, з, л, м* – камера HSC2

Рисунок 6.25 – Спекл-изображения поверхности нанопорошка алюминия до начала горения и после окончания горения

На рисунке 6.26 показаны изображения объектов до начала горения, на которых пунктирными линиями отмечены границы образцов и примерные области, освещаемые лазерами ILAS1 и ILAS2 (рисунок 6.22). Размер области, освещаемой одновременно лазерами ILAS1 и ILAS2, расположенными на расстоянии 0,4 м, одинаковый для обоих лазеров и составляет 0,7 мм. При отдалении лазера ILAS1 диаметр освещаемой им области увеличивается, как это показано зеленой пунктирной линией. Пунктирной линией показана усредненная величина диаметра лазерного пятна. Во внимание принимается наиболее яркая часть излучения, поскольку менее яркое излучение блокируется нейтральными светофильтрами. Центр области, освещаемой ILAS1, во всех экспериментах совмещался с областью, освещаемой ILAS2, с целью контроля распространения волн горения в одной области образца и обеспечения возможности сравнения результатов расчета коэффициента корреляции спекл-изображений, записанных одновременно камерами HSC1 и HSC2.

Лазерные спекл-изображения, зарегистрированные в схеме с двумя лазерами подсветки, с четырьмя различными образцами нанопорошка алюминия при разном времени экспозиции камеры HSC1 на расстоянии 0,4 м и 5 м, показаны на рисунке 6.27. Из представленных данных следует, что увеличение экспозиции камеры дает более яркие спекл-изображения. Увеличение расстояния от объекта наблюдения до камеры и лазера подсветки приводит к увеличению размеров спеклов за счет увеличения размера пятна на объекте. В случае с неизменным расстоянием от лазера (ILAS1) до объекта и от объекта до камеры (HSC1) незначительно меняется только яркость спекл-изображений за счет неоднородности горения образцов.

На рисунке 6.28 представлен коэффициент корреляции для трех процессов горения образцов в схеме на рисунке 6.21, полученный с использованием одного лазера подсветки и двух скоростных камер при различном расположении камеры HSC1 и лазера. Кривые коэффициента корреляции во времени рассчитывались для всего видеоряда изображений.

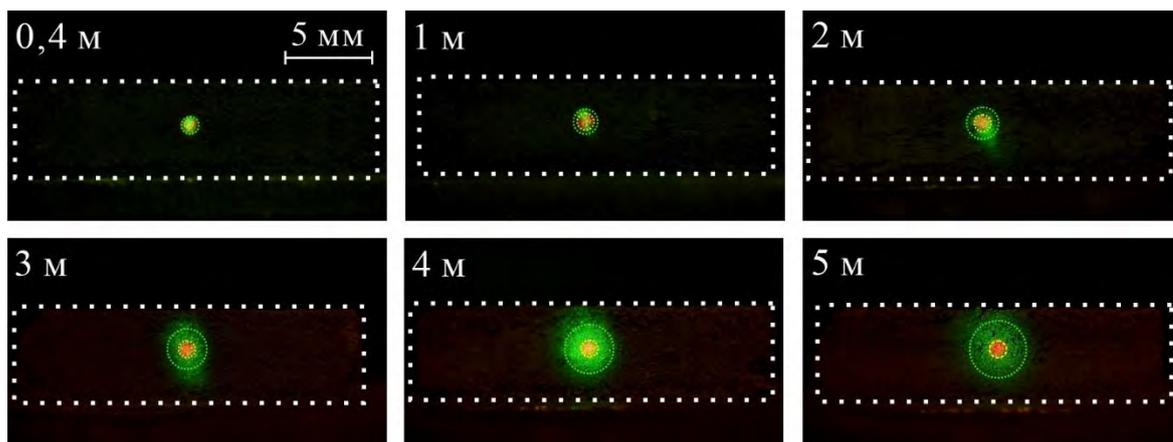


Рисунок 6.26 – Вид лазерной подсветки на поверхности образца (кадры с USB-камеры) до начала горения при различном расстоянии ILAS1 от образца

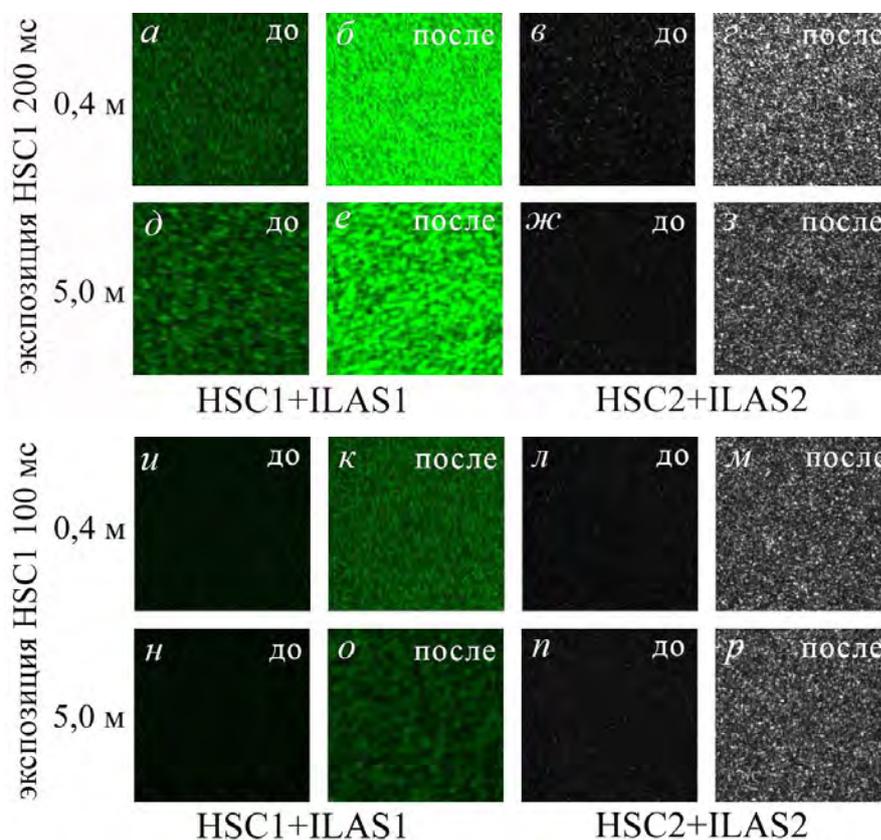
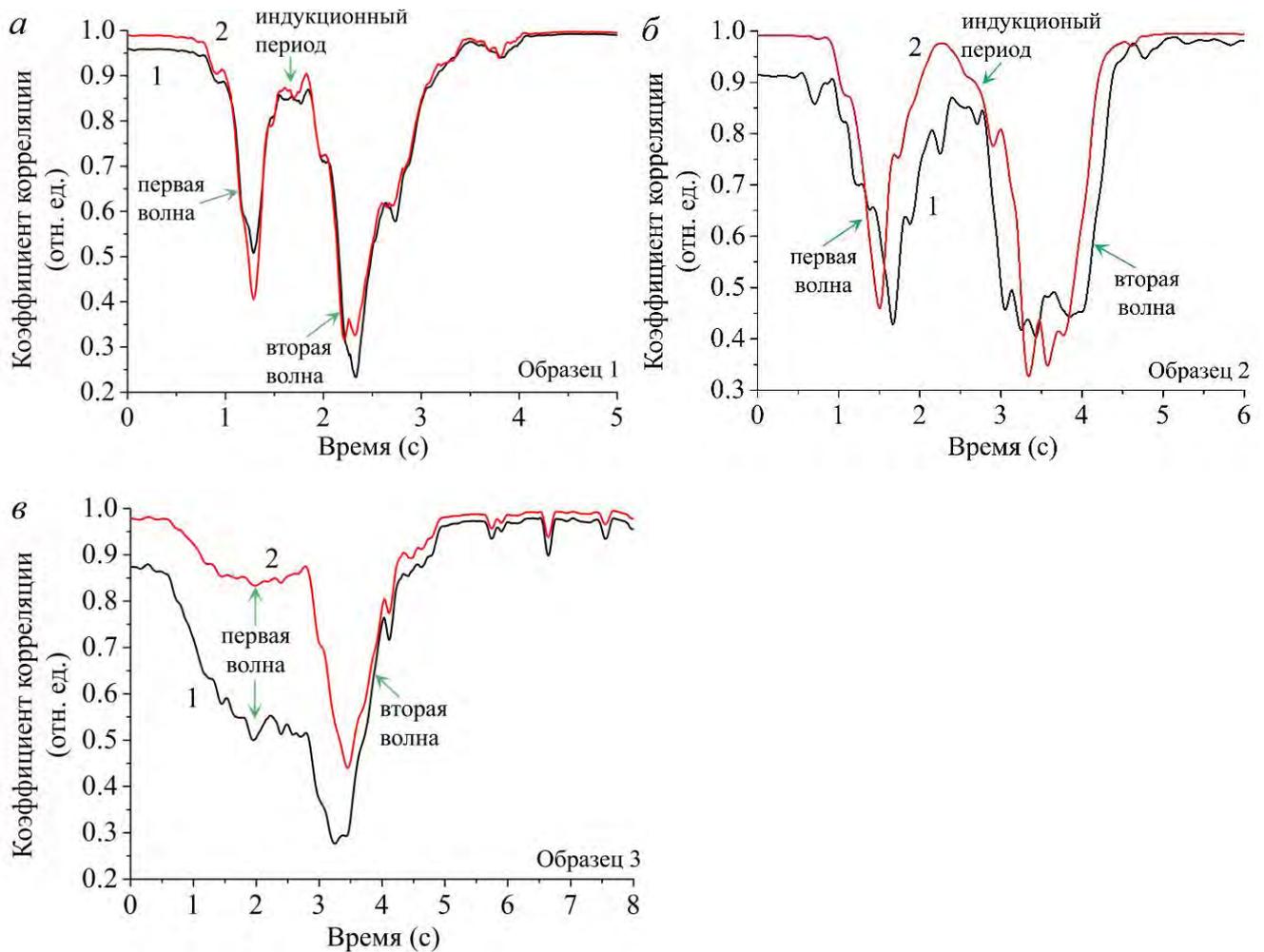


Рисунок 6.27. Спекл-изображения поверхности образцов нанопорошка алюминия до начала горения и после окончания горения при времени экспозиции HSC1 200 и 100 мс и расстоянии до HSC1 (ILAS1) 0,4 и 5 м

Каждая диаграмма на рисунке 6.28 содержит две кривые коэффициента корреляции, полученные с использованием 2-х камер (HSC1 и HSC2). На рисунке (a), при $L_{ILAS1}=0,4$ м, кривые практически совпадают численно и по форме. На

кривых отчетливо различаются два минимума, соответствующие волнам горения. Кривые на рисунке (б) показывают результаты обработки спекл-изображений при расстояниях $L_{HSC1}=5$ м и $L_{ILAS1}=0,4$ м.



a – $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=0,4$ м; *б* – $L_{HSC1}=5$ м, $L_{ILAS1}=0,4$ м; *в* – $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=5$ м; 1 – для излучения ИЛАС1; 2 – для излучения ИЛАС2; экспозиция 200 мс

Рисунок 6.28 – Коэффициент корреляции спекл-изображений для различного расположения камеры HSC1 и лазера подсветки ИЛАС1 (схема на рисунке 6.21)

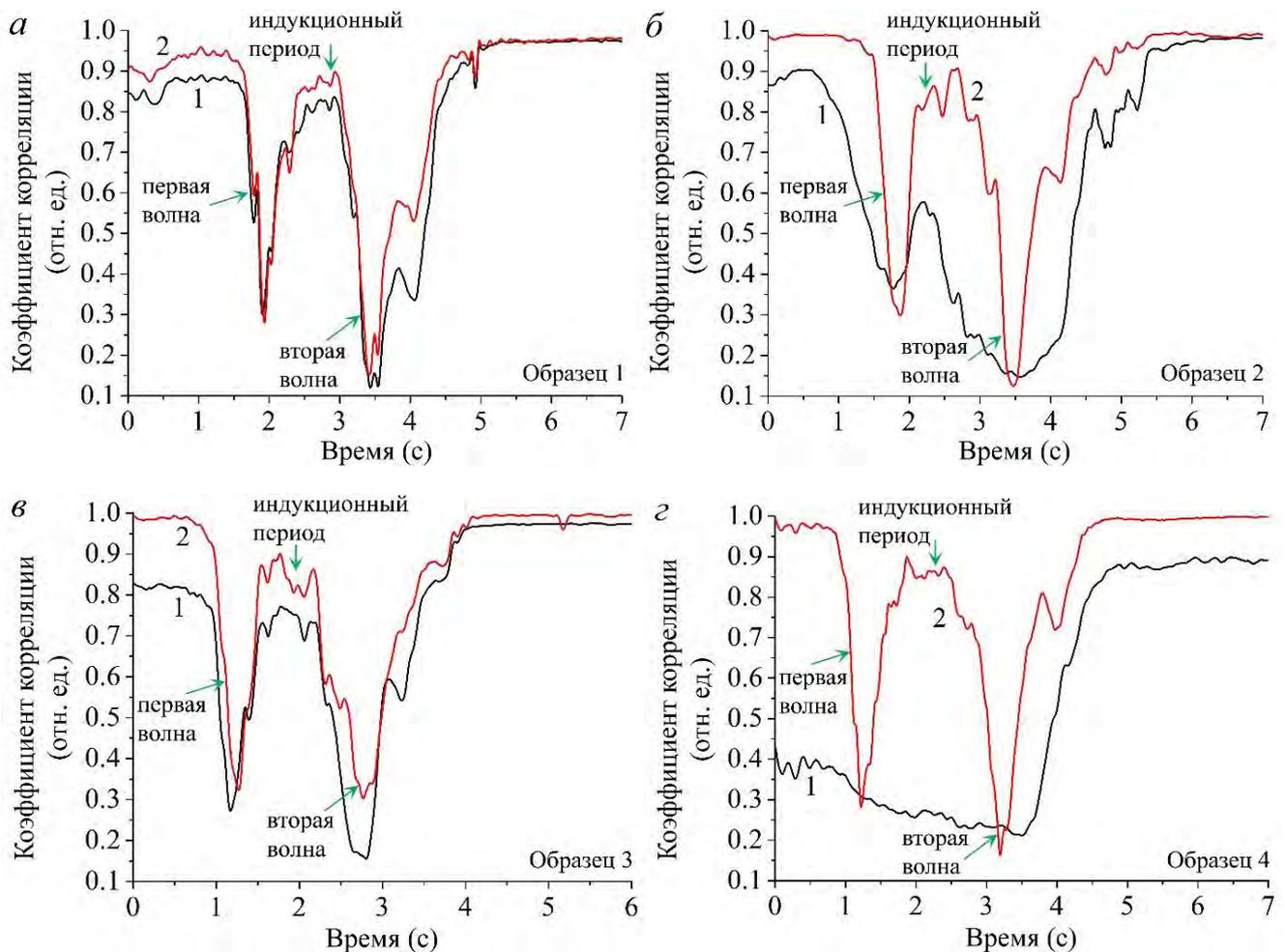
В целом, обе временные зависимости аналогичным образом описывают временные параметры изменения поверхности во время прохождения тепловых волн и имеют близкие значения начала первой и второй волн горения. При наблюдении на близком расстоянии $L_{HSC1}=0,4$ м наибольшее значение коэффициента корреляции ~ 1 , и кривые имеют меньшие колебания по сравнению с

измерениями, выполненными на расстоянии $L_{HSC1}=5$ м. При $L_{HSC1}=5$ м стадии горения «размываются» во времени, что, вероятно, является следствием меньшей четкости спекл-изображений (рисунок 6.25, *д*, *е*). Кривые на рисунке 6.28, *в* показывают результаты обработки спекл-изображений при перемещении модуля *PI* на расстояние 5 м ($L_{HSC1}=L_{ILAS1}=5$ м). Внешний вид кривых схожий, в обоих случаях наблюдается один ярко выраженный минимум, соответствующий второй волне горения. Второй экстремум (менее выраженный) соответствует первой волне горения. При этом абсолютное значение коэффициента корреляции отличается почти в 2 раза. Для этого образца как такового индукционного периода не наблюдалось из-за значительного увеличения диаметра области наблюдения при увеличении L_{ILAS1} . Вторая волна приходила в область наблюдения практически сразу после первой волны горения.

