

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт неразрушающего контроля
 Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника
 Кафедра промышленной и медицинской электроники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Визуализация процессов получения нанопорошков с помощью лазерного монитора

УДК 621.373.826

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1AM41	Федоров Кирилл Валерьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ПМЭ	Г.С. Евтушенко	д.т.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой менеджмента	Н.О. Чистякова	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Ю.В. Анищенко	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПМЭ	Ф.А. Губарев	к.ф.-м.н., доцент		

Томск – 2016 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Использовать результаты освоения фундаментальных и прикладных дисциплин ООП магистратуры; понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения; демонстрировать навыки работы в научном коллективе, порождать новые идеи;
P2	Анализировать состояние научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников; определять цели, осуществлять постановку задач проектирования приборов нанoeлектроники, схем и устройств различного функционального назначения с использованием современной электронной базы нанoeлектроники, подготавливать технические задания на выполнение проектных работ;
P3	Формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с перспективами развития электроники, а так же смежных областей науки и техники, обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач;
P4	Осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно -измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени; разрабатывать физические и математические модели элементов нанoeлектроники, компьютерное моделирование исследуемых физических процессов, приборов, схем и устройств, относящихся к профессиональной сфере;
P5	Делать научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научно-технические отчеты, обзоры, рефераты, публикации по результатам выполненных исследований, доклады на научные конференции и семинары, научные публикации в центральных изданиях и заявки на изобретения;
P6	Работать в качестве преподавателя в образовательных учреждениях среднего профессионального и высшего профессионального образования по учебным дисциплинам предметной области данного направления под руководством профессора, доцента или старшего преподавателя.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень. Самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности;
P8	Использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов. Участвовать в проведении технико-экономического и функционально-стоимостного анализа рыночной эффективности создаваемого продукта;
P9	Разрабатывать планы и программы инновационной деятельности в подразделении, проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности;
P10	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов;
P11	Обладать способностью к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной

	деятельности
--	--------------

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
Кафедра промышленной и медицинской электроники

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

Губарев
(Подпись) (Дата)

Ф.А.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1AM41	Федорову Кириллу Валерьевичу

Тема работы:

Визуализация процессов получения нанопорошков с помощью лазерного монитора	
Утверждена приказом директора ИНК	№ 2819/с от 06.05.2015 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	В данной работе проводятся исследования по диагностики быстропротекающих процессов, экранированных от наблюдателя мощной фоновой засветкой. Устройство найдет применение при фундаментальном изучении быстропротекающих процессов, диагностике технологических процессов и при демонстрации в учебных целях
---------------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	В ходе работы требуется исследовать три основных метода визуализации с помощью малогабаритного усилителя яркости на парах CuBr: метод лазерной подсветки, использование активной оптической фильтрации, теневая съемка. Разработать тестовый объект, который бы можно было использовать для настройки оптических схем и системы синхронизации в лабораторных условиях.	
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>		
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы		
Раздел	Консультант	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Чистякова Н.О	
Иностранный язык	Мыльникова Т.С.	
Технический раздел	Тригуб М.В.	
Социальная ответственность	Анищенко Ю.В.	
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:		
Результаты визуализации (Results of imaging)		

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ПМЭ	Евтушенко Г.С.	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1AM41	Федоров Кирилл Валерьевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 94 с., 37 рис., 22 табл., 38 источников, 1 прил.

Ключевые слова: CuBr-лазер, усилитель яркости, лазерная подсветка, теневая съемка, визуализация, наноматериалы

Объектом исследования являются: Оптические методы неразрушающего контроля

Цель работы – Провести визуализацию процесса получения наноматериалов методом лазерного испарения. В ходе работы исследуются три основных метода визуализации с помощью малогабаритного усилителя яркости на парах CuBr: метод лазерной подсветки, использование активной оптической фильтрации, теневая съемка. Разработать тестовый объект, который бы можно было использовать для отстройки оптических схем и системы синхронизации в лабораторных условиях.

В процессе исследования проводились эксперименты по визуализации процесса взаимодействия мощного потока лазерного излучения с веществом. В ходе экспериментов применялись три различные методики визуализации.

В результате исследования была показана возможность и актуальность использования малогабаритного CuBr-лазера для визуализации быстротекущих процессов, экранированных от наблюдателя фоновой засветкой. Было показано, что за счет уникальных свойств среды лазера на парах бромида меди возможно проводить качественный и количественные анализы процесса получения наноматериалов с помощью трех различных методик оптического контроля, которые дополняют друг друга при получении полной информации о процессе. Были получены новые знания, связанные с физикой образования нано и субмикронных частиц в ядре лазерного факела.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: усилители яркости на парах бромида меди излучают в узком спектральном диапазоне на длинах волн 510,5 нм и 570,8 нм. Типичная частота следования импульсов составляет 20 кГц при длительности импульса порядка 20 нс.

Степень внедрения: С участием автора разработан лабораторный макет устройства

Область применения: Фундаментальные исследования процессов взаимодействия высоких потоков энергии в веществе, промышленное производство (сварка, производство наноматериалов), демонстрация природы протекания процессов в учебных целях

Экономическая эффективность/значимость работы: При экономической оценке готовности проекта к коммерциализации было показано, что он имеет хороший потенциал для вывода на рынок услуг

В будущем планируется Разработка новых методик визуализации высокоэнергетических и быстротекущих процессов, например с использованием биатомной схемы лазерного монитора. Теоретический расчет предельных температур для процессов, которые могут быть исследованы с помощью усилителя яркости на парах CuBr.

Введение

В настоящее время востребованными становятся системы, позволяющие визуализировать процессы с высоким временным разрешением. На рынке появляются скоростные регистраторы, обеспечивающие большие скорости съемки – до $2 \cdot 10^6$ кадров/с. Однако ряд процессов, в частности, получение новых материалов, в том числе наноструктурированных, обработка материалов и модификация поверхностей, нанесение покрытий, лазерное воздействие на биологические объекты, получение материалов с заданными свойствами при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) и др. связаны с воздействием высококонцентрированных потоков энергии с объектами. Все эти процессы характеризуются наличием широкополосной фоновой засветки и высокой скоростью протекания. Как следствие, их наблюдение затруднительно с помощью традиционных методов визуализации – высокоскоростная съемка, микроскопия и др.

Одним из примеров подобных процессов является получение наноматериалов путем лазерного испарения мишени. В данном случае при воздействии мощного лазерного излучения на подложку, которая обычно представляет собой сплав необходимого материала, образуется лазерный факел. Типичная температура в ядре лазерного факела составляет несколько десятков тысяч градусов кельвина. Во время развития лазерного факела происходит множество процессов, которые к настоящему моменту представляют как фундаментальный так и технологический интерес. Так, например, для улучшения технологии получения наноматериалов необходимо иметь представление о соотношении крупных (субмикронных)

частиц, которые являются побочным продуктом производства и нанопорошка, выделяющихся в процессе лазерной абляции. Кроме того необходимо знать такие вещи как: скорость разлета вещества, процесс образования наночастиц (испарением и дальнейшим остыванием или выбиванием с подложки), влияние мощности и времени аблирующего импульса на количество выбиваемых субмикронных частиц. Такие данные невозможно получить с помощью типичной высокоскоростной регистрации.

Для решения подобных задач используют различные методы визуально-оптического контроля (ВОК), среди которых наиболее часто применяют метод лазерной подсветки. Метод лазерной подсветки подразумевает использование как скоростной видеокамеры, так и источника высокоинтенсивного импульсно-периодического когерентного света для подсветки лазерного факела. При этом, к источнику подсветки предъявляется ряд требований. Во первых, это малая длительность импульса генерации, которая необходима как для стробирования изображений, так и для временной фильтрации. Во вторых, это узкий спектральный диапазон, который необходим для спектральной фильтрации. В третьих это высокая частота следования импульсов для повышения временного разрешения. Для этой цели хорошо подходит лазер на парах бромида меди, который может генерировать лазерные импульсы длительностью десятки наносекунд с частотой следования до 700 кГц и длительностью порядка 20нс в видимом диапазоне спектра ($\lambda = 510,6$ нм и 578,2 нм). Ширина спектральных линий при этом составляет порядка 5пкм. Так же, среда лазера на парах металла может быть использована для создания активной оптической системы – лазерного монитора, когда освещение объекта и усиление отраженного от объекта сигнала, несущего изображение, осуществляются одним и тем же активным элементом. При этом за счет узкой линии усиления активного элемента удастся достигнуть «глубокой» спектральной фильтрации изображения и практически

полностью избавиться от влияния фоновой засветки высокой интенсивности.