На рисунке 6.29 представлено изменение коэффициента корреляции в ходе четырех процессов горения образцов в схеме на рисунке 6.22, полученного с использованием двух лазерных источников и двух скоростных камер. Рисунок (*а*) соответствует случаю $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=0,4$ м. Полученные кривые коэффициента корреляции практически совпадают. Отчетливо распознаются минимумы, соответствующие волнам горения. На основании представленных на рисунке (*а*) данных можно сделать вывод, что влияние различных длин волн лазера на результаты незначительно в видимом спектральном диапазоне.

Рисунок 6.29, *б* соответствует случаю $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=5$ м. Тенденция кривой *1*, в целом, дает информацию о количестве стадий процесса, максимальные значения совпадают, т.е. позволяют идентифицировать момент, когда волна горения проходит центр области наблюдения. Из-за большего диаметра пятна при $L_{ILAS1}=5$ м (рисунок 6.26) моменты начала стадий горения значительно отличаются. На рисунке (*в*) представлен случай $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=0,4$ м, аналогичный рисунку (*а*), отличающийся меньшим временем экспозиции. Временные параметры стадий горения совпадают, при этом имеет место отличие в абсолютном значении коэффициента корреляции. На рисунке (*г*) показаны кривые случая $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=5$ м, аналогичному рисунку (*б*),

отличающиеся меньшим временем экспозиции. Полученная кривая 1 позволяет идентифицировать только вторую стадию горения, когда яркость изображений начинает значительно увеличиваться.



а, в – $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=0,4$ м; *б, г* – $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=5$ м; 1 – для излучения ILAS1; 2 – для излучения ILAS2; экспозиция 200 мс (*а, б*) и 100 мс (*в, г*)

Рисунок 6.29 – Коэффициент корреляции спекл-изображений для различного расстояния камеры HSC1 и лазера подсветки ILAS1 от объекта наблюдения (схема на рисунке 5.22)

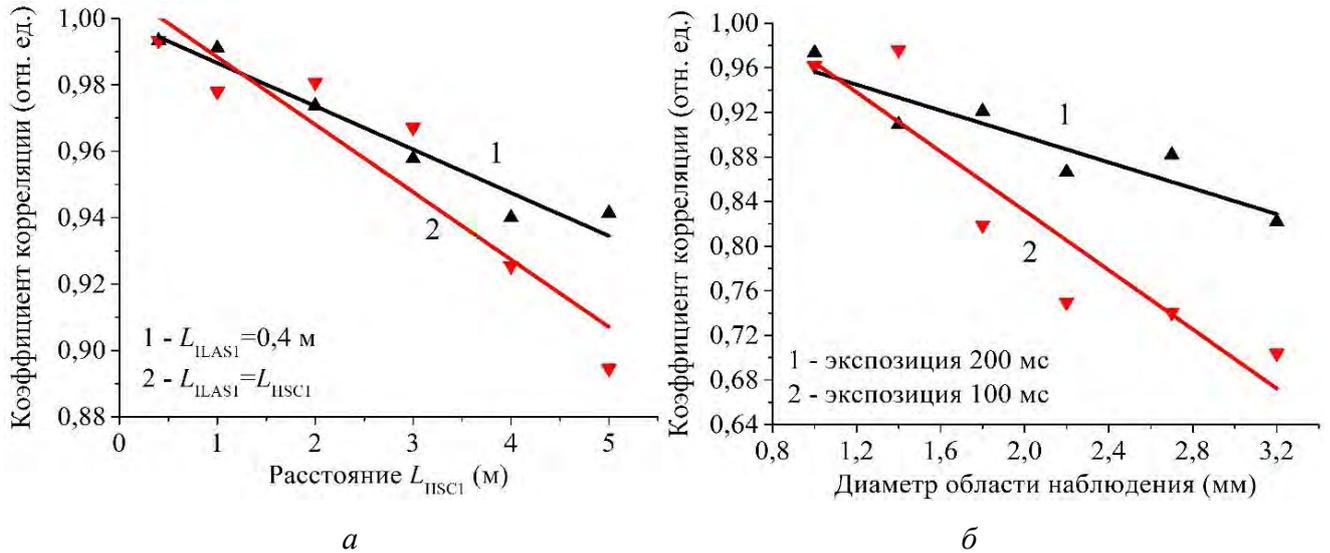
В дополнение к качественному анализу различий между кривыми коэффициента корреляции, проводился расчет взаимной корреляции данных кривых при различных условиях регистрации. На рисунке 6.30 показаны зависимости корреляции кривых коэффициента корреляции при различных условиях наблюдения. Зависимости показывают, насколько кривые 1 и 2 на

рисунках 6.28, 6.29 отличаются с увеличением расстояний L_{HSC1} , L_{ILAS1} , и с увеличением диаметра области наблюдения. Эти рассчитанные данные позволяют анализировать точность удаленных наблюдений. Все зависимости показывают тенденцию к снижению точности с увеличением расстояний L_{HSC1} , L_{ILAS1} в обеих схемах наблюдения. Расстояние пропорционально влияет на результаты, и эта пропорциональность, вероятно, сохранится и при дальнейшем увеличении расстояния. Зависимость (1) на рисунке 6.30, *a* показывает влияние только перемещения камеры. Зависимость 2 на рисунке 6.30, *a* показывает влияние перемещения камеры и лазерного источника.

Представленные на рисунке 6.28–6.30 данные об изменении коэффициента корреляции цифровых спекл-изображений в процессе горения образцов нанопорошка алюминия позволяют сделать следующие выводы. Временные параметры кривых коэффициента корреляции существенно зависят от размера области, освещаемой лазером подсветки, и экспозиции камеры, регистрирующей спекл-изображения. Коэффициент корреляции, полученный при $L_{HSC1}=L_{ILAS1}=0,4$ м ранее нами верифицировался с применением лазерного монитора (рисунки 6.18–6.20), поэтому мы считаем его достоверным для диаметра области наблюдения 0,9–1 мм. Увеличение расстояния L_{HSC1} при неизменном расстоянии L_{ILAS1} приводит к увеличению размера спеклов (рисунки 6.25, *d*, *e*) и их размытию, что является причиной уменьшения коэффициента корреляции с 0,99 до 0,94 до при увеличении расстояния от 0,4 до 5 метров (зависимость 1 на рисунке 6.30, *a*). Поскольку уменьшение коэффициента корреляции незначительное (~5%), можно сделать вывод, что отдаление только камеры не приводит к значительной погрешности при определении временных параметров процесса горения.

Кривая коэффициента корреляции позволяет определить продолжительность распространения двух волн горения от области инициирования до области наблюдения, продолжительность распространения волн в области наблюдения и индукционный период. Таким образом, предложенная аппаратно-программная реализация, являясь относительно простой, обеспечивает возможность

определения скорости распространения тепловых волн различных образцов при различных условиях (таблица 6.2).



a – схема 6.21, кривые 1 и 2 на рисунке 6.28; *б* – схема 6.22, кривые 1 и 2 на рисунке 6.29,

$$L_{ILAS1}=L_{HSC1}=0,4-5 \text{ м}$$

Рисунок 6.30 – Взаимная корреляция кривых коэффициента корреляции спекл-изображений во времени при различных условиях регистрации

Таблица 6.2 – Скорость распространения волн горения нанопорошка алюминия

Скорость распространения горения (мм/с)								
Расстояние, м	$L_{ILAS1} = 0,4 \text{ м} \quad L_{HSC1} = 0,4-5 \text{ м}$ $L_{HSC2} = 0,4 \text{ м}$				$L_{ILAS1} = L_{HSC1} = 0,4-5 \text{ м}$ $L_{HSC2} = 0,4 \text{ м}$			
	Первая волна		Вторая волна		Первая волна		Вторая волна	
	HSC1	HSC2	HSC1	HSC2	HSC1	HSC2	HSC1	HSC2
0,4	0,788	0,788	1,153	1,153	0,788	0,788	1,153	1,153
1,0	0,7	0,7	1,414	1,414	0,584	0,584	1,109	1,109
2,0	0,775	0,717	1,885	1,897	0,556	0,556	0,816	0,858
3,0	1,228	1,228	1,507	1,368	0,664	0,645	0,865	0,836
4,0	0,817	0,81	1,228	1,17	0,42	–	0,595	0,559
5,0	0,934	0,903	1,418	1,371	0,522	0,623	0,623	0,505

Для практического использования метода корреляции лазерных спекл-изображений для исследования процесса высокотемпературного горения имеет значение размещать лазерный источник и камеру в одном модуле, как это показано на рисунках 6.21, 6.22 (модуль *PI*). Смещение модуля *PI* вызывает увеличение области наблюдения и является причиной рассогласованности кривых на рисунке 6.28, *в*. Нами обнаружено, что чем больше диаметр области наблюдения, тем менее выражены экстремумы на временной зависимости коэффициента корреляции. С увеличением области наблюдения расхождение получаемых данных по отношению к данным, полученным с минимальной областью наблюдения, увеличивается (зависимость 2 на рисунке 6.30, *б*). Коэффициент корреляции уменьшается с 0,990 до 0,895, что свидетельствует о том, что временные параметры могут быть определены достаточно точно даже на максимальном расстоянии 5 м. Экспозиция камеры существенно влияет на результаты измерений при удаленном наблюдении. Худшие результаты были получены в условиях низкой экспозиции (зависимость 2 на рисунке 6.30, *а*). Поэтому, при наблюдении объектов на значительном расстоянии важно обеспечить визуальную нормальную яркость спекл-изображений.

6.5. Выводы по главе 6

1. Предложено применение метода корреляции лазерных спекл-изображений для изучения поверхности нанопорошков металлов во время горения. Разработана экспериментальная методика для определения количества и продолжительности стадий горения, а также скорости горения нанопорошков металлов.

Изменение лазерных спеклов происходит вследствие изменения отражательной способности поверхности образца нанопорошка металла, поэтому анализ лазерных спекл-изображений позволяет изучать поверхность горения, идентифицировать стадии горения и определять их временные параметры. Рассмотрены различные корреляционные формулы и оптимизированы параметры расчета коэффициента корреляции с целью получения минимальных искажений. Разработана методика обработки лазерных спекл-изображений и программы,

реализующие методику в среде Matlab, защищенные двумя свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ.

2. Разработана экспериментальная установка для исследования горения нанопорошков, сочетающая в себе три метода визуализации. Результаты мониторинга, основанного на методе лазерной спекл-корреляции, согласуются с результатами лазерного мониторинга и прямой визуализацией процесса горения. Результаты показывают, что метод корреляции лазерных спекл-изображений позволяет более точно определить начало первой и второй тепловых волн. В отличие от лазерного мониторинга и анализа интенсивности спекл-изображений, метод корреляции лазерных спекл-изображений обеспечивает регистрацию момента времени, когда поверхность только начинает двигаться под влиянием температуры. Комбинируя корреляционный анализ лазерных спеклов с анализом интенсивности тех же спекл-структур, обеспечивается более надежная характеристика временных свойств горения нанопорошков.

3. Продемонстрирована эффективность использования метода лазерной спекл-корреляции для дистанционного исследования изменений поверхности объекта, экранированной светящимся слоем. Полученные результаты контроля горения образцов нанопорошка алюминия и его смеси с нанопорошком железа, изготовленных в одинаковых условиях, с использованием метода корреляции лазерных спекл-изображений подтверждают флуктуационный характер горения, связанный с природой исходных нанопорошков. Колебания горения являются результатом интенсивного массообмена и образования внутри продуктов горения областей, различных по фазовому и химическому составу.

Поскольку спекл-изображения регистрируются не на поверхности образца, а в дальней зоне, предложенный метод позволяет устанавливать объектив и камеру на значительном удалении от высокотемпературного объекта. Показана возможность оценки временных параметров горения нанопорошка на расстоянии до 5 м.

4. При дистанционном исследовании процесса горения нанопорошка алюминия методом корреляции лазерных спекл-изображений увеличение области

наблюдения и уменьшение яркости спекл-структуры существенно влияют на результаты измерений. Использование двух камер и двух лазеров подсветки для записи лазерных спекл-изображений позволило исследовать влияние расстояния, на котором расположены лазер подсветки и камера, на результаты расчета коэффициента корреляции. Полученные в работе результаты позволят минимизировать неточности, возникающие при увеличении расстояния при разработке оборудования на основе предложенного метода для конкретных практических применений.

В качестве дальнейшего совершенствования системы оптического контроля на основе лазерной спекл-корреляции предлагаем использовать лазер подсветки с меньшей расходимостью излучения для увеличения дальности мониторинга.

5. Результаты работы демонстрируют эффективность использования метода корреляции лазерных спекл-изображений для дистанционного исследования изменений поверхности объекта, экранированного светящимся слоем. Простая аппаратная реализация делает данный метод потенциально востребованным для исследования различных высокотемпературных процессов. По сравнению с использованием лазерных мониторов, метод корреляции лазерных спекл-изображений для изучения горения нанопорошков металлов более удобен для полевых исследований и технологического контроля.

Заключение

В результате выполнения диссертационной работы разработаны методики и оборудование для исследования высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей на основе методов скоростной видеосъемки с применением лазерного монитора и лазерной подсветки. С использованием разработанной техники проведено исследование горения нанопорошков металлов, термитных смесей на основе нанопорошков металлов, смесей нано- и микропорошков металлов, модельной алюминизированной топливной смеси. Выявлены морфологические особенности изменения поверхности в процессе горения различных ВЭМ, установлена стадийность горения, определены временные параметры стадий горения и скорость протекания, установлены зависимости между процессами и наблюдаемыми изменениями поверхности.

Основные выводы по работе:

1. Методика визуализации с усилением яркости изображений позволяет оценить ряд объективных параметров при изучении закономерностей горения высокоэнергетических материалов, в том числе проводить сравнительный анализ различных процессов с временным разрешением до 0,8 мс и экспозицией 20–35 нс. При известных характерных изменениях интенсивности во время горения, возможно идентифицировать нанопорошок или смесь, а также определять соответствующие стадии горения и их параметры.

2. Применение быстродействующих фотодиодов дает возможность отображения и анализа интенсивности изображений лазерного монитора в режиме реального времени без компьютерной обработки. Полученные временные зависимости упрощают на практике анализ видеозаписей лазерных мониторов за счет выявления изменений оптических свойств наблюдаемых объектов непосредственно в процессе эксперимента.

3. Исследование изменения коэффициента отражения поверхности в сочетании с видеозаписями эволюции поверхности образцов во время горения нанопорошка дают более полную информацию о закономерностях горения.

4. Активные системы визуализации на основе лазерной подсветки и усиления яркости изображений регистрируют не испускаемое излучение горящего образца, а отраженное от поверхности зондирующее лазерное излучение. При этом уровень засветки, создаваемой горящим нанопорошком, в 10^4 – 10^5 раз меньше собственных шумов усилителя яркости и её влиянием на изображение лазерного монитора можно пренебречь.

5. Узкая спектральная линия атома меди ($\sim 0,2 \text{ см}^{-1}$), на которой происходит формирование изображения усилителя яркости на парах бромида меди, позволяет не только исключить влияние широкополосного излучения горящего образца, но и влияние излучения иницирующего лазера, обладающего высокой спектральной яркостью. Указанная особенность лазерного монитора дает возможность исследовать процесс лазерного инициирования в широком диапазоне длин волн иницирующего лазера (кроме линий усиления 510,6 и 578,2 нм).

6. Контрастность изображений поверхности нанопорошков металлов повышается при освещении поверхности материала в области наблюдения лазерного монитора излучением на длине волны 510,6 нм. Независимое освещение с помощью второго лазера на парах бромида меди позволяет увеличить экспозицию исследуемого объекта, что дает возможность изучения поверхности нанопорошков металлов, которые поглощают практически весь падающий свет и легко воспламеняются.

7. Неоднородность горения высокоэнергетических материалов возможно исследовать, используя два основных подхода на основе лазерного мониторинга. Первый подход заключается в одновременной визуализации поверхности в двух областях с использованием двух синхронизованных усилителей яркости и двух цифровых камер. Второй подход заключается в перемещении области наблюдения одного канала визуализации.

8. Использование лазерного мониторинга и лазерной подсветки в составе одной лабораторной установки позволяет более детально изучать процесс горения нанопорошков металлов. Лазерный мониторинг дает возможность подавления

широкополосной засветки и позволяет получить увеличенное изображение заданной области наблюдения с разрешением 5–25 мкм, в том числе перемещаемой. Лазерная подсветка дает возможность обзорной визуализации горения всего образца.

9. Лазерные спекл-изображения коррелируют с изменением поверхности нанопорошков металлов в процессе горения, что позволяет не только определять начало первой и второй волн горения, но и идентифицировать волну прогрева за счет высокой чувствительности к движению поверхности, в том числе под влиянием температуры. Сочетание корреляционного анализа лазерных спеклов с анализом интенсивности тех же спекл-структур дает более точную оценку временных характеристик горения нанопорошков металлов.

Перспективы использования разработанных методик и лабораторного оборудования: процессы высокотемпературного горения различных высокоэнергетических материалов на основе микро- и нанопорошков металлов, процессы лазерного интегрирования нанопорошков металлов в другие материалы, горение тонких слоев нанопорошков и термитных смесей, лазерная модификация поверхности, спекание порошков в аддитивных технологиях, лазерное инициирование высокоэнергетических материалов, дистанционный контроль горящих поверхностей, сжигание элементов, образующих металлоконструкции.

Список литературы

1. Лазеры на парах металлов и их галогенидов / под ред. Г.Г. Петраша. – М. : Наука, 1987. – (Труды ФИАН, Т. 181). – 193 с.
2. Солдатов А.Н. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов / А.Н. Солдатов, В.И. Соломонов. – Новосибирск : Наука, 1985. – 152 с.
3. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов / В.М. Батенин, В.В. Бучанов, М.А. Казарян, И.И. Климовский, Э.И. Молодых. – Москва : Научная книга, 1998. – 544 с.
4. Pulsed Metal Vapor Lasers : Proceeding of the NATO Advanced Research Workshop on Pulsed Metal Vapour Lasers – Physics and Emerging Applications in Industry, Medical and Science, St. Andrews (UK), Aug. 6–10, 1995 / Eds. C.E. Little, N.V. Sabotinov – Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. – 479 p.
5. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications / C.E. Little – Chichester, ENG : John Wiley & Sons Ltd, 1998. – 620 p.
6. Григорьянц А.Г. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения / А.Г. Григорьянц, М.А. Казарян, Н.А. Лябин. – Москва : Физматлит, 2005. – 312 с.
7. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2-х т. Т. 1 / В.М. Батенин, А.М. Бойченко, В.В. Бучанов, М.А. Казарян, И.И. Климовский, Э.И. Молодых. – Москва : Физматлит, 2009. – 544 с.
8. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т. 2 / В.М. Батенин, П.А. Бохан, В.В. Бучанов, Г.С. Евтушенко, М.А. Казарян, В.Т. Карпухин, И.И. Климовский, М.М. Маликов. – Москва : Физматлит, 2011. – 616 с.
9. Efficient pulsed gas discharge lasers / W.T. Walter, N. Solimene, M. Pilch, G. Gould // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1966. – Vol. 2, No 9. – P. 474–479.
10. Евтушенко Г.С. Лазеры на парах металлов с высокими частотами

следования импульсов / Г.С. Евтушенко, Д.В. Шиянов, Ф.А. Губарев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 276 с.

11. Губарев Ф.А. Лазеры на парах галогенидов металлов с накачкой емкостным разрядом / Ф.А. Губарев, Г.С. Евтушенко. – Saarbrücken (Germany) : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 180 с.

12. Демкин В.П. Эффективность лазера на парах меди / В.П. Демкин, А.Н. Солдатов, Н.А. Юдин // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6, № 6. – С. 659–665.

13. Солдатов А.Н. Эффективность лазера на парах меди с частичным разрядом накопительной емкости / А.Н. Солдатов, В.Ф. Федоров, Н.А. Юдин // Квантовая электроника. – 1994. – Т. 21, № 8. – С. 733–734.

14. Fowles G.R. High-gain laser transition in lead vapor / G.R. Fowles, W.T. Silfvast // Applied Physics Letters. – 1965. – Vol. 6, No 12. – P. 236–237.

15. Pulsed metal transition in manganese vapor / M. Piltch, W.T. Walter, N. Solimene, Jr. Bennet // Applied Physics Letters. – 1965. – Vol. 7, No 11. – P. 309–310.

16. Исаев А.А. Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью / А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // ЖЭТФ (письма). – 1972. – Т. 16. – С. 40–42.

17. Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера / Д.В. Шиянов, В.Б. Суханов, Г.С. Евтушенко, О.С. Андриенко // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 7. – С. 625–629.

18. Фогельсон Т.Б. Импульсные водородные тиратроны / Т.Б. Фогельсон, Л.Н. Бреусова, Л.Н. Вагин. – Москва : Сов. Радио, 1974. – 212 с.

19. ООО «Импульсные технологии». URL: <http://www.pulsetech.ru> (дата обращения: 16.02.2021).

20. Characteristics of pulsed discharges in copper bromide and copper HyBrID lasers / A.A. Isaev, D.R. Jones, C.E. Little, G.G. Petrash, C.G. Whyte, K.I. Zemskov // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1997. – Vol. 33, No 6. – P. 919–926.

21. Modelling the plasma kinetics in a kinetically enhanced copper vapor laser utilizing HC1+H2 admixture / R.J. Carman, R.P. Mildren, M.J. Withford, D.J.W. Brown,

J.A. Piper // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2000. – Vol. 36, No 4. – P. 438–449.

22. The influence of the initial density of metastable states and electron density on the pulse repetition rate in a copper vapor laser / A.M. Boichenko, G.S. Evtushenko, S.I. Yakovlenko, O.V. Zhdaneev // *Laser Physics*. – 2001. – Vol. 11, No 5. – P. 580–588.

23. Жданеев О.В. Моделирование процессов в лазерах на парах меди с модифицированной кинетикой : дисс. ... канд. физ.-мат. наук : специальность 01.04.05 «Оптика» / О.В. Жданеев ; Институт оптики атмосферы СО РАН – Томск, 2004. – 231 с.

24. Advances in copper laser technology: kinetic enhancement / M.J. Withford, D.J.W. Brown, R.P. Mildren, R.P. Carman, G.D. Marshall, J.A. Piper // *Progress in Quantum Electronics*. – 2004. – Vol. 28, No 3–4. – P. 165–196.

25. Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr лазера / Д.В. Шиянов, В.Б. Суханов, Г.С. Евтушенко, О.С. Андриенко // *Квантовая электроника*. – 2004. – Т. 34, № 7. – С. 625–629.

26. Astadjov D.N. Effect of hydrogen on CuBr laser power and efficiency / D.N. Astadjov, N.V. Sabotinov, N.K. Vuchkov // *Optics Communications*. – 1985. – Vol. 56, No 4. – P. 279–282.

27. Экспериментальные исследования влияния добавок водорода на частотные и энергетические характеристики CuBr лазера / Д.В. Шиянов, Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов, В.Д. Бочков, В.Н. Кудинов // *Известия ТПУ*. – 2004. – Т. 307, № 3. – С. 74–77.

28. Влияние добавки метана на характеристики лазера на парах бромида меди / Д.В. Шиянов, Ф.А. Губарев, Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов, О.С. Андриенко // *Оптика атмосферы и океана*. – 2009. – Т. 22, № 11. – С. 1047–1050.

29. Бохан П.А. Отпаянный лазер на парах меди / П.А. Бохан, В.Н. Николаев, В.И. Соломонов // *Квантовая электроника*. – 1975. – Т. 2, № 1. – С. 159–162.

30. Nerheim N. A continuously pulsed copper halide laser with a cable-capacitor Blumlein discharge circuit / N. Nerheim, A. Bhanji, G. Russell // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1978. – Vol. 14, No 9. – P. 686–693.

31. Исследование лазера на парах меди с большим ресурсом и улучшенными

параметрами импульса возбуждения / В.В. Зубов, Н.А. Лябин, В.И. Мишин, М.Л. Мучник, Г.Д. Паршин, Е.Я. Черняк, А.Д. Чурсин // Квантовая электроника. – 1983. – Т.10, № 9. – С. 1908–1910.

32. Елаев В.Ф. CuBr-лазер со средней мощностью генерации свыше 100 Вт / В.Ф. Елаев, Г.Д. Лях, В.П. Пеленков // Оптика атмосферы. – 1989. – Т. 2, № 11. – С. 1228–1229.

33. Исследование и разработка мощных лазеров на парах бромида меди с отпаянным активным элементом / В.И. Воронов, В.Ф. Елаев, А.И. Иванов, А.Е. Кирилов, Ю.П. Полуниин, А.Н. Солдатов, А.С. Шумейко // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6, № 6. – С.727–730.

34. Mildren R.P. A 100 W, near diffraction limited copper HyBrID laser oscillator / R.P. Mildren, D.R. Jones, D.J.W. Brown / Journal of Physics D: Applied Physics. – 1998. – Vol. 31. – P. 1812–1816.

35. Marshall G.D. Repetition rate scaling up to 100 kHz of a small-scale (50 W) kinetically enhanced copper vapor laser // G.D. Marshall, D.W. Coutts // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2000. – Vol. 6, No 4. – P. 623–628.

36. A 50-Watt copper bromide laser / N.V. Sabotinov, I.K. Kostadinov, H.W. Bergman, R. Salimbeni, J. Mizeraczyk // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4184. – P. 203–205.

37. Юдин Н.А. Влияние параметров коммутатора на эксплуатационные характеристики лазера на парах меди // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 9. – С. 815–819.

38. Особенности накачки лазера на парах меди и бромида меди / Г.С. Евтушенко, И.Д. Костыря, В.Б. Суханов, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шиянов // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 8. – С. 704–708.

39. Лябин Н.А. Отпаянные промышленные активные элементы лазеров на парах металлов мощностью от 1 до 50 Вт / Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин, М.С. Доманов // Известия вузов. Физика. – 1999. – Т. 44, № 8. – С. 67–73.

40. Лябин Н.А. Промышленные отпаянные лазеры на парах меди типа «Кристалл» с повышенным КПД и мощностью излучения // Оптика атмосферы и

океана. – 2000. – Т. 13, № 3. – С. 258–264.

41. Лепехин Н.М. Генератор наносекундных импульсов для возбуждения лазеров на парах меди / Н.М. Лепехин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов // Прикладная физика. – 2001. – № 5. – С. 46–49.

42. Иванов Е.В. Магнитотранзисторный генератор для питания лазера на парах меди / Е.В. Иванов, С.И. Мошкунов, В.Ю. Хомич // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 1. – С. 88–90.

43. Магнито-транзисторный источник питания лазера на парах меди / Ю.Г. Градобоев, Ю.М. Мокрушин, Р.И. Окунев, Л.П. Пахомов, А.Г. Петраков, А.Л. Степанянц // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 6. – С. 118–120.

44. A 280-W average power Cu-Ne-HBr laser amplifier / E. Le Guyadec, P. Coutance, G. Bertrand, C. Peltier // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1999. – Vol. 35, No 11. – P. 1616–1622.

45. High power copper vapour lasers driven by solid state power supplies / E. Le Guyadec, D. Chatroux, L. Garnier, F. Fourreau // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4184. – P. 195–198.

46. Nakhe S.V. Energy deposition studies in a copper vapour laser under different pulse excitation schemes / S.V. Nakhe, B.S. Rajanikanth, R. Bhatnagar // Measurement Science and Technology. – 2003. – Vol. 14, No 5. – P. 607–613.

47. Metal and metal halide vapor lasers: New opportunities // O.S. Andrienko, V.A. Dimaki, G.S. Evtushenko, V.B. Sukhanov, V.O. Troitskiy, D.V. Shiyanov // Optical Engineering. – 2005. – Vol. 44, No 7. – Art. No 071204.

48. A copper bromide vapor laser with computer control of the repetitive-pulse, train, and waiting operating modes / V.A. Dimaki, V.B. Sukhanov, V.O. Troitskii, A.G. Filonov, D.Yu. Shestakov // Instruments and Experimental Techniques. – 2008. – Vol. 51, No 6. – P. 890–893.

49. Influence of the voltage pulse front shortening on the pulse repetition rate in a copper vapour laser / P.A. Bokhan, P.P. Gugin, D.E. Zakrevskii, M.A. Lavrukhin, M.A. Kazaryan, N.A. Lyabin // Quantum Electronics. – 2013. – Vol. 43, No 8. – P. 715–719.

50. Troitsky V.O. A power supply for a copper bromide vapor laser / V.O. Troitsky,

V.A. Dimaki, A.G. Filonov // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2016. – Vol. 59, No 3. – P. 381–384.

51. Лазеры на парах бромида меди нового поколения / О.С. Андриенко, Ф.А. Губарев, В.А. Димаки, А.И. Иванов, М.Е. Левицкий, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий, В.Ф. Федоров, А.Г. Филонов, Д.В. Шиянов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2009. – Т. 22, № 10. – С. 999–1009.

52. Лазерный проекционный микроскоп / К.И. Земсков, А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // *Квантовая электроника*. – 1974. – Т. 1, № 1. – С. 14–15.

53. Liu C.S. Copper seperradiant emission from pulsed discharges in copper iodide vapor / C.S. Liu, E.W. Suvov, L.A. Weaver // *Applied Physics Letters*. – 1973. – Vol. 23, No 2. – P. 92–93.

54. Chen C.J. Double discharge copper vapor laser with copper chloride as a lasant / C.J. Chen, N.M. Nerheim, G.R. Russel // *Applied Physics Letters*. – 1973. – Vol. 23, No 9. – P. 514–515.

55. Генерация излучения на линиях CuI при использовании паров бромида меди / А.М. Шухтин, В.Г. Мишаков, Г.А. Федотов, А.А. Ганеев // *Оптика и спектроскопия*. – 1975. – Т. 39, Вып. 6. – С. 1186–1187.

56. Импульсная генерация на переходах атома меди в разряде в парах бромистой и хлористой меди / А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Ю. Леммерман, Г.Г. Петраш, А.Н. Трофимов // *Квантовая электроника*. – 1976. – Т. 3, № 8. – С. 1800–1802.

57. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов / Г.С. Евтушенко, М.А. Казарян, С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб, Д.В. Шиянов – Томск : STT, 2016. – 246 с.

58. Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes / Ed. G.S. Evtushenko. – New York, USA : Nova Science Publishers, 2018. – 236 p.

59. Оптические системы с усилителями яркости / Г.А. Пасманик, К.И. Земсков, М.А. Казарян и др. – Горький : ИПН АФ СССР, 1988. – 173 с.

60. Петраш Г.Г. Оптические системы с усилителями яркости / Г.Г. Петраш. –

Москва : Наука, 1991. – 152 с.

61. Казарян М.А. Оптические системы с усилителями яркости изображений: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук : специальность 01.04.03 «Радиофизика, включая квантовую радиофизику» / М.А. Казарян ; Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР. – Москва, 1987. – 391 с.

62. Исследование основных характеристик лазерного проекционного микроскопа / К.И. Земсков, А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // Квантовая электроника. – 1976. – Т. 3, № 1. – С. 35–43.

63. Визуализация усиленных ИК-изображений при нелинейном взаимодействии пучков в насыщающихся усилителях / К.И. Земсков, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // Письма в ЖЭТФ. – 1985. – Т. 42, № 6. – С. 260–263.

64. Инфракрасный лазерный проекционный микроскоп / Э.Я. Арапова, А.А. Исаев, М.А. Казарян, С.В. Маркова, Г.Г. Петраш, Ю.П. Тимофеев, С.А. Фридман // Квантовая электроника. – 1975. – Т. 2, № 7. – С. 1568–1570.