В случае исследования лазерного факела так же будет интересна теневая картина, позволит получить множество необходимых данных, которые касаются процесса парообразования и остывания в лазерном факеле, распространения ударной волны и так далее. В качестве источника подсветки для реализации теневой съемки засвеченных объектов может так же выступать лазер на парах бромида меди. В отличие от типично используемых при теневой съемке осветителей, CuBr-лазер будет обеспечивать необходимый для быстропротекающих процессов стробирующий эффект.

Настоящая работа нацелена на комплексное исследование применения малогабаритного лазера на парах бромида меди для скоростной визуализации получения наноматериалов методов лазерного испарения мишени. В данном случае необходимо проанализировать использование лазера на парах бромида меди для каждого из методов визуализации: теневой съемки, метода лазерной подсветки и съемки в лазерный монитор.

1. Методы синтеза нано-порошков

На сегодняшний день исследования в области нано-технологий считаются наиболее приоритетными. Необходимой составляющей этих исследований является синтез нанопорошков и других нанообъектов (нанопластины, нанотрубки, нанопоры). В последние годы интерес к этим объектам резко возрос благодаря многочисленным исследованиям, показавшим, что при переходе от микро к нано-частицам происходит качественное изменение многих физико-химических свойств веществ: температуры плавления и затвердевания; растворимости; давления, необходимого для перестройки кристаллической структуры; характера кинетики химических процессов, протекающих на поверхности частиц [1]. Это связано с тем, что для частиц, размеры которых хотя бы по одному из направлений соизмеримы (или меньше) с радиусом корреляции какого-либо физического или химического свойства (длиной свободного пробега электронов, размером зародыша новой фазы, размером магнитного домена, длиной электромагнитной волны и т.д.), начинают проявляться размерные эффекты [2–6]. Наличие подобных специфических свойств служит основанием для рассмотрения ультрадисперсного состояния как пятого состояния вещества [7]. Специфические свойства наночастиц обусловлены тем, что доля атомов, находящихся на поверхности, сопоставима с общим числом атомов, составляющих частицу. Например, для частиц размером около 1 нм, по форме близких к сферическим, отношение числа поверхностных и внутренних атомов составляет ~ 1 . При увеличении размера d (до десятков нанометров [6], а в некоторых случаях и до нескольких микрон) влияние этого отношения на свойства вещества еще остается достаточно сильным, хотя доля поверхностных атомов уменьшается.

Поскольку УДС занимают промежуточное положение между истинными растворами и макросистемами, существуют два общих подхода к их получению – технологии основанные на химических процессах и технологии основанные на физических процессах. Так, к процессам химического получения нанопорошков можно отнести разложение нестабильных соединений, химическое осаждение из паровой фазы и т.д. Процессы же основанные на физических методах включают в себя такие актуальные технологии как лазерная абляция материалов, взрывное испарение (взрыв электропроводника, электродуговой разряд). Подробный список методов получения нанопорошков показан на рисунке 1.



Рисунок 1 - Методы получения нанопорошков

1.1 Получение нано-порошков методом лазерного испарения

Из приведенных методов наиболее универсальными считаются методики осаждения из паровой фазы, которые обладают такими преимуществами как чистота и малые размеры получаемых частиц, доступность исходных материалов. Наиболее дешевым и компактным инструментом, способным обеспечить нагрев материала до температуры испарения (вплоть до 3000-4000K) является лазер. Теоретические, экспериментальные и технологические результаты по взаимодействию лазерного излучения с веществом описаны в монографиях [10-12]. С помощью CO₂-, Nd:YAG-, и эксимерных лазеров были получены нанопорошки различных материалов [13], в том числе тугоплавких: Al₂O₃ и ZrO₂ [14, 15]. Авторы [13] приводят основные параметры процесса испарения, позволяющие регулировать размеры получаемых частиц. Метод заключается в импульсном лазерном испарении металлов в камере, содержащей необходимое количество газа-реагента, и контролируемой конденсации частиц на подложке. Схема установки синтеза представлена на рис. 12. В ходе диффузии атомов металла от мишени до подложки происходит взаимодействие металла с газом и образование требуемого соединения (например, оксида, в случае O₂, нитрида – в случае N₂ или NH₃, карбида – в случае CH₄ и т.д.). Например, этим методом получен наноксид титана по реакции: $Ti + O_2 = TiO_2$ [12].

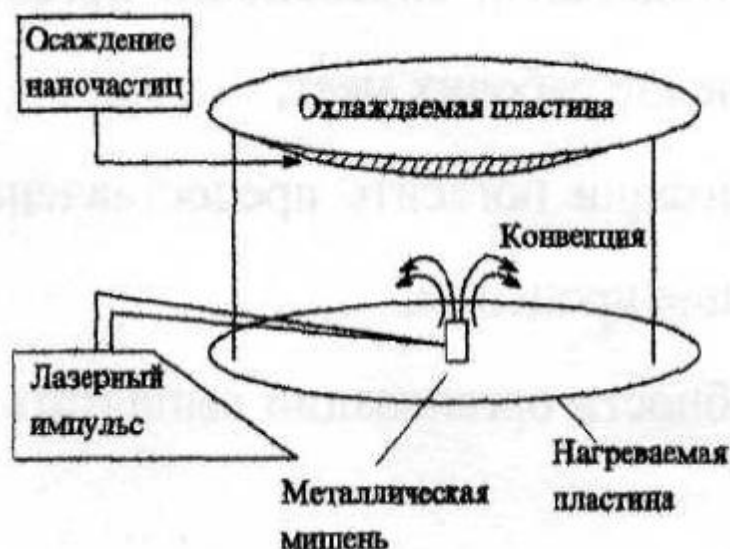


Рисунок 1 - Схема установки синтеза наночастиц методом лазерного испарения металлов

Данный метод дает возможность получить наночастицы смешанного состава, такие как смешанные оксиды/нитриды и карбиды/нитриды и смеси оксидов различных металлов. Наряду с газом реагентом камера наполняется инертным газом (He или Ar) при давлении $10^{-2} - 1$ Торр, способствующим созданию условий стационарной конвекции между подогреваемой нижней пластиной и охлаждаемой верхней пластиной. Образование нового соединения происходит за счет взаимодействия «горячих» атомов металла с молекулами газа, сопровождающегося потерей энергии образовавшихся молекул при столкновении с молекулами инертного газа. Непрореагировавшие атомы металлов и образовавшиеся молекулы нового соединения попадают в результате конвекции в зону кристаллизации на охлаждаемой верхней пластине. Изменяя состав смеси инертного газа-носителя и газа-реагента в камере и варьируя температурный градиент и мощность лазерного импульса, можно контролировать элементный состав и размеры получаемых наночастиц.

В России исследованием получения нанопорошков сложных оксидов с помощью мощного лазерного излучения занимаются в Институте Электрофизики УрО РАН. При использовании импульсно-периодического лазера «ЛАЭРТ» со средней мощностью излучения 600Вт производительность получения наночастиц Nd:Y₂O₃ составляет 30г/час, а их средний размер равен 14нм[16,17]. На данный момент они так же используют волоконные иттербиевые лазеры ($\lambda=1,07\mu\text{м}$) с КПД=25%. Однако при испарении излучением волоконного лазера мощностью 600Вт мишени из Nd:YAG ее поверхность становилась неровной, что снижало производительность получения наночастиц[18]. При испарении в этих же условиях мишени из Nd:Y₂O₃ так же образуется частокол из покрытых оплавом иглообразных выступов высотой, до 6мм и производительность получения этих частиц в первых экспериментах была только 15-16г/час. В [18] было предложено, что образование неровностей возможно связано с возникновением кинжального режима испарения мишени. Однако, с другой стороны, под воздействием импульса излучения волоконного лазера мощностью 700Вт и плотностью мощности $I=0,48\text{Вт/см}^2$ образуется кратер в ~8 раз более глубокий в сравнении с импульсом CO₂ лазера той же энергии(~1Дж). При этом масса вещества удаленного из мишени с помощью волоконного лазера в 5 раз больше. Приведенные факты, по мнению авторов, косвенно указывают на то, что под действием излучения волоконного лазера и CO₂ лазера вещество из мишени удаляется за счет различных механизмов. Возможно, при воздействии волоконного лазера образование происходит за счет разбрызгивания жидкого расплава, а не путем испарения, как в случае CO₂ лазера. Кроме того появляется интерес, в целом, выяснить условия образования наночастиц в лазерном факеле. По этому актуальной задачей является исследование с помощью высокоскоростной съемки распространения в воздух лазерного факела, образующегося при воздействии импульса излучения волоконного лазера на мишени. В частности интерес представляют такие параметры факела,

как скорость разлета нано и суб-наночастиц, размеры частиц, спектр электромагнитных волн излучаемых веществом, количество получаемого вещества и количество мусора (крупных осколков, сколов). Все эти характеристики привязываются к таким параметрам как тип используемого лазера, длительность и мощность импульса, аблируемое вещество (подложка).