65. Лазерный проекционный микроскоп с усилителем на парах бария и люминесцентными экранами для визуализации ИК изображения / К.И. Земсков, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш, В.Н. Сморгачев, Ю.П. Тимофеев, С.А. Фридман // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7, № 11. – С. 2454–2459.

66. Kazaryan M.A. Gold vapour brightness amplifier / M.A. Kazaryan, G.G. Petrash, K.I. Zemskov // Optics Communications. – 1980. – V. 33, No 2. – P. 209–212.

67. Проекционная система с усилителем яркости на парах хлорида меди / К.И. Земсков, М.А. Казарян, Т.И. Пехошкина, А.Н. Трофимов // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6, № 2. – С. 391–394.

68. Активные оптические системы с усилителем на парах бромида меди / Д.Н. Астаджов, Н.К. Вучков, К.И. Земсков, А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш, Н.В. Саботинов // Квантовая электроника. – 1988. – Т. 15, № 4. – С. 716–719.

69. Лазерный проекционный микроскоп в проходящем свете / К.И. Земсков, М.А. Казарян, В.В. Савранский, Г.А. Шафеев // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6, № 11. – С. 2473–2475.

70. Проекционная система с усилителем яркости для целей биологии и

медицины / Ф.В. Бункин, К.И. Земсков, М.А. Казарян и др. // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 243, № 6. – С. 1568–1570.

71. Скоростная покадровая регистрация изображений биологических объектов с использованием лазерного проекционного микроскопа / Е.А. Морозова, А.М. Прохоров, В.В. Савранский, Г.А. Шафеев // Доклады АН СССР. – 1981. – Т. 261, № 6. – С. 1460–1462.

72. О диапазоне периодов колебаний микроструктур живой клетки / С.Л. Загускин, А.А. Никитенко, Ю.А. Овчинников и др. // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 277, № 6. – С. 1468–1471.

73. Калугин М.М. Исследование усиления активных сред / М.М. Калугин, Е.Н. Кузьминова, С.Е. Потапов // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8, № 5. – С. 1085–1089.

74. Контраст изображений в лазерном проекционном микроскопе / К.И. Земсков, М.А. Казарян, В.М. Матвеев, Г.Г. Петраш // Квантовая электроника. – 1983. – Т. 10, № 2. – С. 336–341.

75. Об искажении изображений в квантовых усилителях / М.А. Васильева, М.А. Казарян, Т.И. Кузнецова, Г.Г. Петраш // Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5, № 4. – С. 666–669.

76. Кузнецова Т.И. Распространение светового сигнала с псевдослучайной пространственной модуляцией через усиливающую среду // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7, № 6. – С. 1257–1263.

77. Кузнецова Т.И. Взаимодействие пространственно-модулированной волны сложной структуры с плоской волной в квантовом усилителе / Т.И. Кузнецова, Д.Ю. Кузнецов // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8, № 8. – С. 1808–1815.

78. Саморегуляция мощности и образование негативного изображения в освещающем пучке лазерного проекционного микроскопа / Ф.В. Бункин, К.И. Земсков, М.А. Казарян, В.М. Матвеев, Г.Г. Петраш, В.В. Савранский, Г.А. Шафеев // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8, № 6. – С. 1372–1373.

79. Частотно-энергетические и усилительные характеристики CuCl-лазера с внутренним реактором / Д.В. Шиянов, М.В. Тригуб, В.Б. Суханов, Г.С. Евтушенко,

В.В. Власов // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 4. – С. 93–96.

80. Тригуб М.В. Усилительные характеристики активного элемента лазера на парах хлорида меди с внутренним реактором / М.В. Тригуб, Д.В. Шиянов, Г.С. Евтушенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 10. – С. 46–50.

81. Усилитель яркости на переходах атома марганца с частотой следования импульсов до 100 кГц / М.В. Тригуб, Д.В. Шиянов, В.Б. Суханов, Т.Д. Петухов, Г.С. Евтушенко // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44, Вып. 24. – С. 135–142.

82. Лазер на парах бромида железа / В.Б. Суханов, Д.В. Шиянов, М.В. Тригуб, В.А. Димаки, Г.С. Евтушенко // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, № 6. – С. 84–90.

83. Sukhanov V.B. A multiwave CuBr and PbBr₂ laser with a sectioned active volume / V.B. Sukhanov, A.G. Filonov, D.V. Shiyanov // Optics Communications. – 2010. – Т. 283, No 19. – С. 3732–3735.

84. Лазер на парах иодида меди с внутренним реактором / Д.В. Шиянов, В.Б. Суханов, Г.С. Евтушенко, Н.Ю. Ткаченко // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 8. – С. 721–726.

85. Исследование характеристик негативных изображений в оптических системах с усилителями яркости на парах меди / К.И. Земсков, М.А. Казарян, В.М. Матвеев, Г.Г. Петраш // Квантовая электроника. – 1983. – Т. 10, № 11. – С. 1085–1089.

86. Исследование усиления в активных средах на переходах атомов меди и марганца применительно к созданию проекционных систем с усилением яркости изображений / В.К. Исаков, М.М. Калугин, Е.Н. Парфенова, С.Е. Потапов // Журнал технической физики. – 1983. – Т. 53, Вып. 4. – С. 704–714.

87. Лазерное разделение изотопов в атомарных парах / П.А. Бохан, В.В. Бучанов, Д.Э. Закревский, М.А. Казарян, М.М. Калугин, А.М. Прохоров, Н.В. Фатеев. – Москва : Физматлит, 2004. – 208 с.

88. Grigor'yants A.G. Laser precision microprocessing of materials / A.G. Grigor'yants, M.A. Kazaryan, N.A. Lyabin. – USA : CRC Press, 2019. – 438 p.

89. High-power, high-pressure, discharge-heated copper vapor laser / I. Smilanski, G. Erez, A. Kerman, L.A. Levin // Optics Communications. – 1979. – Vol. 30, No 1. –

P. 70–74.

90. Coutts D.W. Double-pass copper vapor laser master-oscillator power-amplifier systems: generation of flat-top focused beams for fiber coupling and percussion drilling // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2002. – Vol. 38, No 9. – P. 1217–1224.

91. Programmable control of the pulse repetition rate in the multiwave strontium vapor laser system / A. Soldatov, A. Vasilieva, I. Kostadinov, Y. Loeva, Y. Polunin, N. Sabotinov, A. Schumeiko // *MATEC Web of Conferences*. – 2016. – Vol. 79. – Art. no 01017.

92. High-power metal halide vapour lasers oscillating in deep ultraviolet, visible and middle infrared spectral ranges / K.A. Temelkov, S.I. Slaveeva, V.I. Kirilov, I.K. Kostadinov, N.K. Vuchkov // *Physica Scripta*. – 2012. – Vol. 149. – Art. no 014015,.

93. High-brightness CuBr MOPA laser with diffraction-limited throughout-pulse emission / D.N. Astadjov, L.I. Stoychev, S.K. Dixit, S.V. Nakhe, N.V. Sabotinov // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2005. – Vol. 41, No 8. – P. 1097–1101.

94. Astadjov D. M2 of MOPA CuBr laser radiation / D. Astadjov, L. Stoychev, N. Sabotinov // *Optical and Quantum Electronics*. – 2007. – Vol. 39, No 7. – P. 603–610.

95. High-beam quality, high-power copper HyBrID laser injection-seeded oscillator system / D. J.W. Brown, C.G. Whyte, D.R. Jones, C.E. Little // *Optics Communications*. – 1997. – Vol. 137, No 1–3. – P. 158–164.

96. Advances in copper laser technology: kinetic enhancement / M.J. Withford, D.J.W. Brown, R.P. Mildren, R.J. Carman, G.D. Marshall, J.A. Piper // *Progress in Quantum Electronics*. – 2004. – Vol. 28. – P. 165–196.

97. Development of copper bromide laser master oscillator power amplifier system / G.N. Tiwari, R.K. Mishra, R. Khare, S.V. Nakhe // *Pramana – Journal of Physics*. – 2014. – Vol. 82, No 2. – P. 217–225.

98. Система генератор–усилитель на парах стронция для абляции костных тканей / А.Н. Солдатов, Ю.П. Полуин, А.В. Васильева, И.Д. Костыря, Д.А. Куксгаузен // *Биотехносфера*. – 2012. – № 3–4 (21–22). – С. 47–51.

99. Лазерная система «генератор–усилитель» на парах стронция со средней мощностью более 20 Вт / А.Н. Солдатов, А.Г. Филонов, Ю.П. Полуин, А.В.

Васильева // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 8. – С. 666–668.

100. Лазерная обработка объектов с одновременным визуальным контролем в системе генератор–усилитель на парах меди / К.И. Земсков, М.А. Казарян, В.М. Матвеев, Г.Г. Петраш, М.П. Самсонова, А.С. Скрипниченко // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11, № 2. – С. 418–420.

101. Батенин В.М. Исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения / В.М. Батенин, И.И. Климовский, Л.А. Селезнева // Доклады Академии наук. – 1988. – Т. 303, № 4. – С. 857–860.

102. Абросимов Г.В. Использование лазерной среды для фотографирования поверхности, закрытой слоем плазмы / Г.В. Абросимов, М.М. Польский, В.Б. Саенко // Квантовая электроника. – 1988. – Т. 15, № 4. – С. 850–851.

103. Применение оптических систем с усилителями яркости для исследования поверхностей электродов из графита и пирографита во время горения дуги / В.М. Батенин, В.Ю. Глина, И.И. Климовский, Л.А. Селезнева // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29, № 6. – С. 1204–1210.

104. Визуализация процесса сварки оптических волокон при помощи лазерного усилителя яркости / Л.В. Абрамов, А.Ф. Галкин, И.И. Климовский, В.Г. Прокошев, С.Ф. Трубицын, С.М. Аракелян // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22, Вып. 17. – С. 6–10.

105. Визуализация процессов лазерной обработки материалов при помощи усилителя яркости на основе лазера на парах меди / В.Г. Прокошев, И.И. Климовский, А.Ф. Галкин, Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян // Известия Академии наук. Серия физическая. – 1997. – Т. 61, № 8. – С. 1560–1564.

106. Динамические процессы при лазерном упрочнении покрытий из хрома / В.И. Денисенко, В.Г. Прокошев, Д.В. Абрамов, А.Ф. Галкин, И.И. Климовский, С.М. Аракелян // Теплофизика высоких температур. – 1998. – Т. 36, № 4. – С. 674–684.

107. Нестационарные лазерные термохимические процессы на поверхности металлов и их визуализация при помощи лазерного усилителя яркости / В.Г. Прокошев, А.Ф. Галкин, И.И. Климовский, С.Ю. Данилов, Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25, № 4. – С. 337–340.

108. Гидродинамические неустойчивости и волны, индуцированные импульсно-периодическим лазерным излучением на поверхности вещества / В.Г. Прокошев, Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, И.И. Климовский, А.О. Кучерик // Известия РАН. Серия физическая. – 2006. – Т. 70, № 3. – С. 354–360.

109. Лазерная диагностика эволюции поверхности углерода под воздействием мощных лазерных импульсов / Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, А.Ф. Галкин, И.И. Климовский, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 2. – С. 137–143.

110. Визуализация и восстановление рельефа области лазерного воздействия на поверхность графита / Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, И.И. Климовский, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев // Известия РАН. Серия физическая. – 2006. – Т. 70, № 3. – С. 422–425.

111. Плавление углерода, нагреваемого сконцентрированным лазерным излучением в воздухе при атмосферном давлении и температуре, не превышающей 4000 К / Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, А.Ф. Галкин, Л.Д. Квачева и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84, Вып. 5. – С. 315–319.

112. О возможности исследования временной эволюции рельефа поверхностей, подвергающихся воздействию мощных потоков энергии, непосредственно во время воздействия / Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, А.Ф. Галкин, И.И. Климовский, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев // Квантовая электроника. – 2006. – Vol. 36, № 6. – С. 569–575.

113. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло- и пироуглерода / Д.В. Абрамов, А.Ф. Галкин, С.В. Жарёнова, И.И. Климовский, В.Г. Прокошев, Е.Л. Шаманская // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 2. – С. 97–101.

114. Specific features of the welding of metals by radiation of high-power fiber laser / V.M. Yermachenko, A.P. Kuznetsov, V.N. Petrovskiy, N.M. Prokopova, A.P. Strel'tsov, S.A. Uspenskiy // Laser Physics. – 2011. – Vol. 21, No 8. – P. 1530–1537.

115. Наблюдение образования оплава углерода на поверхности пирографитового катода во время горения угольной дуги атмосферного давления /

Э.И. Асиновский, В.М. Батенин, И.И. Климовский, В.В. Марковец // Доклады Академии Наук. – 1999. – Т. 369, № 5. – С. 614–616.

116. Исследования областей замыкания тока на электродах слаботочной угольной дуги атмосферного давления с помощью лазерного монитора / Э.И. Асиновский, В.М. Батенин, И.И. Климовский, В.В. Марковой // Теплофизика высоких температур. – 2001. – Т. 39, № 5. – С. 794–809.

117. Observation of objects under intense plasma background illumination / R.O. Buzhinsky, V.V. Savransky, K.I. Zemskov, A.A. Isaev, O.I. Buzhinsky // Plasma Physics Reports. – 2010. – Vol. 36, No 13. – P. 1269–1271.

118. Зинченко С.П. О накоплении продуктов распыления сегнетоэлектрической мишени в плазме тлеющего высокочастотного разряда / С.П. Зинченко, Г.Н. Толмачёв // Прикладная физика. – 2012. – № 5. – С. 53–56.

119. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди / А.П. Кузнецов, Р.О. Бужинский, К.Л. Губский, А.С. Савёлов. С.А. Саранцев, А.Н. Терёхин // Физика плазмы. – 2010. – Т. 36, № 4. – С. 1–10.

120. Videoscope on the basis of copper vapor laser for spatially-temporal diagnostics of tokamak discharge chamber internal components / O.I. Buzhinskij, V.G. Otroshchenko, A.A. Slivitsky, I.A. Slivitskaya // Plasma Devices and Operations. – 2003. – Vol. 11, No 3. – С. 155–160.

121. Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER / O.I. Buzhinskij, N.N. Vasiliev, A.I. Moshkunov, I.A. Slivitskaya, A.A. Slivitsky // Fusion Engineering and Design. – 2002. – Vol. 60, No 2. – P. 141–155.

122. Шиянов Д.В. Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов: дисс. ... канд. физ.-мат. наук : специальность 01.04.05 «Оптика» / Д.В. Шиянов ; ИОА СО РАН. – Томск, 2007. – 125 с.

123. Филонов А.Г. Влияние температурных неоднородностей на характеристики излучения в лазерах на парах металлов в режиме саморазогрева: дисс. ... канд. физ.-мат. наук : специальность 01.04.05 «Оптика» / А.Г. Филонов ; Томский государственный университет. – Томск, 2002. – 145 с.

124. Губарев Ф.А. Лазер на парах галогенидов металлов с накачкой емкостным разрядом: дисс. ... канд. физ.-мат. наук : специальность 01.04.05 «Оптика» / Ф.А. Губарев ; ИОА СО РАН. – Томск, 2008. – 161 с.

125. Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах металлов в условиях засветки / Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губарев, В.Б. Суханов, Д.В. Шиянов, С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, №4. – С. 141–146.

126. Лазерный проекционный микроскоп с покадровой регистрацией изображения / Г.С. Евтушенко, М.В. Тригуб, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 4. – С. 154–158.

127. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображения / М.В. Тригуб, Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев // Контроль. Диагностика. – 2011. – Специальный выпуск. – С. 140–143.

128. Визуализация процесса СВС с использованием активных сред CuBr-лазеров / М.В. Тригуб, Г.С. Евтушенко, А.И. Кирдяшкин, В.Д. Китлер, Р.А. Юсупов, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев, Д.В. Шиянов // Ползуновский Вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 181–184.

129. Макет лазерного монитора на основе активной среды CuBr-лазера для контроля и диагностики / Г.С. Евтушенко, М.В. Тригуб, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев, Д.В. Шиянов // Контроль. Диагностика. – 2013 – № 13. – С. 42–45.