2. Методы визуально оптического контроля засвеченных объектов

В настоящее время развитие новых технологий в целом связано с использованием мощных потоков энергии (лазерное излучение, потоки частиц и т.д.), которые взаимодействуют с различными объектами. К ним можно отнести плазмоиндуцированные процессы, модификацию поверхностей материалов с целью улучшения эксплуатационных характеристик, получение новых материалов, в том числе наноструктур, процессы сварки и т.д. При этом для выявления дополнительной информации, позволяющей, например, оптимизировать нанесение покрытий, необходимо наблюдать за состоянием поверхности непосредственно во время нанесения. Особенности таких процессов являются малые размеры области воздействия (в большинстве случаев), т.к., высокая плотность энергии создается путем ее фокусировки, наличие экранирующей засветки, интенсивность которой может достигать значительных величин (эквивалентная температура достигает нескольких десятков тысяч градусов), высокая скорость протекания. Такие особенности ограничивают возможность наблюдения в режиме реального времени подобных процессов. Для решения задачи визуализации наиболее предпочтительными являются методы визуально-оптического контроля (ВОК), основанные на анализе результатов взаимодействия светового потока с объектом контроля. По характеру взаимодействия различают методы прошедшего, отражённого, рассеянного и индуцированного

(люминесценция и флуоресценция) излучения. По технике исполнения к методам ВОК относятся теневая съемка, наблюдение интерференционной картины, голография, лазерная подсветка и системы с усилителями яркости изображения [19-24].

2.1 Обзор работ по высокоскоростной регистрации лазерного факела

Скоростная визуализация лазерного факела на данный момент актуальная задача для исследования в отечественных и зарубежных научных группах. Так, например в работе [25] лазерный факел, формируемый в процессе лазерного облучения исходных графитовых материалов, был зарегистрирован с помощью высокоскоростной видеокамеры “FASTCAM SA4” (компания “Photron”, Япония) с временным разрешением 50 000 кадров/с, что позволило оценить скорость движения фрагментов (частиц) эрозионного факела и определить основные этапы процесса воздействия излучения Glass:Yb, Er-лазера на исходный материал (графитсодержащий композит, ОСЧ-графит). Фотоизображения эрозионного факела на различных этапах процесса представлены на рис. 2, где а—в — области воздействия лазерного излучения на графитсодержащий композит: в начальный момент воздействия при $\tau=20$ мкс (а); при интенсивном удалении материала с поверхности при $\tau=15$ мс (б); по окончании воздействия, $\tau=30$ мс (в, е).

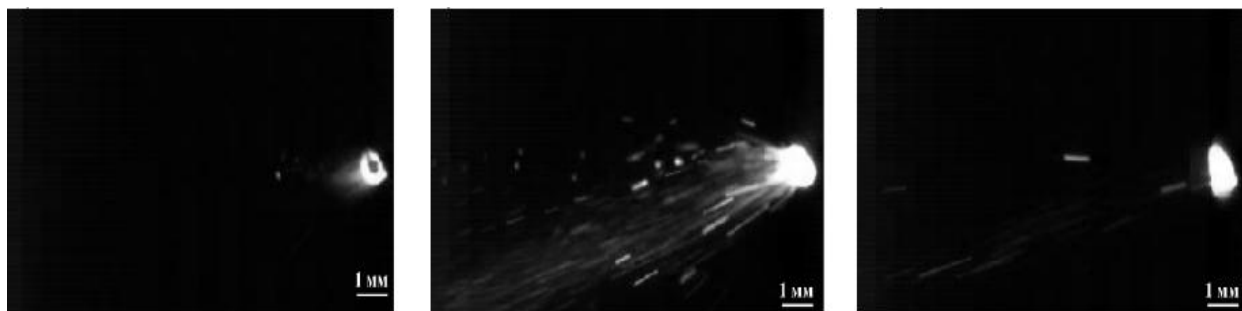


Рисунок 2 - Фотографии лазерного факела на различных этапах процесса

Как видно из рисунков наблюдение динамики лазерного факела в значительной степени осложнялось фоновой засветкой процесса, несмотря на то что для уменьшения этого эффекта авторами работ использовались нейтральные светофильтры, установленные перед объективом высокоскоростной камеры. Кроме того, использование нейтральных светофильтров значительно уменьшило минимальный размер регистрируемых частиц и можно говорить о том, что на фотографиях наблюдаются треки только от так называемого «мусора» - частиц субмикронного размера. Кроме того изображения получились достаточно размазанными, в следствии того, что скорость разлета субмикронных частиц очень велика и за время открытого затвора они проходят значительно расстояние за время открытого затвора. Тем не менее даже при таком качестве изображений авторам удалось сделать некоторые интересные выводы: процесс воздействия лазерного излучения на материал можно разложить на три этапа: на первом этапе происходит аккумуляция лазерной энергии исходным материалом; на втором этапе наблюдается интенсивное удаление исходного материала (эрозионный факел); на третьем этапе эрозионный факел „затухает“ по окончании лазерного воздействия. В экспериментах были определены продолжительность второго этапа и средние скорости движения фрагментов (частиц) эрозионного факела. Так, частицы начинают покидать поверхность образца спустя 10—20 мкс после начала лазерного воздействия и формируют эрозионный факел. Интенсивное свечение эрозионного факела наблюдается при лазерном воздействии в течение 20 ± 1 мс. Далее интенсивность свечения эрозионного факела уменьшается и регистрируется только равномерное свечение поверхности образца. Было установлено, что средняя скорость движения частиц, удаляемых с поверхности графитсодержащего композита, достигает $1,5 \pm 0,2$ м/с.

В работе [26] китайских ученых были продемонстрированы фотографии процесса взаимодействия мощного Nd³⁺:YAG лазера ($t_i=1$ мс,

$W = 7,38 \text{ Дж}$) с силиконовой подложкой полученные методом интерференционной картины и теневой съемки. Схема экспериментальной установки используемой в работе показана на рисунке 3. Как видно, в работе использовался дополнительный лазер для подсветки области интереса (Тип лазера авторами не указан).

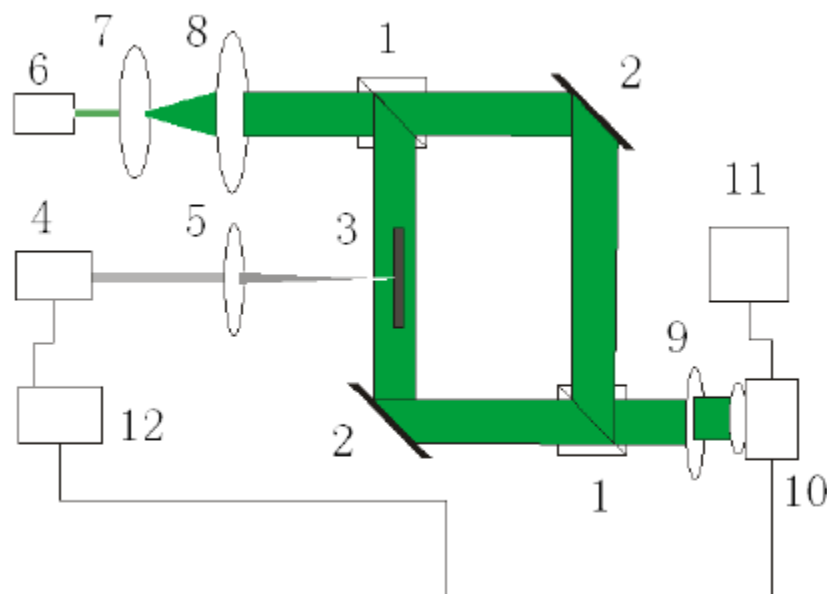


Рисунок 3 - Экспериментальная установка 1. Разделитель пучка 2. Зеркало $K_0=100\%$ 3. Силиконовая подложка 4. Nd³⁺: YAG лазер 5. Фокусирующая линза 6. Подсвечивающий лазер 7-8. Расширитель пучка 9. Интерференционный фильтр 10. высокоскоростная CCD-камера 11. Персональный компьютер.12. Система синхронизации DG535.

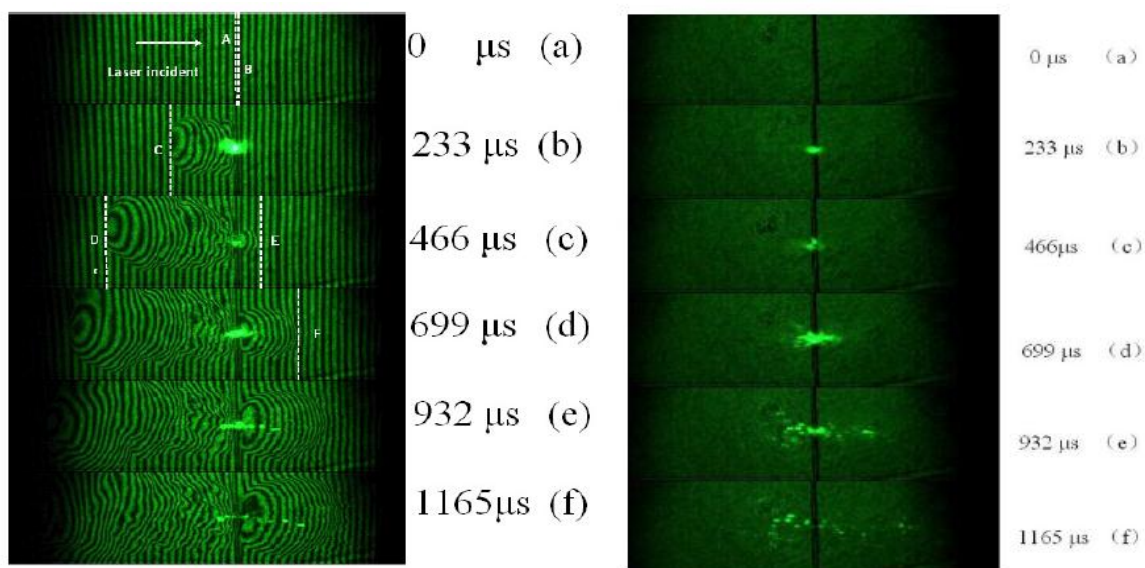


Рисунок 4 - Результаты эксперимента: а - интерференционная картина, б - теневая съемка

Так же интересная работы была проделана другими китайскими учеными. В работе [27] они описывают метод так называемой улучшенной лазерно-индуцированной спектроскопии (Laser induced breakdown spectroscopy-LIBS). В типичном случае LIBS представляет собою регистрацию спектров факела при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом для детального анализа выносимых с подложки частиц. В данном же случае под «улучшенной LIBS» авторы подразумевали эффект повторного освещения лазерного факела с помощью вспомогательного источника для так называемой «реабляции частиц». В качестве абблирующего лазера выступал KrF эксимерный лазер (248нм), в качестве источника подсветки Nd:YAG лазер (532нм). Кроме того авторами регистрировалось так называемое временное развитие лазерного факела. Т.е., авторы сделали серию фотографий не одного импульса, а нескольких, но при этом каждый раз изменяя временную задержку между импульсом испаряющего лазера и подсвечивающего.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 5. Результаты экспериментов – на рисунке 6. Таким образом, используя

лазерную подсветку авторы авторам удалось зарегистрировать разлет наночастиц в ходе лазерной абляции мишени. К сожалению в статье не было дано пояснение, какой тип рассеяния наблюдается: Релеевское рассеяние на частицах, размер которых много меньше длины волны, или же рассеяние Ми на крупных частицах. Кроме того, моделирование временного развития факела несомненно уступает съемке в реальном времени, поскольку на процесс могут оказывать влияние различные факторы. Так же стоит отметить наличие фоновой засветки при задержке между подсвечивающим лазером и аблирующим в 1мкс, не смотря на достаточно низкую энергию в импульсе KrF лазера – 200мДж.

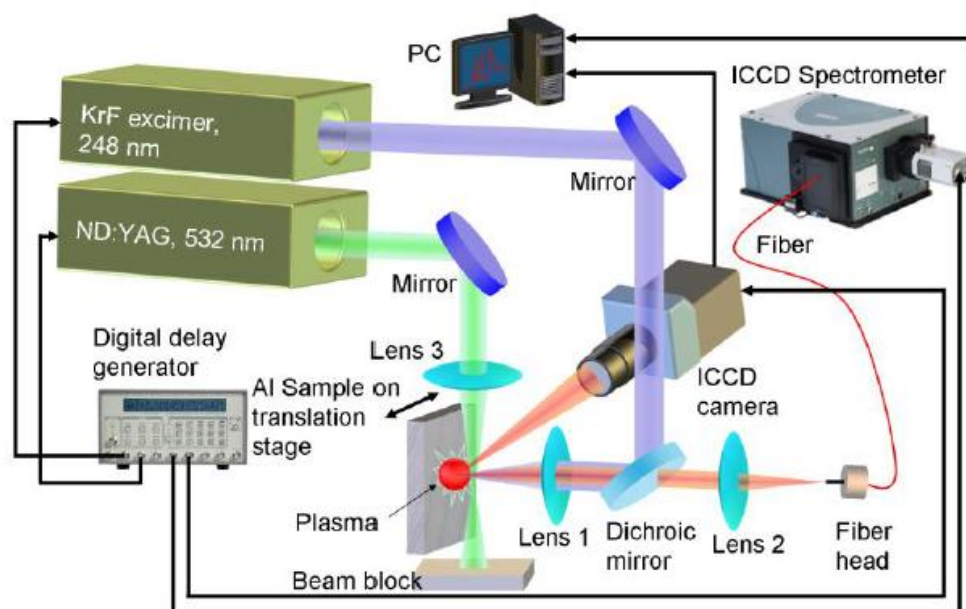


Рисунок 5 - Структурная схема эксперимента улучшенной лазерно-индуцированной спектроскопии

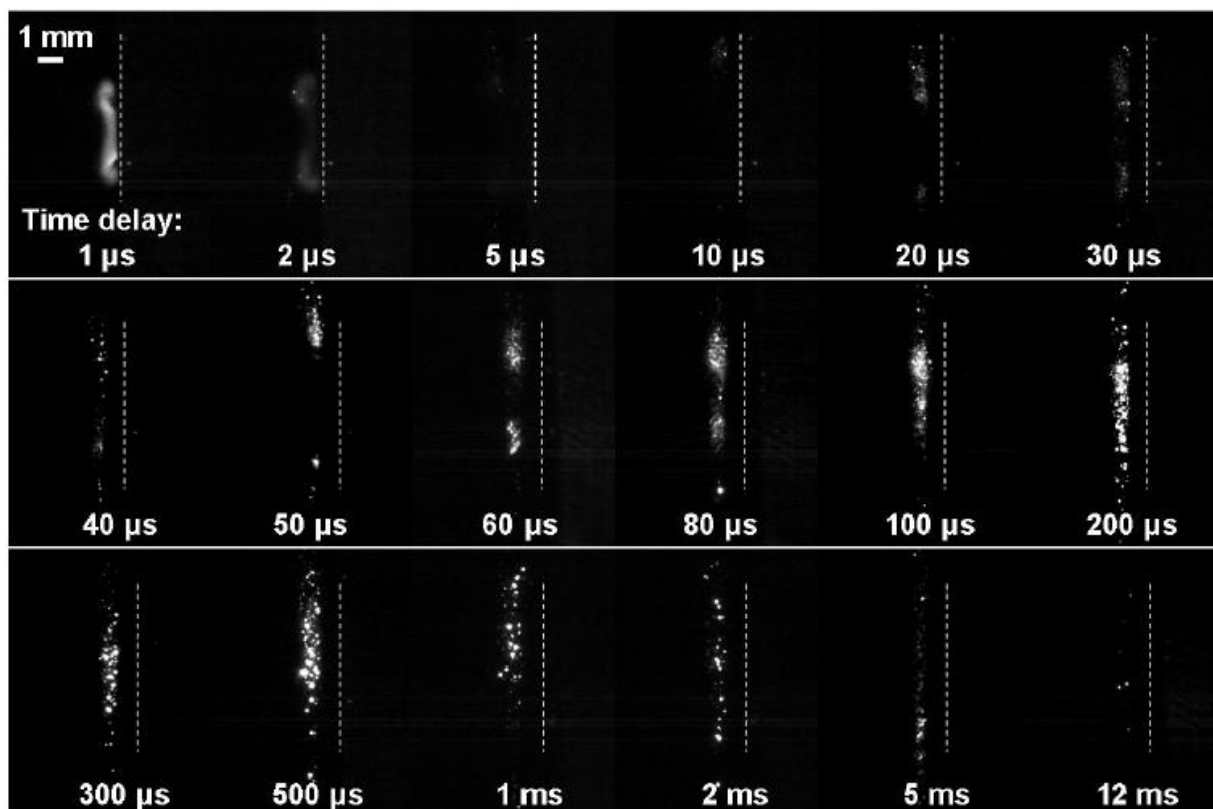


Рисунок 6 - Оптическое рассеяние на суб-наноразмерных частицах, полученное после подсветки Nd:YAG-лазером (532нм). Пунктиром показано положение подложки.

Наиболее полная работа на данный момент по возможностям визуализации лазерного факела проведена в Испании [28]. В ходе нее, помимо расчета яркостной температуры лазерного факела, анализа формы факела и прочих теоретических исследований была проведена регистрация процесса лазерной абляции с помощью теневого метода, а так же с помощью лазерного рассеяния. Причем, авторы отдельно регистрировали Реллеевское рассеяние на наноразмерных частицах и рассеяние Ми на микронных частицах, которые можно считать побочным материалом в процессе синтеза нанопорошка. На рисунке 7 приведена структурная схема эксперимента.