130. High-speed process visualization using metal vapor brightness amplifiers / F.A. Gubarev, G.S. Evtushenko, M.V. Trigub, D.V. Shiyarov, S.N. Torgaev // 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014). – Prague, 2014. – P. 1–8.

131. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting / G.S. Evtushenko, M.V. Trigub, F.A. Gubarev, T.G. Evtushenko, S.N. Torgaev, D.V. Shiyarov // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Vol. 85. – Art. No 033111.

132. Пат. 2463634 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Лазерный проекционный микроскоп (варианты) : № 2011120852/28; заявл. 24.05.11; опубл.

10.10.2012 / Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. – 2 с.

133. Пат. 126852 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Лазерный проекционный микроскоп : № 2012145585/28; заявл. 25.10.12; опубл. 10.04.13 / Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. – 2 с.

134. Алгоритм расчета схемы активной оптической системы с усилителем яркости / М.В. Тригуб, Н.А. Агапов, Ф.А. Губарев, Г.С. Евтушенко // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 55, № 5. – С. 92–95.

A computational algorithm for designing an active optical system with an image intensifier / M.V. Trigub, N.A. Agapov, F.A. Gubarev, G.S. Evtushenko // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 56, No 5. – P. 588–591. [перевод]

135. Особенности коронного разряда в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения / Д.В. Рыбка, М.В. Тригуб, Д.А. Сорокин, Г.С. Евтушенко, В.Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 04. – С. 306–310.

136. Визуализация газодинамических процессов при импульсно-периодическом разряде, инициируемом убегающими электронами, в воздухе атмосферного давления с помощью лазерного монитора / Д.В. Белоплов, М.В. Тригуб, В.Ф. Тарасенко, Г.С. Евтушенко, М.И. Ломаев // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 02. – С. 157–161.

137. Эволюция лазерного факела в процессе получения нанопорошка с использованием волоконного иттербиевого лазера / В.В. Осипов, Г.С. Евтушенко, В.В. Лисенков, В.В. Платонов, А.В. Подкин, Е.В. Тихонов, М.В. Тригуб, К.В. Федоров // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 9. – С. 821–828.

138. Laser monitors for high speed imaging of materials modification and production / M.V. Trigub, V.V. Platonov, G.S. Evtushenko, V.V. Osipov, T.G. Evtushenko // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 486–490.

139. Laser monitor for imaging single crystal diamond growth in H₂-CH₄ microwave plasma / G. Evtushenko, S. Torgaev, M. Trigub, D. Shiyanov, E. Bushuev, A. Bolshakov, K. Zemskov, V. Savransky, V. Ralchenko, V. Konov // Optics and Laser Technology. – 2019. – Vol. 120. – Art. No 105716.

140. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике : учеб. руководство / Карлов Н.В. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 336 с.
141. Бистатический лазерный монитор / М.В. Тригуб, С.Н. Торгаев, Г.С. Евтушенко, В.О. Троицкий, Д.В. Шиянов // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, Вып. 12. – С. 51–56.
142. Васнев Н.А. Особенности работы усилителя яркости на парах бромида меди в схеме бистатического лазерного монитора / Н.А. Васнев, М.В. Тригуб, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32, № 3. – С. 247–253.
143. Vasnev N.A. Imaging by means of the bistatic laser monitor / N.A. Vasnev, M.V. Trigub, G.S. Evtushenko // Proceedings of SPIE. – 2019. – Art. No 1132209.
144. Trigub M.V. Bistatic laser monitor for imaging objects and processes / M.V. Trigub, N.A. Vasnev, G.S. Evtushenko // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2020. – Vol. 126. – Art. No 33.
145. Применение бистатического лазерного монитора для высокоскоростной визуализации процессов горения / М.В. Тригуб, Н.А. Васнев, В.Д. Китлер, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33, № 12. – С. 962–966.
146. Goodman J.W. Speckle phenomena in optics: Theory and applications / J.W. Goodman. – Englewood, USA : Roberts and Company Publishers, 2007. – 387 p.
147. Peiponen K.E. Optical measurement techniques: Innovations for industry and the life sciences. (Springer Series in Optical Sciences, vol. 136) / K.E. Peiponen, R. Myllylä, A.V. Priezhev. – Berlin : Springer, 2009. – 158 p.
148. Sirohi R.S. Optical methods of measurement: Wholefield techniques. – 2nd ed. – Boca Raton, FL : CRC Press, 2009. – 290 p.
149. Когерентно-оптические методы в измерительной технике и биофотонике / под ред. В.П. Рябухо, В.В. Тучина. – Саратов : Сателлит, 2009. – 127 с.
150. Rastogi P.K. Digital optical measurement: Techniques and applications. – Norwood, MA : Artech House Publishers, 2015. – 488 p.
151. Hild F. Digital image correlation: From displacement measurement to identification of elastic properties – a review / F. Hild, S. Roux // Strain. – 2006. – Vol.

42, No 2. – P. 69-80.

152. Fricke-Begemann T. Measurement of random processes at rough surfaces with digital speckle correlation / T. Fricke-Begemann, K.D. Hinsch // Journal of Optical Society of America A. – 2004. – Vol. 21, No 2. – P. 252–262.

153. Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern / Z. Zalevsky, Y. Beiderman, I. Margalit, S. Gingold, M. Teicher, V. Mico, J. Garcia // Optics Express. – 2009. – Vol. 17, No 24. – P. 21566–21580.

154. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Физматлит, 2010. – 488 с.

155. Postnov D.D. Estimation of vessel diameter and blood flow dynamics from laser speckle images / D.D. Postnov, V.V. Tuchin, O. Sosnovtseva // Biomedical Optics Express. – 2016. – Vol. 7, No 7. – P. 1–10.

156. Evaluation of handwriting peculiarities utilizing laser speckle contrast imaging / Y. Kuznetsov, A. Sdobnov, I. Meglinski, A. Harmelin, V. Kalchenko // Laser Physics Letters. – 2019. – Vol. 16, No 11. – Art. No 115601.

157. Label free *in vivo* laser speckle imaging of blood and lymph vessels / V. Kalchenko, Y. Kuznetsov, I. Meglinski, A. Harmelin // Journal of Biomedical Optics. – 2012. – Vol. 17, No 5. – P. 050502-1–050502-3.

158. Спекл-корреляционный анализ микрокапиллярного кровотока ногтевого ложа / М.А. Виленский, Д.Н. Агафонов, Д.А. Зимняков, В.В. Тучин, Р.А. Здражевский // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 4. – С. 324–328.

159. Boas D.A. Laser speckle contrast imaging in biomedical optics / D.A. Boas, A.K. Dunn // Journal of Biomedical Optics. – 2010. – Vol. 15, No 1. – P. 011109-1–011109-12.

160. Dynamic mechanical response of damaged alumina AD995 / B.M.L. Koch, C. Lo, H.Y. Li, T. Sano, J. Ligda, J.D. Hogan // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41, No 3. – P. 2034–2048.

161. Panin S.V. Effect of the mesh size of the vector displacement field on the strain estimate in the digital image correlation method / S.V. Panin, V.V. Titkov, P.S. Lyubutin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2017. – Vol. 58, No 3. – P. 425–

434.

162. Applying digital image correlation technique for studying the growth of a fatigue crack in VT23 titanium alloy welded joints / A.V. Eremin, A.S. Smirnova, S.V. Panin, Y.I. Pochivalov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, No 5. – P. 384–392.

163. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов / П.С. Любутин, С.В. Панин, В.В. Титков, А.В. Еремин, Р. Сундер // Вестник Пермского национального исследовательского Политехнического университета. – 2019. – № 1. – С. 88–109.

164. Chen B. High-precision video extensometer based on a simple dual field-of-view telecentric imaging system / B. Chen, W.P. Chen, B. Pan // Measurement. – 2020. – Vol. 166. – Art. No 108209.

165. High-temperature strain field measurement using digital image correlation / B.M.B. Grant, H.J. Stone, P.J. Withers, M. Preuss // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2009. – Vol. 44, No 4. – P. 263–271.

166. An error elimination method for high-temperature digital image correlation using color speckle and camera / S. Bao, Y. Wang, L. Liu, Y. Lu, P. Yan // Optics and Lasers in Engineering. – 2019. – Vol. 116. – P. 47–54.

167. Yang X. A real time deformation evaluation method for surface and interface of thermal barrier coatings during 1100 °C thermal shock / X. Yang, Z. Liu, H. Xie // Measurement Science and Technology. – 2012. – Vol. 23. – Art. No 105604.

168. Vibration measurement by means of digital speckle correlation / L. Li, F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii, A.I. Bloshkina // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications. (SIBCON). – Omsk, 2016. – Art. No 7491753.

169. Investigation of extracting information from vibrating objects by digital speckle correlation / A.I. Bloshkina, L. Li, F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk, 2016. – P. 637–641.

170. Speckle pattern processing by digital image correlation / F. Gubarev, L. Li,

M. Klenovskii, A. Glotov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 48. – Art no. 04003.

171. Li L. The influence of the radiation source parameters on the accuracy of digital speckle correlation method / L. Li, F. Gubarev // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – Art no. 01053.

172. Li L. Liquid transparency changing dynamics estimation by means of digital speckle correlation / L. Li, A.I. Bloshkina, F.A. Gubarev // 2017 Progress in electromagnetics research symposium – spring (PIERS). – St Petersburg, 2017. – P. 3172–3175.

173. Оценка свертываемости плазмы крови методом корреляции лазерных спекл-изображений / Л. Ли, Ю.Д. Сытник, Ф.А. Губарев, Я.С. Пеккер // Медицинская техника. – 2018. – Т. 52, № 3. – С. 23–25.

Evaluation of blood plasma coagulability by laser speckle correlation / L. Li, I.D. Sytnik, F.A. Gubarev, Y.S. Pekker // Biomedical Engineering. – 2018. – Vol. 52, No 3. – С. 177–180. [перевод]

174. Sytnik I.D. A prototype of optical blood coagulometer / I.D. Sytnik, L. Li, F.A. Gubarev // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk, 2019. – P. 593–596.

175. Определение времени коагуляции цельной крови методом корреляции лазерных спекл-изображений / Ю.Д. Люшневская, Ф.А. Губарев, Л. Ли, А.В. Носарев, В.С. Гусакова // Медицинская техника. – 2020. – № 4. – С. 25–28.

Measurement of whole blood coagulation time by laser speckle pattern correlation / Yu.D. Liushnevskaya, F.A. Gubarev, L. Li, A.V. Nosarev, V.S. Gusakova // Biomedical Engineering. – 2020. – Vol. 54, No 4. – P. 262–266. [перевод]

176. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018610433 Российская Федерация, Оценка времени свертывания крови методом анализа цифровых спекл-изображений – № 2017661573; заявил. 13.11.17; опубл. 11.01.18 / Ли Л., Губарев Ф.А.

177. Alumina–zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting / I. Shishkovsky, I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov // Applied Surface Science. – 2007.

– Vol. 254, No 4. – P. 966–970.

178. Efficient laser synthesis of single-walled carbon nanotubes through laser heating of the condensing vaporization plume / C.T. Kingston, Z.J. Jakubek, S. Dénommée, B. Simard // *Carbon*. – 2004. – Vol. 42. – P. 1657–1664.

179. Morales A.M. A laser ablation method for the synthesis of crystalline semiconductor nanowires / A.M. Morales, C.M. Lieber // *Science*. – 1998. – Vol. 279, No 5348. – P. 208–211.

180. Electron-beam induced synthesis of nanostructures: a review / I.G. Gonzalez-Martinez, A. Bachmatiuk, V. Bezugly, J. Kunstmann, T. Gemming, Z. Liu, G. Cuniberti, M.H. Rummeli // *Nanoscale*. – 2016. – No 8. – P. 11340–11362.

181. Carbon nitride films synthesized by combined ion-beam and laser-ablation processing / Z.M. Ren, Y.Ch. Du, Y. Qiu, J.D. Wu, Zh.F. Ying, X.X. Xiong, F.M. Li // *Physical Review B*. – 1995. – Vol. 51, No 8. – P. 5274–5277.

182. High-temperature ion beam synthesis of cubic SiC / P. Martin, B. Daudin, M. Dupuy, A. Ermolieff, M. Olivier, A.M. Papon, G. Rolland // *Journal of Applied Physics*. – 1990. – Vol. 67, No 6. – P. 2908–2912.

183. Dhara S. Formation, dynamics, and characterization of nanostructures by ion beam irradiation // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2007. – Vol. 32. – P. 1–50.

184. Self-organized ion-beam synthesis of nanowires with broadband plasmonic functionality / A. Toma, D. Chiappe, C. Boragno, F. Buatier de Mongeot // *Physical Review B*. – 2010. – Vol. 81. – Art. No 165436.

185. Direct ion beam synthesis of II–VI nanocrystals / U.V. Desnica, M. Buljan, I.D. Desnica-Frankovic, P. Dubcek, S. Bernstorff, M. Ivanda, H. Zorc // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2004. – Vol. 216. – P. 407–413.

186. Synthesis of magnetic nanoparticles (Fe and FePt) by plasma-induced cathodic discharge electrolysis / M. Tokushige, T. Yamanaka, A. Matsuura, T. Nishikiori, Y. Ito // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2009. – Vol. 37, No 7. – P. 1156–1160.

187. Plasma-induced synthesis of CuO nanofibers and ZnO nanoflowers in water /

X. Hu, X. Zhang, X. Shen, H. Li, O. Takai, N. Saito // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 2014. – Vol. 34. – P. 1129–1139.

188. Chen Q. A review of plasma–liquid interactions for nanomaterial synthesis / Q. Chen, J. Li, Y. Li // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2015. – Vol. 48. – Art. No 424005.

189. Development of a novel combustion synthesis method for synthesizing of ceramic oxide powders / C.C. Hwang, T.Y. Wu, J. Wan, J.S. Tsai // *Mater. Sci. Eng. B*. – 2004. – Vol. 111, No 1. – P. 49–56.

190. Aruna S.T. Combustion synthesis and nanomaterials / S.T. Aruna, A.S. Mukasyan // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2008. – Vol. 12, No 3–4. – P. 44–50.

191. Subrahmanyam J. Self-propagating high-temperature synthesis / J. Subrahmanyam, M. Vijayakumar // *Journal of Materials Science*. – 1992. – Vol. 27. – P. 6249–6273.

192. Mossino P. Some aspects in self-propagating high-temperature synthesis / P. Mossino // *Ceramics International*. – 2004. – Vol. 30, No 3. – P. 311–332.

193. Kharatyan S.L. Coupled SHS Reactions as a useful tool for synthesis of materials: an overview / S.L. Kharatyan, A.G. Merzhanov // *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. – 2012. – Vol. 21. – P. 59–73.

194. Puszynski J.A. Densification of aluminum nitride-based ceramic materials synthesized by combustion of aluminum in air / J.A. Puszynski, S. Majorowski, V. Hlavacek // *Chemical Engineering Communications*. – 1996. – Vol. 152–153, No 1. – P. 75–85.

195. Gromov A. Study of aluminum nitride formation by superfine aluminum powder combustion in air / A. Gromov, V. Vereshchagin // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2004. – Vol. 24, No 9. – P. 2879–2884.

196. Highly crystalline AlN particles synthesized by SHS method / R. Fu, K. Chen, X. Xu, J.M.F. Ferreira // *Materials Letters*. – 2005. – Vol. 59, No 19–20. – P. 2605–2609.

197. Properties of AlN powder synthesized by self-propagating high temperature synthesis process / J.H. Pee, J.Ch. Park, K.T. Hwang, S.R. Kim, W.S. Cho // *Key*

Engineering Materials. – 2010. – Vol. 434–435. – P. 834–837.

198. SEM-EDX study of the crystal structure of the condensed combustion products of the aluminum nanopowder burned in air under the different pressures / E.M. Popenko, A.A. Gromov, Y.I. Pautova, E.A. Chaplina, H.J. Ritzhaupt-Kleissl // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, No 8. – P. 3641–3644.