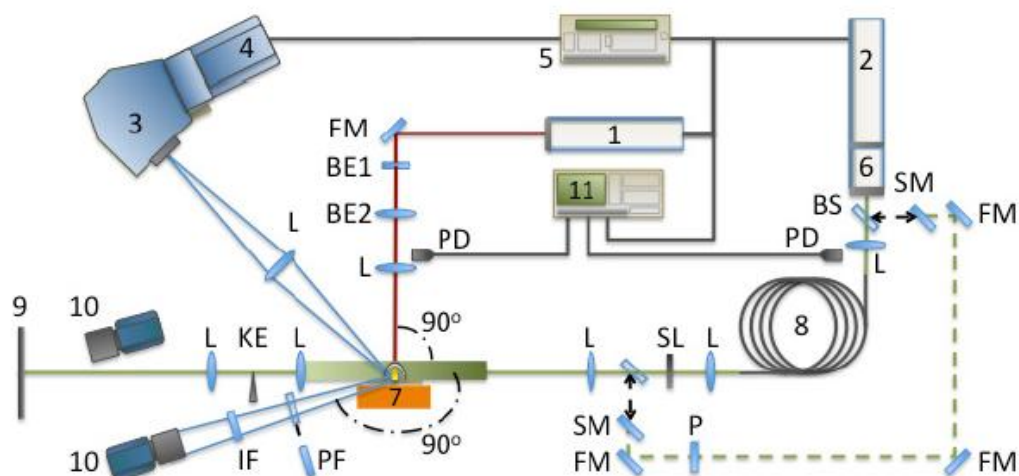


Рисунок 7 - Экспериментальная установка: 1,2 Nd:YAG лазер, 3 спектрограф, 4 iCCD камера, 5 цифровой генератор задержки 6 генератор второй гармоники, 7 образец, 8 оптоволоконный кабель, 9 экран, 10 CMOS камера, 11 осциллограф, BE1, BE2 расширитель пучка, BS разделитель пучка, FM Непрозрачное зеркало, IF интерференционный фильтр, KE лезвие ножа, L линза, P поляризатор, PF поляризационный фильтр, PD скоростной фотодиод, SL 25 μm щель, SM плоско-параллельная пластина.

Как видно из схемы, абляция и подсветка объекта осуществлялась с помощью Nd:YAG лазера. При необходимости устанавливалась схема для реализации второй гармоники для подсвечивающего лазера. Одной камерой с экрана 9 снималась теневая картина. Другая камера настраивалась непосредственно на объект для съемки в рассеянном свете. На рисунке 8 показана серия снимков характеризующая временное развитие факела в Ми-рассеянном свете. На рисунке 9 – серия изображений в реллеевском рассеянии на частицах. Как предполагают авторы, в данном случае релеевское рассеяние будет заметно только на частицах размером менее 27нм. Как видно индуцированное рассеяние на малых частицах полностью исчезает спустя 20мкс после импульса, в то время как рассеяние Ми на крупных частицах остается. Из приведенных изображений видно, что при достаточно высокой энергии аблирующего

импульса (850мДж за 6 нс) область ядра факела в начальные моменты времени, до 1нс, была полностью засвечена.

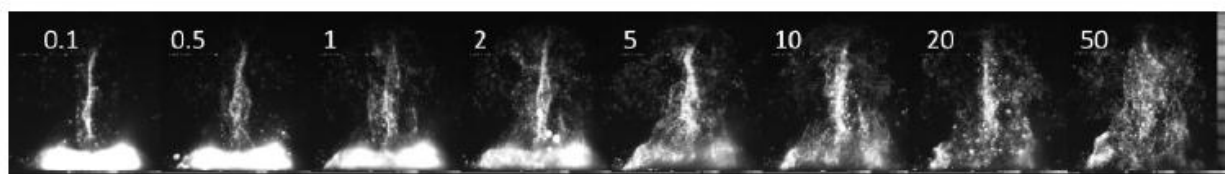


Рисунок 8 - Временное развитие лазерного факела демонстрирующее образование частиц. Рассеяние света по теории Ми



Рисунок 9 - Временное развитие лазерного факела демонстрирующее образование частиц. Релеевское рассеяние.

На рисунке 10 показаны кадры процесса, полученные теньвым методом, которые в целом дополняют картину развития лазерного факела. Целью авторов было зафиксировать ударную и звуковую волну, а так же вычислить скорость ее распространения.

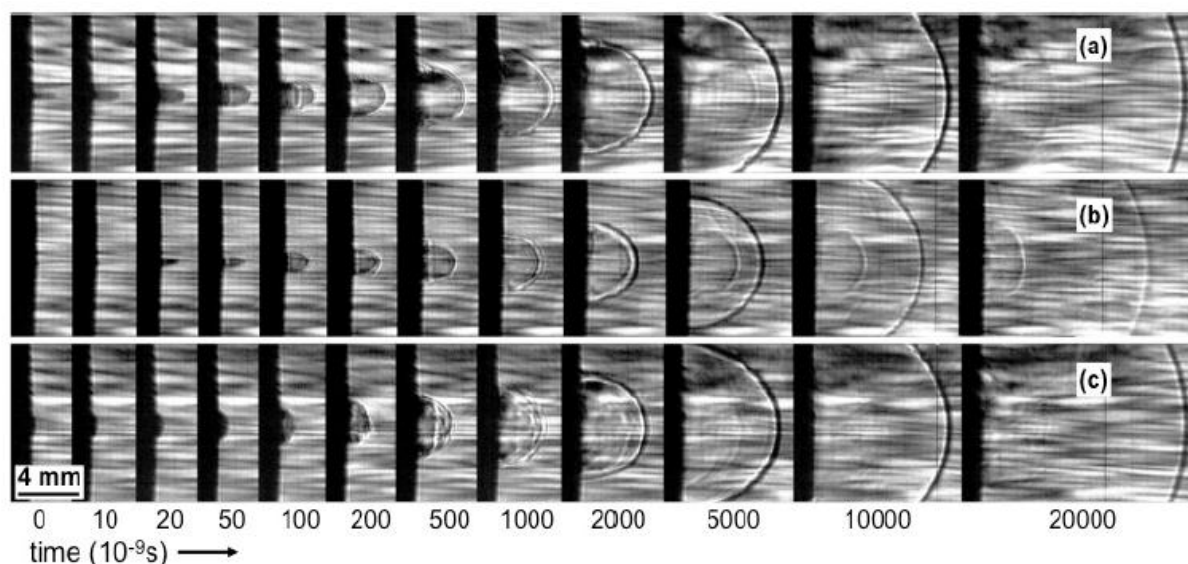


Рисунок 10 - Съемка оптической неоднородности лазерного факела теньевым методом, полученно при взаимодействии 6 наносекундного лазерного импульса и энергией (а) 500мДж на 0.8 мм, (б) 50мДж на 0.8мм и (в) 500мДж на 2.5мм. Изображение было обработано вручну для улучшения контраста.

Следующий эксперимент по съемке процесса получения нанопорошков был описан в работе [29], где американскими учеными был исследован процесс разлета частиц с кремниевой подложки при использовании мощного наносекундного лазера. На рисунке 11 показана экспериментальная установка используемая в работе. В данном случае авторы использовали две техники для получения изображения в условиях фоновой засветки: 1 – использование непрерывного полупроводникового лазера для преодоления засветки и отслеживания траектории частиц; 2 – теньевой метод, с использованием двух лазеров и поляризационного фильтра. Два лазера запускались с разной задержкой относительно аблирующего излучения для наблюдения динамики лазерного факела в двух кадрах, поляризационный фильтр пропускал только лазерное излучение, не пропуская фоновую засветку.

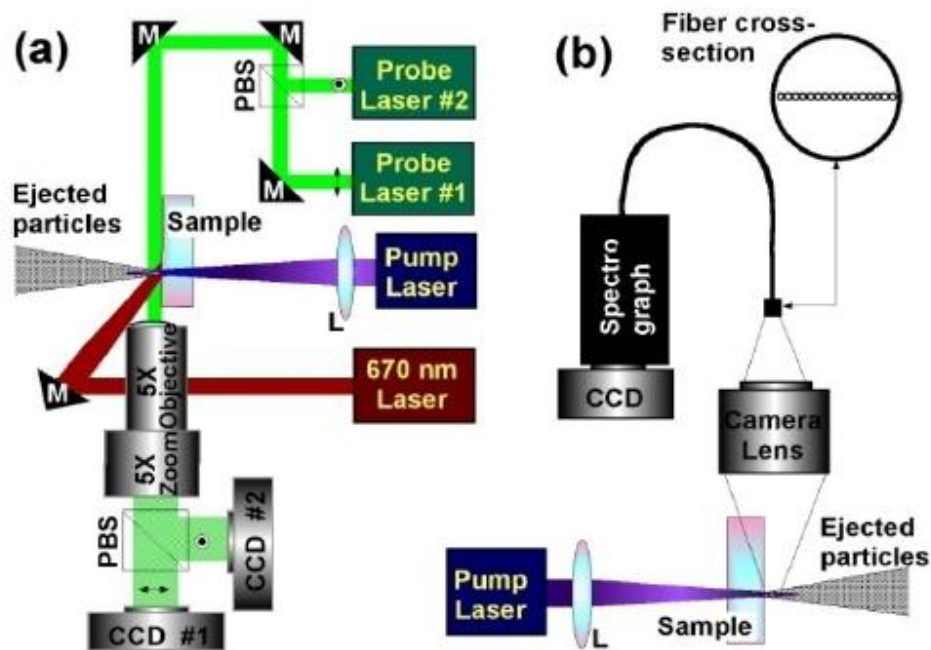


Рисунок 11 - Схема экспериментальной установки. (a) Установки для съемки в теновом методе и методе подсветки. L = фокусирующая линза, М - зеркало, PBS = поляризационный разделитель пучка. (b) Установка для спектроскопии.

На рисунке 12 показаны результаты визуализации с помощью лазерной подсветки в непрерывном режиме. Как видно, большая часть процесса оказалась засвечена, тем не менее авторы имели возможность наблюдать траекторию разлета частиц.

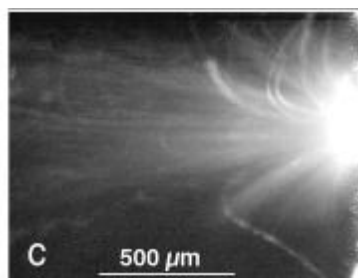


Рисунок 12 - Результаты визуализации разлета частиц с кремниевой подложки. Подсветка осуществлялась непрерывным диодным лазером.

На рисунке 13 результаты теневой съемки. Изображения были предварительно обработаны в редакторе. Несмотря на то, что частота лазерного излучения позволяла регистрировать всего два импульса в факеле, изображения получились достаточно информативными и позволяют в полной мере оценить размеры разлетающихся частиц. В частности, на рисунке a2 имеет место быть разлет так называемого мусора, или субмикронным частиц.

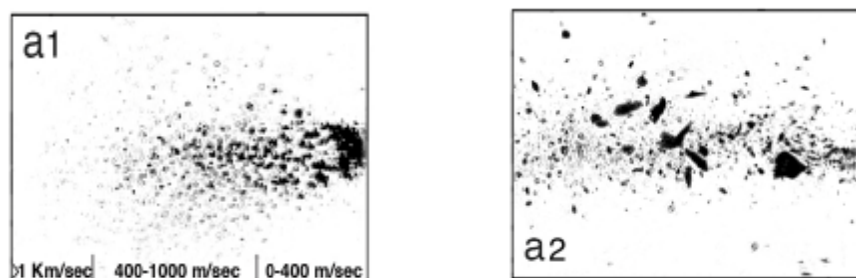


Рисунок 13 - Изображение процесса разлета частиц. Снимки сделаны спустя 1мкс(a1) и 20мкс(a2) относительно прихода аблирующего излучения.

В Институте Электрофизики УрО РАН так же активно занимались визуализацией процесса получения нанопорошков с целью улучшения эффективности выработки. Основной целью исследований было как исследование процессов протекающих в лазерном факеле, так расчет размера выносимых с подложки частиц. Результаты исследований приведены в работе [30]. Все исследования проводились с помощью теневых методик. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 14.

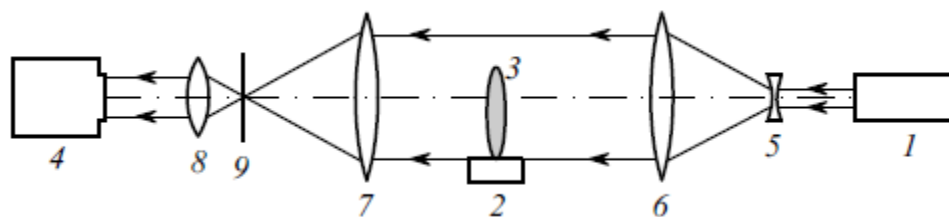


Рисунок 14 - Схема экспериментальной установки для теневого фотографирования лазерного факела: 1 – N2-лазер, 2 – мишень, 3 – лазерный факел, 4- пзс - камера, 5-8 - кварцевые линзы, 9 – диафрагма.

На рисунке 15 показаны результаты экспериментов. Полученные теньевые фотографии позволили авторам проследить динамику всех зон факела, в том числе и несветящихся. Авторами в работе были проведены съемки для различных типов мишеней, причем для каждой из них в широком диапазоне мощностей аблирующего излучения.

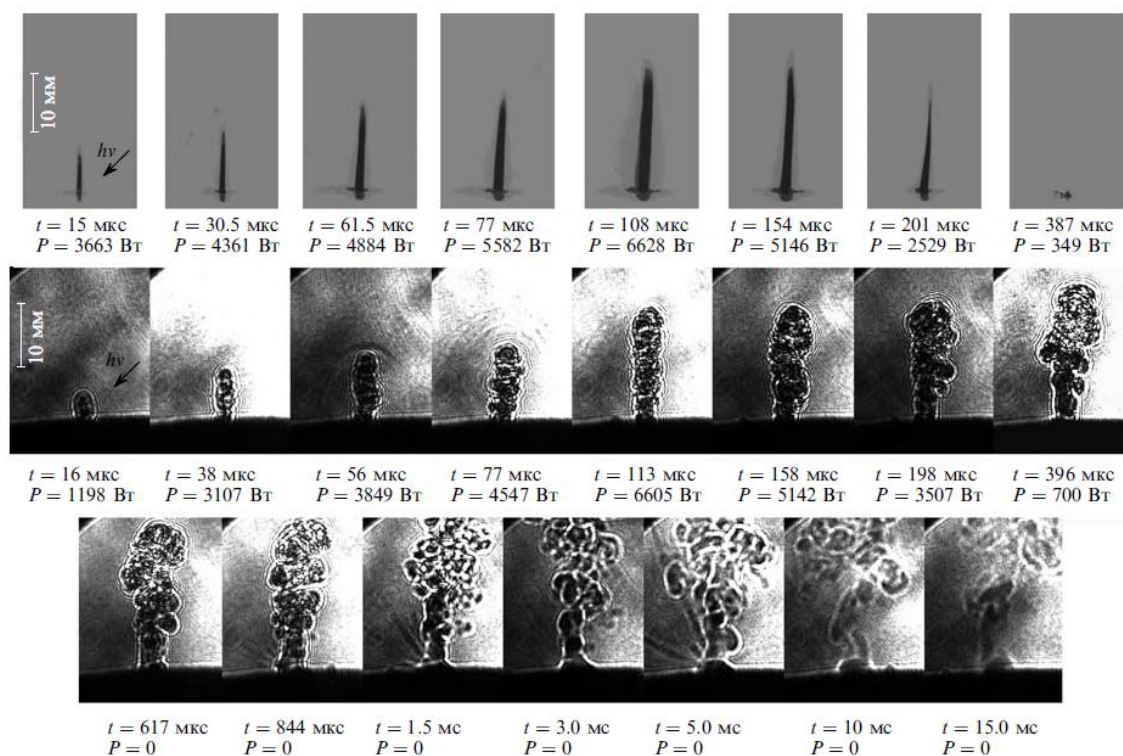


Рисунок 15 Кинограмма собственного свечения лазерного факела для YSZ мишени (верхний ряд снимков) и его теньевые изображения (два нижних ряда). Время отсчитывается от момента появления факела, для каждого снимка указано мгновенное значение мощности CO2 лазера.

Как видно из вышеперечисленных работ, на настоящий момент можно выделить две основные методики при съемке экранированных процессов. При этом качество проведенной работы можно оценивать с различных сторон. Во первых под качеством можно понимать временное разрешение всей системы. В приведенных работах оно зависело в меньшей степени от качества регистрирующей аппаратуры, поскольку возможности современных высокоскоростных CCD-камер позволяют снимать до нескольких миллионов кадров в секунду и данные технологии постоянно развиваются. В большей же степени временное разрешение зависело от возможности устройств подсветки. В данном случае необходим компромисс между мощностью лазерного источника, для преодоления высоких порогов фоновой засветки и частотой его работы. Так, например в ряде работ авторы могли зафиксировать только временное развитие лазерного факела [28], в то время как другим удавалось снимать процессы с достаточно хорошим временным разрешением. Так же, стоит отметить что во всех работах с использованием метода лазерной подсветки

2.2 Теневые методы визуально-оптического контроля

Теневые методы исследования оптических неоднородностей основаны на использовании явления отклонения света в прозрачных объектах и средах с изменяющимся показателем преломления (оптических неоднородностях). Данными методами измеряют с высокой точностью очень маленькие расстояния и толщины (неровности), показатель преломления света в объекте, а также другие физические и химические величины, связанные с ними. Кроме того, изучаются течения газа с высокими скоростями и температурами, которые имеют место быть, например, в ходе химических реакций, турбулентного перемешивания и горения. Так же, теневые методы дают возможность визуализации и

исследования звуковых и ударных волн для процессов высокой интенсивности.