199. Chung S.L. Combustion synthesis of aluminum nitride: a review / S.L. Chung, C.H. Lai // *Key Engineering Materials*. – 2012. – Vol. 521. – P. 101–111.

200. Zakorzhevskii V.V. Combustion synthesis of submicron AlN particles / V.V. Zakorzhevskii, I.P. Borovinskaya // *Inorganic Materials*. – 2015. – Vol. 51. – P. 566–571.

201. High-thermal-conductivity aluminum nitride ceramics: the effect of thermodynamic, kinetic, and microstructural factors / T.B. Jackson, A.V. Virkar, K.L. More, R.B. Dinwiddie, R.A. Cutler // *Journal of American Ceramic Society*. – 1997. – Vol. 80, No 6. – P. 1421–1435.

202. Factors which affect the morphology of AlN particles made by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) / R. Fu, K. Chen, S. Agathopoulos, J.M.F. Ferreira // *Journal of Crystal Growth*. – 2006. – Vol. 296, No 1. – P. 97–103.

203. Morphology-controlled synthesis of quasi-aligned AlN nanowhiskers by combustion method: Effect of NH₄Cl additive / Zh. Shi, M. Radwan, S. Kirihara, Y. Miyamoto, Zh. Jin // *Ceramics International*. – 2009. – Vol. 35. – P. 2727–2733.

204. Werdecker W. Aluminum nitride-an alternative ceramic substrate for high power applications in microcircuits / W. Werdecker, F. Aldinger // *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing*. – 1984. – Vol. 7, No 4. – P. 399–404.

205. High thermal conductivity aluminum nitride ceramic substrates and packages / F. Miyashiro, N. Iwase, A. Tsuge, F. Ueno, M. Nakahashi, T. Takahashi // *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing*. – 1990. – Vol. 13, No 2. – P. 313–319.

206. Lin Zh. An AlN-based high temperature package for SiC devices: materials and processing / Zh. Lin, R.J. Yoon // *Proceedings. International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces*. – Michigan, 2005. – P. 156–159.

207. Kim S.Y. the characteristic of passive elements on aluminum nitride substrate / S.Y. Kim, J.M. Yook, Ch.M. Nam // The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. – 2008. – Vol. 19, No 2. – P. 257–262.
208. Ruemenapp T. Investigation of the ageing performance of AlN-ceramic used in high-power-semiconductors / T. Ruemenapp, D. Peier // Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications. – Edinburgh, UK, 2000. – P. 285–290.
209. Aluminum nitride ceramic substrates-bonded vertical light-emitting diodes / T. Jeong, K.H. Kim, S.J. Lee, S.H. Lee, S.R. Jeon, S.H. Lim, J.H. Baek, J.K. Lee // IEEE Photonics Technology Letters. – 2009. – Vol. 21, No 13. – P. 890–892.
210. InGaN-based blue-violet laser diodes using AlN as the electrical insulator / W.S. Tan, V. Bousquet, M. Kauer, K. Takahashi, J. Heffernan // Japanese Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 48, No 7. – Art. No 072102.
211. Thermal design and analysis of multi-chip LED module with ceramic substrate / L. Yin, L. Yang, W. Yang, Y. Guo, K. Ma, S. Li, J. Zhang // Solid-State Electronics. – 2010. – Vol. 54. – P. 1520–1524.
212. Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов, Т.А. Хабас, А.П. Ильин, Е.М. Попенко, А.Г. Коротких, В.А. Архипов, А.А. Дитц, Ю.И. Строкова, Л.О. Толбанова. – Томск : Дельтаплан, 2008. – 382 с.
213. Ильин А.П. Горения алюминия и бора в сверхтонком состоянии / А.П. Ильин, А.А. Громов. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. – 154 с.
214. Gromov A. Metal Nanopowders: Production, Characterization, and Energetic Applications / A. Gromov, U. Teipel. – New Jersey : Wiley Blackwell, 2014. – 440 p.
215. Zarko V.E. Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application / V.E. Zarko, A.A. Gromov. – Amsterdam : Elsevier, 2016. – 374 p.
216. Dreizin E.L. Phase changes in metal combustion // Progress in Energy and Combustion Science. – 2000. – Vol. 26, No 1. – P. 57–78.
217. Иванов В.Г. Закономерности окисления и самовоспламенения на воздухе взрывчатых ультрадисперсных порошков металлов / В.Г. Иванов, О.В. Гаврилюк // Физика горения и взрыва. – 1999. – Т. 35, № 6. – С. 53–60.

218. Гуревич М.А. О влиянии пленки окисла на характеристики воспламенения алюминия / М.А. Гуревич, Е.С. Озеров, А.А. Юринов // Физика горения и взрыва. – 1978. – Т. 14, № 4. – С. 50–55.

219. О механизме окисления порошкообразных металлов в процессе их нагревания на воздухе / В.Г. Шевченко, В.И. Кононенко, М.А. Булатов и др. // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, № 1. – С. 45–49.

220. Шевченко В.Г. Влияние свойств поверхностного слоя оксида на окисление порошков алюминия / В.Г. Шевченко, М.А. Булатов, В.И. Кононенко // Порошковая металлургия. – 1988. – № 2. – С. 1–5.

221. Ильин А.П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, № 1. – С. 133–139.

222. Ильин А.П. Об избыточной энергии ультрадисперсных порошков, полученных методом взрыва проволок // Физика и химия обработки материалов. – 1994. – № 3. – С. 94–97.

223. Ivanov G.V. 'Activated' aluminum as a stored energy source for propellants / G.V. Ivanov, F. Tepper // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 1997. – Vol. 4, No 1–6. – P. 636–645.

224. Kuo K.K. Applications of turbulent and multiphase combustion / K.K. Kuo, R. Acharya. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2012. – 576 p.

225. Мостовщиков А.В. Закономерности физико-химических процессов в дисперсных металлах, подвергнутых высокоэнергетическим воздействиям, и их структурно-энергетическое состояние: дисс. ... д-ра техн. наук : специальность 02.00.04 «Физическая химия» / А.В. Мостовщиков ; Томский политехнический университет. – Томск, 2020. – 294 с.

226. Ильин А.П. Изучение последовательности фазообразования при горении прессованного нанопорошка алюминия в воздухе с применением синхротронного излучения / А.П. Ильин, А.В. Мостовщиков, Н.А. Тимченко // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 72–76.

227. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов: учеб. пособие для металлург. специальностей вузов / К.К. Стрелов, И.Д. Кашеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1996. – 606 с.

228. Plantier K.B. Combustion wave speeds of nanocomposite Al/Fe₂O₃: the effects of Fe₂O₃ particle synthesis technique / K.B. Plantier, M.L. Pantoya, A.E. Gash // Combustion and Flame. – 2005. – Vol. 140, No 4. – P. 299–309.

229. Sutton G.P. Rocket propulsion elements: an introduction to the engineering of rockets, seventh ed. / G.P. Sutton, O. Biblarz. – New York : John Wiley & Sons, USA, 2001. – 739 p.

230. Son S.F. Introduction: Nanoscale composite energetic materials / S.F. Son, R.A. Yetter, V. Yang // Journal of Propulsion and Power. – 2007. – Vol. 23, No 4. – P. 643–644.

231. Carl Zeiss AG. URL: <https://www.zeiss.com/corporate/int/home.html> (дата обращения: 04.03.2021).

232. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Т. 1 / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин, Д. Джой, Ч. Фиори, Ф. Лифшин / Пер. с англ. – Москва : Мир, 1984. – 348 с.

233. JEOL Ltd. URL: <https://www.jeol.co.jp/en/products/> (дата обращения: 05.03.2021).

234. Новоженев В.А. Калориметрические методы исследования неорганических веществ / В.А. Новоженев. – Барнаул : Издательство Алтайского государственного университета, 1994. – 96 с.

235. Уэндландт У. Термические методы анализа / У. Уэндландт. – Москва : Мир, 1978. – 527 с.

236. Проблемы диагностики нанопорошков и наноматериалов / А.П. Ильин, А.В. Коршунов, Д.О. Перевезенцева, Л.О. Толбанова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 250 с.

237. Short-wave emission and microdischarges during self-propagating high-temperature synthesis / A.I. Kirdyashkin, V.G. Salamatov, Yu.M. Maksimov, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko, R.M. Gabbasov // Journal of chemistry and chemical engineering. – 2012.

– Vol. 6, No 3. – P. 292–298.

238. Gas-phase reaction in nanoaluminum combustion / P. Lynch, G. Fiore, H. Krier, N. Glumac // *Combustion Science and Technology*. – 2010. – Vol. 182, No 7. – P. 842–857.

239. Invited Article: Quantitative imaging of explosions with high-speed cameras / K.L. McNesby, B.E. Homan, R.A. Benjamin, V.M. Boyle, J.M. Densmore, M.M. Biss // *Review of Scientific Instruments*. – 2016. – Vol. 87, No. 5. – Art No. 051301.

240. Initiation and combustion of mechanoactivated mixtures of aluminum and copper oxide / A.Yu. Dolgoborodov, B.D. Yankovsky, V.G. Kirilenko et al. // *Advanced Materials and Technologies*. – 2018. – № 3. – P. 45–48.

241. Ударно-волновое инициирование термитной смеси Al+CuO / С.Ю. Ананьев, Л.И. Гришин, А.Ю. Долгобородов, Б.Д. Янковский // *Физика горения и взрыва*. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 107–117.

242. Combustion characteristics of physically mixed 40 nm aluminum/copper oxide nanothermites using laser ignition / F. Saceleanu, M. Idir, N. Chaumeix, J. Z. Wen // *Frontiers in Chemistry*. – 2018. – Vol. 6. – Art no. 465.

243. Laser dispersion and ignition of metal fuel particles / A.A. Abdel-Hafez, M.W. Brodt, J.R. Carney, J.M. Lightstone // *Review of Scientific Instruments*. – 2011. – Vol. 82, No. 6. – Art. No 064101.

244. Sivan J. Laser ignition of various pyrotechnic mixtures – an experimental study / J. Sivan, Y. Haas // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2015. – Vol. 40, No. 5. – P. 755–758.

245. Лазерное инициирование нанотермитов Al/CuO и Al/Bi₂O₃ / В.Г. Кириленко, Л.И. Гришин, А.Ю. Долгобородов, М.А. Бражников // *Горение и взрыв*. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 145–155.

246. Dosser L.R. A high-speed photography of energetic materials and components with a copper vapor laser / L.R. Dosser, J.W. Reed, M. Stark // *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, Vol. 117: Symposium C – Process Diagnostics: Materials, Combustion, Fusion. – Miamisburg, USA, 1988. – P. 239–243.

247. Pantoya M.L. Combustion behavior of highly energetic thermites: nano versus

micron composites / M.L. Pantoya, J.J. Granier // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2005. – Vol. 30, No 1. – P. 53–62.

248. Fuller P.W.W. An introduction to high speed photography and photonics // Imaging Science Journal. – 2009. – Vol. 57, No 6. – P. 293–302.

249. Manin J. Performance comparison of state-of-the-art high-speed video cameras for scientific applications / J. Manin, S.A. Skeen, L.M. Pickett // Optical Engineering. – 2018. – Vol. 57, No 12. – Art. No 124105.

250. Vision Research Inc. URL: <https://www.phantomhighspeed.com/products> (дата обращения: 05.03.2021).

251. Большая российская энциклопедия. URL: <https://bigenc.ru/> (дата обращения: 04.03.2021).

252. Maldagiie X. Pulse phase infrared thermography / X. Maldagiie, S. Marinetti // Journal of Applied Physics. – 1996. – Vol. 79, No 5. – P. 2694–2698.

253. Khodayar F. Infrared thermography and NDT: 2050 horizon / F. Khodayar, S. Sojasi, X. Maldague // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2016. – Vol. 13, No 2. – P. 210–231.

254. Nondestructive testing of composite T-Joints by TNDT and other methods / V. Vavilov, A. Chulkov, S. Dubinskii et al. – Polymer Testing. – 2021. – Vol. 94. – Art. No 107012.

255. Research on the processes of deformation and failure in coarse- and ultrafine-grain states of Zr–1Nb alloys by digital image correlation and infrared thermography / Y.P. Sharkeev, V.P. Vavilov, V.A. Skrypnyak et al. – Materials Science and Engineering A. – 2020. – Vol. 784. – Art. No 139203.

256. FLIR Systems, Inc. URL: <https://www.flir.eu/instruments/science/high-speed-ir/> (дата обращения: 04.03.2021).

257. Study of aluminum particle combustion in solid propellant plumes using digital in-line holography and imaging pyrometry / Y. Chen, D.R. Guildenbechera, K.N.G. Hoffmeister et al. // Combustion and Flame. – 2017. – Vol. 82. – P. 225–237.

258. 3-D reconstruction of flame temperature distribution using tomographic and two-color pyrometric techniques / Z. Zhou, D. Tian, Z. Wu, Z. Bian, W. Wu // IEEE

Transaction on Instrumentation and Measurement. – 2015. – Vol. 64, No 11. – P. 3075–3084.

259. Determination of char combustion kinetics parameters: Comparison of point detector and imaging-based particle-sizing pyrometry / M. Schiemann, M. Geier, C.R. Shaddix, N. Vorobiev, V. Scherer // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Vol. 85, No 7. – Art. No 075114.

260. Combustion Characteristics of Stoichiometric Al-CuO Nanocomposite thermites prepared by different methods / I. Monk, M. Schoenitz, R.J. Jacob et al. // Combustion Science and Technology. – 2017. – Vol. 189, № 3. – P. 555–574.

261. Ильин А.П. Изучение последовательности фазообразования при горении прессованного нанопорошка алюминия в воздухе с применением синхротронного излучения / А.П. Ильин, А.В. Мостовщиков, Н.А. Тимченко // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 72–76.

262. Медведев В.В. Зажигание пиротехнического состава (перхлорат аммония + ультрадисперсный алюминий) лазерными импульсами / В.В. Медведев, В.П. Ципилев, А.А. Решетов // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 2. – С. 83–86.

263. Размерный эффект при лазерном инициировании пиротехнического состава (перхлорат аммония + ультрадисперсный алюминий) / В.В. Медведев, Е.П. Агеева, В.П. Ципилев, А.Н. Яковлев // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, № 6. – С. 77–82.

264. Conditions of millisecond laser ignition and thermostability for ammonium perchlorate/aluminum mixtures / V. Medvedev, V. Tsipilev, A. Reshetov, A.P. Il'yin // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2017. – Vol. 42, № 3. – P. 243–246.

265. Copper bromide laser of 120 W average output power / D.N. Astadjov, K.D. Dimitrov, D.R. Jones, V.K. Kirkov, C.E. Little, N.V. Sabotinov, N.K. Vuchkov // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1997. – Vol. 33, № 5. – P. 705–709.

266. Пат. 62742 Российская Федерация, МПК Н 01 S3/08. Активный элемент лазера на парах галогенида металла. № 2005130448/28; заявил. 30.09.05; опубл. 27.04.07 / Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Иванов А.И. – 2 с.

267. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромида меди с пониженным энерговкладом в разряд / Ф.А. Губарев, В.Б. Суханов, Д.В. Шиянов, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 1. – С. 85–93.

268. О природе фантомных токов в активной среде лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов / Н.А. Юдин, В.Б. Суханов, Ф.А. Губарев, Г.С. Евтушенко // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 1. – С. 23–28.

On the nature of phantom currents in the active medium of self-contained metal atom transition lasers / N.A. Yudin, V.B. Sukhanov, F.A. Gubarev, G.S. Evtushenko // Quantum Electronics. – 2008. – Vol. 38, No 1. – P. 23–28. [перевод]

269. Юдин Н.А. Развитие разряда в активных средах лазеров на парах металлов с малым рабочим объемом / Н.А. Юдин, Ф.А. Губарев, В.Б. Суханов // Известия ВУЗов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 5/2. – С. 41–46.

270. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц / Ф.А. Губарев, В.Ф. Федоров, Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов, С.С. Заикин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 2. – С. 106–107.

271. Управление генерацией CuBr-лазера / Ф.А. Губарев, В.Ф. Федоров, Г.С. Евтушенко, М.В. Тригуб // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, № 4. – С. 147–151.

272. Gain characteristics of large volume CuBr laser active media / F.A. Gubarev, V.O. Troitskiy, M.V. Trigub, V.B. Sukhanov // Optics Communications. – 2011. – V. 284, № 10–11. – P. 2565–2568.

273. Режим одиночных импульсов генерации CuBr-лазера / Ф.А. Губарев, Федоров В.Ф., Федоров К.В., Евтушенко Г.С // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 12. – С. 1107–1111.

274. Управление энергией генерации CuBr-лазера / Ф.А. Губарев, В.Ф. Федоров, К.В. Федоров, Г.С. Евтушенко // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 106–110.

275. Лазер на парах бромида меди с длительностью импульса генерации до

320 ns / Ф.А. Губарев, В.Ф. Федоров, К.В. Федоров, Д.В. Шиянов, Г.С. Евтушенко // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 1. – С. 57–60.

Copper bromide vapour laser with an output pulse duration of up to 320 ns / F.A. Gubarev, V.F. Fedorov, K.V. Fedorov, G.S. Evtushenko // Quantum Electronics. – 2016. – Vol. 46, No 1. – P. 57–60. [перевод]

276. Влияние индуктивности разрядного контура на энергетические характеристики CuBr-лазера / Ф.А. Губарев, М.В. Тригуб, К.В. Федоров, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 7. – С. 604–609.

Influence of the discharge circuit inductance on output characteristics of a CuBr laser / F.A. Gubarev, M.V. Trigub, G.S. Evtushenko, K.V. Fedorov // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2013. – V. 26, No 6. – P. 559–564. [перевод]

277. Губарев Ф.А. Частотно-импульсное кодирование генерации CuBr-лазера / Ф.А. Губарев, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 12. – С. 1107–1111.

278. Gubarev F.A. A long pulse CuBr vapor oscillator for laser monitor applications / F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii // Journal of Physics: Conf. Series. – 2016. – Vol. 671. – Art no. 012019.

279. Modeling technique of capacitive discharge pumping of metal vapor lasers for electrode capacitance optimization / F.A. Gubarev, G.S. Evtushenko, N.K. Vuchkov, V.B. Sukhanov, D.V. Shiyanov // Review of Scientific Instruments. – 2012. – Vol. 83. – P. 055111–055115.

280. Губарев Ф.А. Радиальное распределение однопроходowego излучения в активном элементе лазерного монитора / Ф.А. Губарев, Г.С. Евтушенко, Л. Ли // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 13. – С. 160–162.

281. Gubarev F.A. Radial distribution of a single-pass amplified radiation in the active elements of CuBr lasers / F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii, L. Li // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81, № 1. – P. 1–8.

282. Radial distribution of radiation in a CuBr vapor brightness amplifier used in laser monitors / F.A. Gubarev, M.V. Trigub, M.S. Klenovskii, L. Li, G.S. Evtushenko // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2016. – Vol. 122, № 1. – Art no. 2.

283. Spatial-temporal gain distribution of a CuBr vapor brightness amplifier / F.A. Gubarev, L. Li, M.S. Klenovskii, D.V. Shiyanov // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2016. – Vol. 123, № 11. – Art no. 284.

284. Gubarev F.A. A mirror based scheme of a laser projection microscope / F.A. Gubarev, L. Li, M.S. Klenovskii // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 81. – Art no. 012016.

285. Gubarev F.A. Copper bromide laser monitor for combustion processes visualization / F.A. Gubarev, A.V. Mostovshchikov, M.S. Klenovskii // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. – Shanghai, 2016. – P. 2666–2670.

286. Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor / L. Li, A.P. Ilyin, F.A. Gubarev, A.V. Mostovshchikov, M.S. Klenovskii // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44, № 16. – P. 19800–19808.

287. High-speed visualization of nanopowder combustion in air / F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // *Optica Pura y Aplicada*. – 2018. – Vol. 51, № 4. – P. 1–7.

288. Laser systems for distant monitoring of nanopowder combustion / L. Li, P.A. Antipov, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, F.A. Gubarev // *Progress in Electromagnetics Research M*. – 2019. – Vol. 84. – P. 85–93.

289. Aluminum nanopowder combustion monitoring using an optical system with brightness amplification / F.A. Gubarev, A.V. Mostovshchikov, A.P. Il'in, L. Li // *2017 Progress in electromagnetics research symposium – spring (PIERS)*. – St Petersburg, 2017. – P. 2694–2698.

290. Monitoring of nanopowder combustion ignited by laser radiation / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A. Smirnov, F.A. Gubarev // *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. – Toyama, 2018. – P. 311–316.

291. Monitoring of aluminum nanopowder combustion ignited by laser radiation / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Il'in, F.A. Gubarev // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. – 2018. – Vol. 75. – P. 125–130.

292. Antipov P.A. Rotational projection optical system for nanopowder combustion monitoring / P.A. Antipov, L. Li, F.A. Gubarev // *20th International*

Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2019). – Novosibirsk, 2019. – P. 373–378.

293. Optical system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A. Smirnov, F.A. Gubarev // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69, No 2. – P. 457–468.

294. Imaging system with brightness amplification for a metal-nanopowder combustion study / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, P.A. Antipov, D.V. Shiyanov, F.A. Gubarev // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127, Art. No 194503. – P. 194503-1–194503-11.

295. In situ nanopowder combustion visualization using laser systems with brightness amplification / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, P.A. Antipov, D.V. Shiyanov, F.A. Gubarev // Proceedings of the Combustion Institute. – 2021. – Vol. 38. – P. 1695–1702.

296. Li L. Spatial-temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme / L. Li, D.V. Shiyanov, F.A. Gubarev // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2020. – Vol. 126, No 10. – Art no. 155.

297. Лазерный монитор с независимой подсветкой для наблюдения процессов высокотемпературного горения нанопорошков металлов / Ф.А. Губарев, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, Л. Ли, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – Вып. 8. – С. 20–24.

298. Two-channel system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders / F.A. Gubarev, E.Yu. Burkin, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, L. Li // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – Art. No 9371760.

299. Двухканальный лазерный монитор для наблюдения процессов высокотемпературного горения нанопорошков металлов / Ф.А. Губарев, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, Л. Ли, А.И. Федоров, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – Вып. 7. – С. 38–41.

300. Two-brightness-amplifier imaging system for energetic-materials-combustion

study / F.A. Gubarev, A.S. Moldabekov, A.V. Mostovshchikov, L. Li // Review of Scientific Instruments. – 2021. – Vol. 92. – Art. No 053702.

301. Analysis of surface changes of burning nanopowders using digital processing of laser monitor images / F.A. Gubarev, S. Kim, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59, No 18. – P. 5487–5496.

302. Laser monitor application for study of aluminum nanopowder ignition and combustion / F.A. Gubarev, I.D. Liushnevskaya, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // Proceedings of SPIE. – 2021. – Vol. 11846. – Art. No 1184604.

303. Оптическая система с усилением яркости для исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения / Ф.А. Губарев, С. Ким, Л. Ли, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 96–103.

An optical system with brightness amplification for studying the surface of metal nanopowders during combustion / F.A. Gubarev, S. Kim, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Il'in // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Vol. 63, No. 3. – P. 379–386. [перевод]

304. Laser monitor for studying the combustion of thin layers of metal nanopowders / F.A. Gubarev, A.V. Mostovshchikov, A.I. Fedorov, L. Li // Progress in Electromagnetics Research M. – 2021. – Vol. 101. – P. 37–45.

305. Отпаянные эффективные эксилампы, возбуждаемые емкостным разрядом / М.И. Ломаев, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, № 27. – С. 27–32.

306. Эксилампы – эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения / М.И. Ломаев, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц, М.В. Ерофеев // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, № 2. – С. 201–217.

307. Бактерицидная лампа емкостного разряда на парах иода / Э.А. Соснин, Л.В. Лаврентьева, Я.В. Мастерова, М.В. Ерофеев, В.Ф. Тарасенко // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, № 14. – С.89–94.

308. Лазер на парах бромида меди, возбуждаемый емкостным разрядом / В.Б. Суханов, В.Ф. Федоров, Ф.А. Губарев, В.О. Троицкий, Г.С. Евтушенко // Квантовая

электроника. – 2007. – Т. 37, № 7. – С. 603–604.

Capacitive-discharge-pumped copper bromide vapour laser / V.B. Sukhanov, V.F. Fedorov, F.A. Gubarev, V.O. Troitskiy, G.S. Evtushenko // *Quantum Electronics*. – 2007. – Vol. 37, No 7. – P. 603–604. [перевод]

309. Пат. 2363080 Российская Федерация, МПК Н 01 S3/08. Способ возбуждения лазеров на парах галогенидов металлов и активный элемент лазера на парах галогенидов металлов. № 2007137328/28; заявил. 08.10.07; опубл. 27.07.09 / Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Фёдоров В.Ф. – 2 с.

310. CuBr laser excited by a capacitively coupled longitudinal discharge / F.A. Gubarev, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko, V.F. Fedorov, D.V. Shiyanov // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2009. – Vol. 45, No 2. – P. 171–177.

311. Энергетические характеристики CuBr-лазера с емкостной накачкой при использовании схемы на основе лампового коммутатора / Ф.А. Губарев, В.Ф. Федоров, Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 106–110.

312. Особенности работы CuBr-лазера с накачкой продольным емкостным разрядом / Ф.А. Губарев, В.Б. Суханов, Г.С. Евтушенко, Д.В. Шиянов // *Квантовая электроника*. – 2010. – Т. 40, № 1. – С. 19–24.

Operation features of a longitudinal-capacitive-discharge-pumped CuBr laser / F.A. Gubarev, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko, D.V. Shiyanov // *Quantum Electronics*. – 2010. – Vol. 40, No 1. – P. 19–24. [перевод]

313. Исследование возможности масштабирования CuBr-лазеров с емкостной накачкой / Ф.А. Губарев, Д.В. Шиянов, В.Б. Суханов, Г.С. Евтушенко // *Оптика атмосферы и океана*. – 2012. – Т. 25, № 11. – С. 1003–1006.

Study of scalability of capacitive excited CuBr lasers / F.A. Gubarev, D.V. Shiyanov, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2013. – Vol 26, No 3. – P. 241–244. [перевод]

314. Capacitive-discharge-pumped CuBr laser with 12 w average output power / F.A. Gubarev, D.V. Shiyanov, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2013. – V. 49, No 1. – P. 89–94.

315. Shiyarov D.V. Influence of peaking capacitance on the output power of capacitive-discharge-pumped metal halide vapor lasers / D.V. Shiyarov, V.B. Sukhanov, F.A. Gubarev // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2018. – Vol. 54, No 2. – Art. No 1500107.

316. Gubarev F.A. Capacitive-discharge-pumped copper bromide vapor laser with output power up to 15 W / F.A. Gubarev, D.V. Shiyarov, V.B. Sukhanov // Progress in Electromagnetics Research Symposium. – Toyama, 2018. – P. 1909–1914.

317. Райзер Ю.П. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения : учеб. пособие для вузов / Ю.П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яйенко. – Москва : Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та; Наука-Физматлит. 1995. – 320 с.

318. Меерович Л.А. Магнитные генераторы импульсов / Л.А. Меерович, И.М. Ватин, Э.Ф. Зайцев, В.М. Кандыкин. – Москва : Советское радио, 1968. – 476 с.

319. Юдин Н.А. Физические процессы в активных средах лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов и их взаимосвязь с параметрами разрядного контура: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук : специальность 01.04.21 «Лазерная физика» / Н.А. Юдин ; Томский государственный университет. – Томск, 2009. – 248с.

320. Солдатов А.Н. Лазер на парах меди со стабилизированными выходными параметрами / А.Н. Солдатов, В.Ф. Федоров // Квантовая электроника. – 1983. – Т. 10, № 5. – С. 974–980.

321. Управление длительностью генерации лазера на парах меди / Г.С. Евтушенко, А.Е. Кириллов, В.Л. Кругляков, Ю.П. Полуниин, А.Н. Солдатов, Н.А. Филонова // Журнал прикладной спектроскопии. – 1988. – Т. 49, № 5. – С. 745–751.

322. Исследование лазера на парах меди с повышенным КПД / А.Н. Солдатов, В.Б. Суханов, В.Ф. Федоров, Н.А. Юдин // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8, № 11. – С. 1626–1636.

323. Лепехин Н.М. Высокоскоростная импульсная модуляция излучения лазеров на самоограниченных переходах атомов химических элементов / Н.М. Лепехин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов // Прикладная физика. – 2006. – № 1. – С. 8–13.

324. Энергетические характеристики излучения саморазогревного промышленного лазера KULON-10 Cu-M / Н.М. Лепехин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов и др. // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 8. – С. 765–769.

325. Экспериментальное исследование цугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромида меди / В.А. Димаки, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий, А.Г. Филонов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 111–114.

326. Восстановление молекул бромида меди в плазме CuBr-лазера в межимпульсный период / С.Н. Торгаев, Ф.А. Губарев, А.М. Бойченко, Г.С. Евтушенко, О.В. Жданеев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2011. – Т. 201, № 2. – С. 81–84.

Reduction of copper bromide molecules in the plasma of a CuBr laser during the interpulse period / S.N. Torgaev, F.A. Gubarev, A.M. Boichenko, G.S. Evtushenko, O.V. Zhdaneev // Russian Physics Journal. – 2011. – Vol. 54, No 2. – P. 221–225. [перевод]

327. Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования / В.В. Белов, М.В. Тарасенков, В.Н. Абрамочкин и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 4. – С. 261–267.

328. Evtushenko G.S. Applications of pulsed metal vapour lasers in atmospheric optics // Pulsed Metal Vapor Lasers / Eds. C.E. Little, N.V. Sabotinov. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996. – P. 445–452.

329. Сухарников К.В. Бистатическая схема лазерного монитора: ВКР на соиск. степ. магистра / К.В. Сухарников ; Томский политехнический университет / Научный руководитель: Ф.А. Губарев. – Томск, 2013. – 83 с.

330. Сухарников К.В. Бистатическая схема лазерного монитора / К.В. Сухарников, Ф.А. Губарев // Сборник научных трудов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электронные приборы, системы и технологии». – Томск, 2013. – С. 200–206.

331. Система синхронизации импульсно-периодического режима работы активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов / М.В. Тригуб, Н.А. Васнев, Г.С. Евтушенко, В.А. Димаки // Приборы и техника эксперимента. –

2019. – № 1. – С. 30–35.

332. Буркин Е.Ю. Инверторный источник питания для заряда емкостного накопителя / Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов, Е.Ю. Степанов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 4. – С. 155–160.

333. Буркин Е.Ю. Устройство формирования ступенчато-падающего тока заряда емкостного накопителя энергии / Е.Ю. Буркин, О.А. Кожемяк // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 2. – С. 91–95.

334. Influence of the pre-pulse plasma electron density on the performance of elemental copper vapor lasers / R.G. Carman, M.J. Withford, D.J.W. Brown, J.A. Piper // Optics Communications. – 1998. – V. 157. – P. 99–104.

335. Investigation of the effects of bromine and hydrogen bromide additives on copper vapour laser performance / M.J. Withford, D.J.W. Brown, R.G. Carman, J.A. Piper // Optics Communications. – 1997. – V. 135. – P. 164–170.

336. Тригуб М.В. Лазерный монитор для неразрушающего контроля изделий и визуализации быстропротекающих процессов в условиях фоновой засветки: дисс. ... канд. техн. наук : специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» / М.В. Тригуб ; ТПУ, ИОА СО РАН. – Томск, 2013. – 157 с.

337. Coutts D.W. Formation of output in copper vapor lasers / D.W. Coutts, D.J.W. Brown // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34, № 9. – P. 1502–1812.

338. Astadjov D.N. CuBr laser beam transformations / D.N. Astadjov, S.V. Nakhe // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – Vol. 253. – Art. No. 012076.