Впервые теневой метод был предложен французским астрономом Леоном Фуко в 1858г. для контроля качества изготовления больших астрономических объективов высокой разрешающей силы [31]. Позднее, в 1864г., немецкий физик Август Теплер применил этот метод для исследования газовых неоднородностей [32], что по сути являлось лишь одним из применений экспериментальной установки Л. Фуко. Но большая ценность полученных результатов и особая роль на тот момент газовой динамики привели к тому, что к настоящему времени этот метод имеет три равноценных названия: «Метод Теплера», «Метод Фуко», «Шлирен метод» (от нем. Schlieren — оптическая неоднородность).

Основной принцип работы теневых методов таков: на некотором расстоянии от объектива размещается точечный источник света, а в том месте, где объектив дает изображение этого источника, ставится диафрагма в виде пластинки с острым прямолинейным краем (нож Фуко). Любая оптическая неоднородность S , поставленная на пути светового пучка, вызывает искажение волнового фронта, а, следовательно, идущий из этих участков свет будет отклоняться и проходить мимо ножа, попадая на экран (Рис. 16)

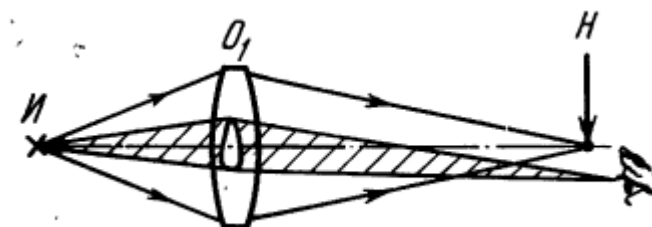


Рисунок 16 - Принцип действия теневого метода: И – источник света, О – объектив, Н – нож Фуко, Э – экран.

Схемы же большинства реальных приборов несколько сложнее представленных на рисунке 16. Почти в каждый из них введен дополнительный объектив, дающий на экране изображение неоднородности. Схема с одним объективом применяется достаточно редко, так как увеличиваются габариты экспериментальной установки и становится трудно использовать различные масштабы изображения. На рисунке 17 приведена одна из основных схем, предназначенная для качественных наблюдений. В данном случае, помимо линзы и ножа Фуко используется O_k – конденсор, который помогает избавиться от рассеянного света, $\mathcal{U}$ – щель, служащая для создания идеального точечного источника света, O_f – объектив, формирующий изображение. Кроме того, достаточно распространенными являются схемы с использованием зеркального объектива (Рис. 18).

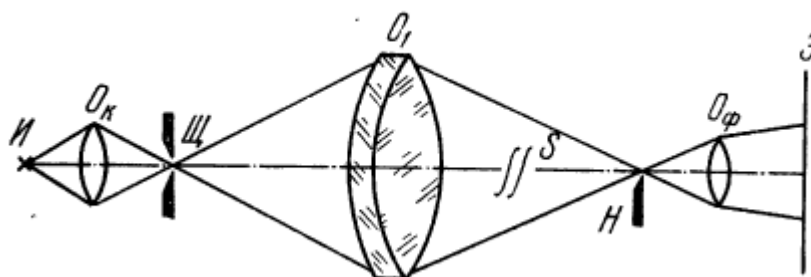


Рисунок 17 - Оптическая схема теневого прибора: O_k – конденсор, $\mathcal{U}$ – щель, ограничивающая источник света, S – исследуемая неоднородность, O_f – объектив формирующий изображение, $\mathcal{E}$ – экран.

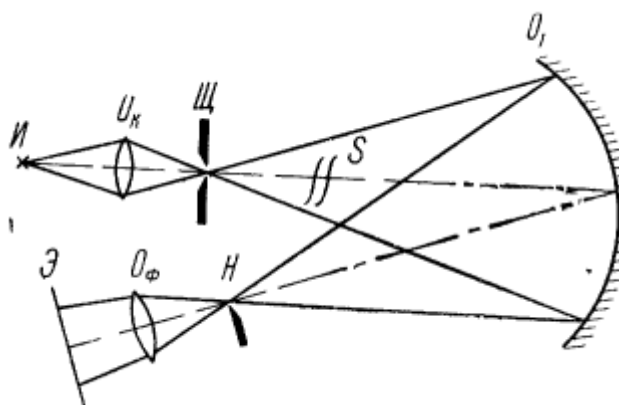


Рисунок 18 - Схема с использованием зеркального объектива.

Использование сходящегося и расходящегося пучка лучей неудобно для количественных исследований, так как одинаковые неоднородности дают разное смещение лучей в зависимости от того, в каком месте пучка они находятся, поэтому широкое распространение получили приборы с параллельным ходом лучей. Пример такого прибора показан на рисунке 19.

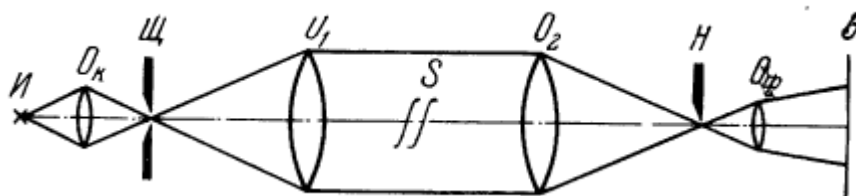


Рисунок 19 - Линзовый прибор с параллельным ходом лучей

Значительно увеличивается качество теневых съемок при увеличении интенсивности источника света, поскольку позволяет значительно сократить время выдержки, необходимое для фотографирования картины, и, следовательно, появляется возможность для фотографирования быстротекущих процессов, таких как звуковые и ударные волны.

Таким образом, необходимость формирования параллельных лучей, а так же высокой интенсивности излучения привела к тому, что в настоящее время для задач теневой визуализации быстротекущих процессов активно применяют различную лазерную технику.

К настоящему времени, теневые методы используются для визуализации любого типа прозрачных неоднородностей: анализ гидродинамических явлений, изучение конвективных потоков при теплообмене, контроль качества оптического стекла, исследование кристаллов различных минералов, центрифугирование, микроскопия, баллистика, авиационная техника. На рисунке 20 приведен пример теневой съемки при баллистических испытаниях пули калибром 4.5мм. На рисунке

21 – раскадровка видео, которое регистрировало процесс лазерной абляции с целью получения наноматериалов.



Рисунок 20 - Пример теневой съемки при балистических экспериментах

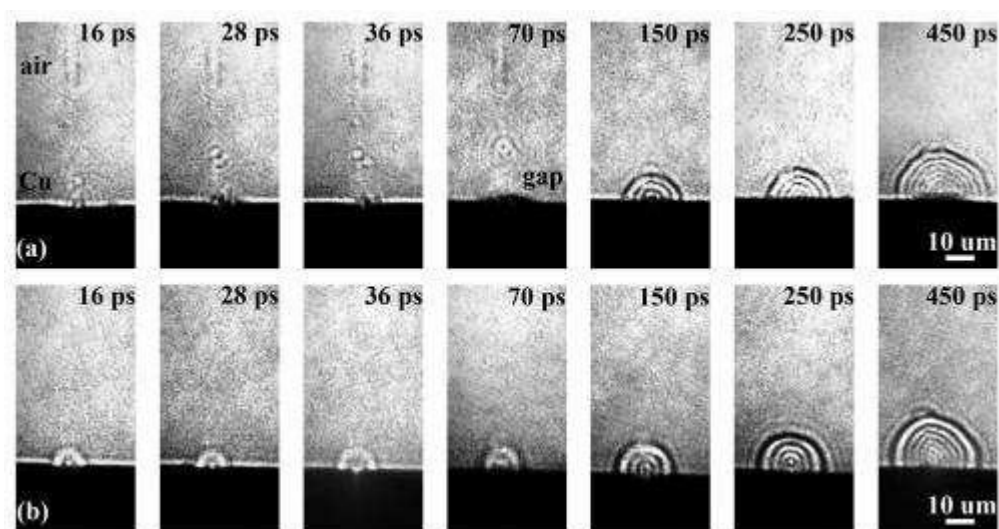


Рисунок 21 - Процесс лазерной абляции поверхности металла
высокомощным лазерным излучением

2.3. Метод лазерной подсветки

Как известно, объект, взаимодействуя с мощным потоком энергии, излучает свет в широком диапазоне длин волн, который зависит от температуры реакции, а так же от состава вещества. В то же время

лазерное излучение обладает рядом отличительных особенностей, таких как – высокие пространственная, временная и спектральная плотность излучения. Рисунок 22 иллюстрирует эффект большей пространственной и спектральной плотности лазерного излучения в сравнении с типичной фоновой засветкой от объекта. Таким образом, если освещать объект с помощью лазерного источника и установить пассивный фильтр на необходимую длину волны перед объективом регистрирующей аппаратуры мы можем значительно снизить интенсивность фоновой засветки, в то время как интенсивность рассеянного лазерного излучения останется практически прежней (Рис. 23). Данная техника называется спектральной фильтрацией.