339. Temporal and radial evolution of the populations of cui levels in the CuBr vapor laser / D.N. Astadjov, A.A. Isaev, G.G. Petrash, I.V. Ponomarev, N.V. Sabotinov, N.K. Vuchkov // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1992. – Vol. 28, № 10. – P. 1966–1969.

340. ООО «Электростекло. URL: <http://www.elektrosteklo.ru> (дата обращения: 04.03.2021).

341. Цветное оптическое стекло и особые стекла / под ред. Г.Т. Петровского. – Москва : Дом оптики, 1990. – 228 с.

342. ООО «ЛасС». URL: <https://lascompany.ru/> (дата обращения: 04.03.2021).
343. Пат. 2712756 Российская Федерация, МПК G 02 B21/0004. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей. № 2019117585; заявл. 06.06.19; опубл. 31.01.2020 / Губарев Ф.А., Ли Л., Антипов П.А., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. – 2 с.
344. Общий курс фотографии: учеб. для техникумов / А.В. Фомин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Легпромбытиздат, 1987. – 256 с.
345. Пат. 2685072 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Способ исследования процесса горения порошков металлов или их смесей. № 2018124600; заявл. 06.07.18; опубл. 16.04.19 / Губарев Ф.А., Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. – 2 с.
346. Пат. 2685040 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей. № 2018124662; заявл. 06.07.18; опубл. 16.04.19 / Губарев Ф.А., Ли Линь, Мостовщиков А.В., Ильин А.П. – 2 с.
347. Пат. 2687308 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей. № 2018124663; заявл. 06.07.18; опубл. 13.05.19 / Губарев Ф.А., Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. – 2 с.
348. Исследование искажений, вносимых усилителем яркости на парах бромида меди, в формируемые лазерным монитором изображения / М.В. Тригуб, М.В. Бурков, П.С. Любутин, С.Н. Торгаев // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 10. – С. 850–854.
349. Пат. 2746308 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей № 2020133002; заявл. 07.10.20; опубл. 12.04.2021 / Губарев Ф.А., Мостовщиков А.В., Буркин Е.Ю., Свиридов В.В., Ильин А.П. – 15 с.
350. Peli E. Contrast in complex images / E. Peli // Journal of the Optical Society of America A. – 1990. – Vol. 7, No 10. – P. 2032–2040.
351. Ilyin A.P. Synthesis and characterization of metal carbides nanoparticles

produced by electrical explosion of wires / A.P. Ilyin, O.B. Nazarenko, D.V. Tikhonov // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2012. – Vol. 12, No 10. – P. 8137–8142.

352. ООО «Передовые порошковые технологии». URL: <http://www.nanosized-powders.com> (дата обращения: 04.03.2021).

353. Xiao Z. Applications of the CuBr vapor laser as an image-brightness amplifier in high-speed photography and photomicrography / Z. Xiao, G. Zhang, F. Lin // Applied Optics. – 1992. – Vol. 31, No 18. – P. 3395–3397.

354. Gromov A.A. Nitride Ceramics: Combustion Synthesis, Properties and Applications / A.A. Gromov, L.N. Chukhlomina. – Weinheim : Wiley-VCH, 2014. – 360 p.

355. Lee K.J. Aluminum nitride whisker formation during combustion synthesis / K.J. Lee, D.H. Ahn, Y.S. Kim // Journal of American Ceramic Society. – 2000. – Vol. 83. – P. 1117–1121.

356. Zakorzhevskii V.V. Combustion synthesis of aluminum nitride / V.V. Zakorzhevskii, I.P. Borovinskaya, N.V. Sachkova // Inorganic Materials. – 2002. – Vol. 38. – P. 1131–1140.

357. The kinetics of oxidation of aluminum electroexplosive nanopowders during heating in air / A.V. Korshunov, A.P. Il'in, N.I. Radishevskaya, T.P. Morozova // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2010. – Vol. 84. – P. 1576–1584.

358. Ильин А.П. Синтез нитридов сжиганием нанопорошков алюминия и вольфрама на воздухе / А.П. Ильин, Л.О. Толбанова // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 2. – С. 80–85.

359. Schweiter C. Physical mechanisms of generation and deactivation of singlet oxygen / C. Schweiter, R. Schmidt // Chemical Reviews. – 2003. – Vol. 103, No 5. – P. 1685–757.

360. Ильин А.П. Двухстадийное горение ультрадисперсного порошка алюминия на воздухе / А.П. Ильин, Л.Т. Проскуровская // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 26, № 2. – С. 71–72.

361. Huang H.W. Dynamic application of digital image and colour processing in characterizing flame radiation features / H.W. Huang, Y. Zhang // Measurement Science

and Technology. – 2010. – Vol. 21, No 8. – Art no. 085202.

362. Huang H.W. Analysis of the ignition process using a digital image and colour processing technique / H.W. Huang, Y. Zhang // Measurement Science and Technology. – 2011. – Vol. 22, No 7. – Art no. 075401.

363. Quantitative assessment of flame stability through image processing and spectral analysis / D. Sun, G. Lu, H. Zhou, Y. Yan, S. Liu // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2015. – Vol. 64, No 12. – P. 3323–3333.

364. Ultra-robust flexible electronics by laser-driven polymer-nanomaterials integration / R.D. Rodriguez, S. Shchadenko, G. Murastov, A. Lipovka, M. Fatkullin, I. Petrov, T.-H. Tran, A. Khalelov, M. Saqib, N.E. Villa, V. Bogoslovskiy, Y. Wang, C.-G. Hu, A. Zinovyev, W. Sheng, J.-J. Chen, I. Amin, E. Sheremet // Advanced Functional Materials. – 2021. – V. 31, No 17. – Art. No 2008818.

365. Пат. 2559080 Российская Федерация, МПК В 22 F9/08. Способ получения металлических порошков распылением расплавов. № 2014109340; заявил. 11.03.14; опубл. 10.08.15 / Архипов В.А., Бондарчук С.С., Жуков А.С. и др. – 9 с.

366. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П.Ф. Похил, А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов, В.С. Логачёв, А.И. Коротков. – Москва : Наука, 1972. – 294 с.

367. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants / A.G. Korotkikh, O.G. Glotov, V.A. Arkhipov, V.E. Zarko, A.B. Kiskin // Combustion and Flame. – 2017. – Vol. 178. – P. 195–204.

368. High-speed visualization of aluminum nanopowder combustion in air / F. Gubarev, A. Mostovshchikov, A. Ilyin, L. Li // Proceedings of SPIE. – 2019. – Vol. 11066. – Art. No 1106610.

369. Ли Л. Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения: дисс. ... канд. техн. наук : специальность 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики» / Л. Ли ; Томский политехнический университет. – Томск, 2019. – 163 с.

370. Application and technique of digital speckle correlation / G. Jin, L. Meng, J. Chen et al. // Experimental Mechanics. – 2006. – Vol. 21, No 6. – P. 689–702.

371. Zhang D. Compression strain measurement by digital speckle correlation / D. Zhang, X. Zhang, G. Cheng // *Experimental Mechanics*. – 1999. – Vol. 39, No 1. – P. 62–65.

372. Lu H. Deformation measurements by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient / H. Lu, P.D. Cary // *Experimental Mechanics*. – 2000. – Vol. 40, No 4. – P. 393–400.

373. Okamoto K. New tracking algorithm for particle image velocimetry / K. Okamoto, Y.A. Hassan, W.D. Schmidi // *Experimental in Fluids*. – 1995. – Vol. 19. – P. 342–347.

374. Roesgen T. Two-dimensional on-line particle Imaging velocimetry / T. Roesgen, R. Totaro // *Experimental in Fluids*. – 1995. – Vol. 19. – P. 188–193.

375. Gui L. A comparative study of the MOD method and several correlation-base PIV evaluation algorithms / L. Gui, W. Merzkirch // *Experimental in Fluids*. – 2000. – Vol. 28. – P. 36–44.

376. Schreier W.S. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation / W.S. Schreier, J.R. Braasch, M.A. Sutton // *Optical Engineering*. – 2000. – Vol. 39, No 11. – P. 2915–2921.

377. Reu P.L. Experimental and numerical methods for exact subpixel shifting // *Experimental Mechanics*. – 2011. – Vol. 51. – P. 443–452.

378. Society for Experimental Mechanics. DIC Challenge. URL: <https://sem.org/dicchallenge> (дата обращения: 15.03.2021).

379. Франсон М. Оптика спеклов / М. Франсон. – Москва : Мир, 1980. – 171 с.

380. Laser speckle correlation technique application for study of aluminium nanopowder combustion / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, I.D. Sytnik, F.A. Gubarev // *Applied Optics*. – 2020. – Vol. 59, No 5. – P. 1263–1270.

381. Which wavelength is the best for arterial pulse waveform extraction using laser speckle imaging? / P. Vaz, T. Pereira, E. Figueiras, C. Correia, A. Humeau-Heurtier, J. Cardoso // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2016. – Vol. 25. – P. 188–195.

382. Audio signal reconstruction based on adaptively selected seed points from laser speckle images / Z. Chen, C. Wang, C. Huang, H. Fu, H. Luo, H. Wang // *Optics*

Communications. – 2014. – Vol. 331. – P. 6–13.

383. Berner M.K. Nanoparticles of energetic materials: synthesis and properties (Review) / M.K. Berner, V.E. Zarko, M.B. Talawar // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2013. – Vol. 49, No 6. – P. 625–647.

384. Nanocomposite and mechanically alloyed reactive materials as energetic additives in chemical oxygen generators / M.A. Machado, D.A. Rodriguez, Y. Aly, M. Schoenitz, E.L. Driezina, E. Shafirovich // *Combustion and Flame*. – 2014. – Vol. 161. – P. 2708–2716.

385. Dependence of catalytic properties of Al/Fe₂O₃ thermites on morphology of Fe₂O₃ particles in combustion reactions / N. Zhao, C. He, J. Liu, H. Gong, T. An, H. Xu, F. Zhao, R. Hu, H. Ma, J. Zhang // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2014. – Vol. 219. – P. 67–73.

386. Laser speckle correlation technique application for study of aluminium nanopowder combustion / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, I.D. Sytnik, F.A. Gubarev // *Applied Optics*. – 2020. – Vol. 59, No 5. – P. 1263–1270.

387. Study of aluminium nanopowder combustion by method of laser-speckle correlation / L. Li, A. Mostovshchikov, A. Ilyin, F. Gubarev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1019. – Art. No 012061.

388. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021618999 Российская Федерация, Программа расчета коэффициента корреляции спекл-изображений. № 2021618120; заявил. 28.05.21; опублик. 03.06.21 / Люшневская Ю.Д., Губарев Ф.А.

389. Laser speckle correlation technique application for remote characterization of metal nanopowders combustion / L. Li, F.A. Gubarev, Y. Cao, I.D. Liushnevskaya, A.V. Mostovshchikov // *Applied Optics*. – 2021. – Vol. 60, No 22. – P. 6585–6592.

Приложение 1. Акты



Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,
Fax (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОКРО (National Classification of Enterprises and Organizations):
02069303,
Company Number: 1027000890168,
VAT / KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,
факс: (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОИПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

УТВЕРЖДАЮ
Директор Инженерной школы ядерных технологий
Томского политехнического университета

О.Ю. Долматов
«01» марта 2021 г.

Акт внедрения

Результатов диссертационной работы Ф.А. Губарева на тему:
«Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения
высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов
в режиме реального времени»

Исследование процессов горения нано- и микropорошков металлов и методов их активации является одним из направлений работы Научно-исследовательской лаборатории СВЧ-технологии Томского политехнического университета. Получение нанопорошков металлов и высокоэнергетические материалы на их основе с улучшенными свойствами является одной из ключевых задач развития порошковых технологий, в том числе для решения задач специального назначения.

Горение нанопорошков металлов протекает при температурах, превышающих 2000 °С и сопровождается интенсивным свечением, которое делает практически невозможным визуальное исследование поверхности горения. В связи с этим важной научно-технической задачей является разработка методов и оборудования для исследования поверхности высокоэнергетических материалов во время горения с целью изучения закономерностей горения, физических особенностей и возможности улучшения их свойств.

Заключение

Разработанный под руководством Губарева Ф.А. лазерный монитор на основе усиливающей среды на парах бромида меди позволил осуществлять скоростную визуализацию поверхности горящего нанопорошка сквозь яркую засветку, создаваемую процессом горения. Малая мощность зондирующего излучения лазерного монитора дала возможность исследовать не только протекание процесса, но и его инициирование с помощью лазера. С использованием разработанного лазерного монитора исследовались: скорость распространения волн горения нанопорошка алюминия, не активированного и активированного СВЧ-излучением, стадийность, форма видимого фронта волны горения, появление продуктов с разным фазовым состоянием.

Полученные в ходе исследований с использованием лазерного монитора результаты вошли в отчет по Государственному заданию «Наука», проект №11.1928.2017/4.6. В настоящее время разработанное лабораторное оборудование используется в текущих работах лаборатории по исследованию горения смесей нанопорошков металлов, активированных СВЧ-излучением.

Заведующий Научно-исследовательской лабораторией
СВЧ-технологии, д.ф.-м.н.

П.Ю. Чумерин

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИИИ ПММ ТГУ

А.Н. Ищенко

2021 г.

Акт использования

оборудования визуализации, разработанного при выполнении диссертационной работы Ф.А. Губарева по теме «Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов в режиме реального времени»

В Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики Томского государственного университета проведена совместная с Томским политехническим университетом поисковая НИР по оценке влияния СВЧ-излучения на характеристики алюминизированных высокоэнергетических материалов. В качестве объекта исследования использовался микронный порошок алюминия марки АСД-6М, предварительно облученный СВЧ-излучением (2,8 ГГц, 8 кВт/см²), в составе полимерной композиции на основе СКДМ-80 (15,8 мас. %), наполненной NH₄ClO₄ (69,2 мас. %) и АСД-6М (15,0 мас. %). Измерения теплоты сгорания проводились с применением калориметрической установки.

Визуализация горения образцов указанного состава проводилась с использованием лазерного монитора, разработанного в Томском политехническом университете при выполнении диссертационной работы Ф.А. Губарева. Расстояние от зеркала лазерного монитора до объекта наблюдения составляло 50 см. Скорость регистрации изображений составляла 900 кадров/с при разрешении 1280×1024 пикселя. Импульсное воздействие на объект исследования составляло 20 мкДж.

Заключение: использование лазерного монитора позволяет наблюдать поверхность высокоэнергетического материала во время горения. При этом высокая яркость объекта исследования не является фактором, ограничивающим возможности визуализации поверхности. Предложенная техника визуализации дает возможность исследовать распространение видимого фронта горения, оценивать его скорость, наблюдать происходящие изменения образца в процессе горения. Лазерный монитор, разработанный при выполнении диссертационной работы Ф.А. Губарева, показал перспективность использования в дальнейших работах отдела газовой динамики и физики взрыва ИИИ ПММ ТГУ.

Заведующий отделом газовой динамики
и физики взрыва, д.ф.-м.н., профессор

В.А. Архипов

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке ТПУ,

д.х.н., профессор

М.С. Юсубов

20 21 г.



Акт

использования результатов диссертационной работы
Губарева Федора Александровича «Методы и аппаратура для
визуализации и контроля поверхности горения высокоэнергетических
материалов на основе нанопорошков металлов в режиме реального
времени» в учебном процессе

Настоящим актом подтверждаем, что разработанные при выполнении диссертационной работы «Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов в режиме реального времени» методики и оборудование используется при подготовке аспирантов Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий ТПУ по направлениям 03.06.01 Физика и астрономия (образовательная программа «Приборы и методы экспериментальной физики») и 12.06.01 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии (образовательная программа «Приборы, системы и изделия медицинского назначения»).

Часть результатов диссертационной работы Губарева Ф.А. использовалась в лабораторном практикуме по дисциплине «Optical Methods in Biology and Medicine» и научно-исследовательской работе студентов при подготовке магистров по образовательной программе «Biomedical Sciences and Engineering (на английском языке).

Директор Исследовательской школы
химических и биомедицинских технологий,
д.х.н.

М.Е. Трусова