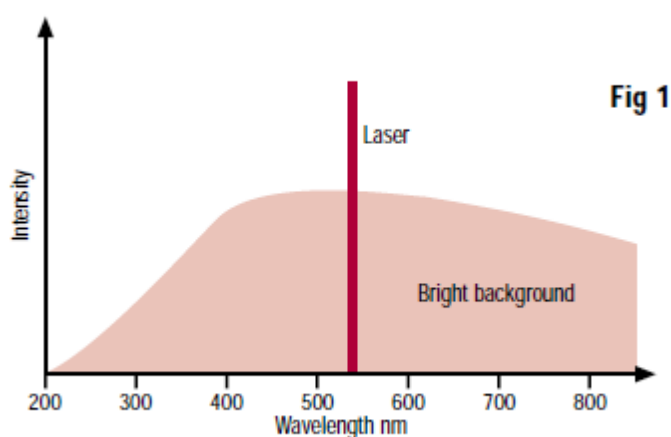


Рисунок 22. Свет от лазерного источника(1) и от фоновой засветки(2)

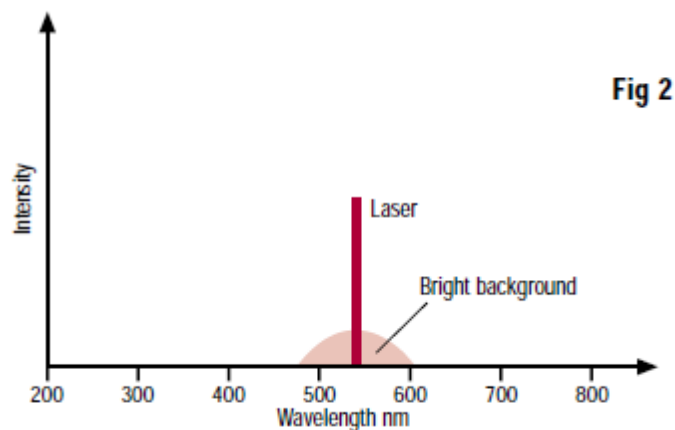


Рисунок 23 - Свет от лазерного источника(1) и от фоновой засветки(2) после спектральной фильтрации.

Иногда, метода спектральной фильтрации оказывается недостаточно для уменьшения интенсивности фоновой засветки, в таком случае мы можем получить еще больший контраст между информационным сигналом (отраженным лазерным излучением) и фоновой засветкой используя метод временной фильтрации. Как было сказано выше, лазерное излучение обладает высокой временной плотностью, т.е., для некоторых источников вся энергия импульса выделяется в сверхкороткие промежутки времени. Так, для полупроводниковых лазеров типичная длительность импульса составляет единицы миллисекунд, для лазеров на парах металлов (ЛПМ) – десятки наносекунд, кроме того в последние годы активно развивается фемптосекундная лазерная техника. В то же время, длительность открытого затвора современных скоростных камер может быть уменьшена до десятков – сотен наносекунд. Снижение энергетики фоновой засветки при уменьшении времени открытого затвора камеры показано на рисунке 24. Данная техника называется временной фильтрацией.

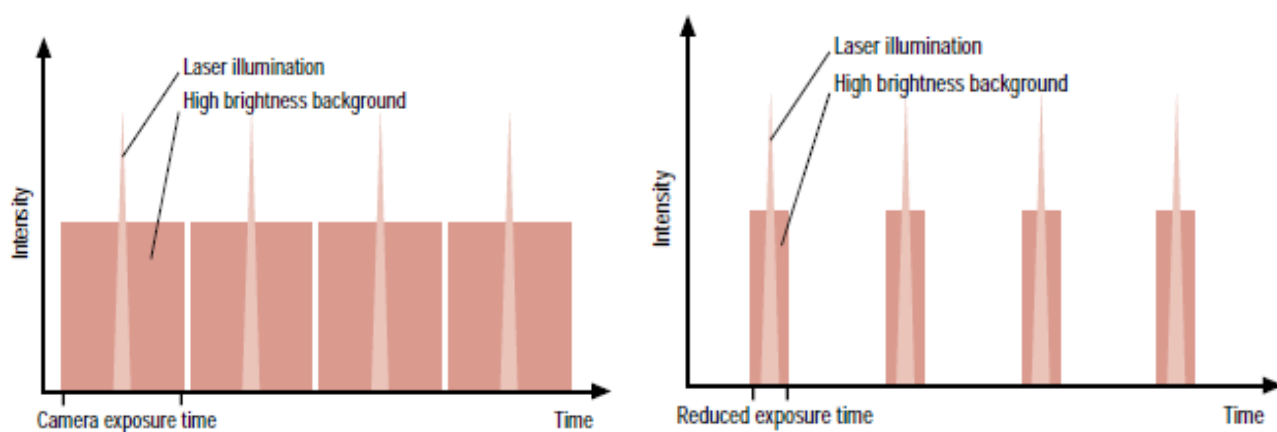


Рисунок 25 - Эффект временной фильтрации при уменьшенном времени затвора в методе лазерной подсветки объекта

На рисунке 25 показана типичная схема реализации лазерной подсветки: лазер подсвечивает горящий образец, охваченный высокоэнергетической фоновой засветкой, отраженный сигнал пропускают через полосовой фильтр, а затем фиксируют с помощью регистрирующей аппаратуры. Таким образом, регистрируется объект целиком, либо его значительная часть. В работе [33] показаны кадры процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), объекта TiO_3+Al , снятые без использования лазерной подсветки и подсвеченные CuBr-лазером. Данный лазер излучается на длине волны 510 и 572 нм. Ширина спектрально линии составляет порядка 5 пкм. Использовался интерференционный фильтр на зеленую длину волны с полосой пропускания порядка 20 нм. Длительность импульса CuBr лазера в данных экспериментах составляла 30 нс. Таким образом используя совокупность методик спектральной и временной фильтрации можно значительно снизить уровень фоновой засветки экранирующий объект наблюдения.

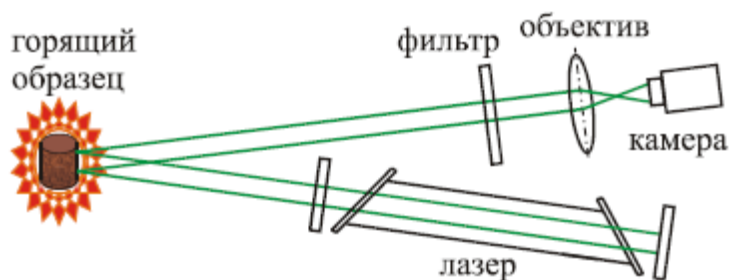


Рисунок 24 - Типичная схема реализации методики лазерной подсветки

В настоящий момент данная методика широко используется во всех областях науки и техники, так например компания General Electric (USA) производит серию мощных промышленных коммутаторов. С целью их тестирования и улучшения эксплуатационных характеристик им необходимо производить высокоскоростную съемку процесса замыкания контактов реле. При достаточно больших токах (сотни ампер) мощный дуговой разряд засвечивает матрицу регистрирующей аппаратуры. Данная проблема не может быть решена простой фильтрацией, поскольку будет невозможно наблюдать раннюю стадию развития процесса, когда дуговой разряд еще не развивается. При сотрудничестве с компанией Oxford Lasers, они используют лазер на парах меди в качестве источника подсветки. Таким образом, им удастся полностью отфильтровать фоновую засветку, при этом сохранив всю информацию об объекте наблюдения. Помимо приведенного примера системы с лазерной подсветкой используют при исследовании работы реактивных двигателей, для наблюдения потока расплавленного металла, для визуализации процессов сварки и взрывов.

2.4 Использование лазерного монитора

Лазерный проекционный микроскоп в задачах визуализации начал применяться с 1965г. В первых работах [34] использовался активный элемент на парах меди для того что бы получить усиленное изображение

слабого сигнала, отраженного от слайдов или микрообъектов, которые невозможно было освещать мощным световым потоком. Структурная схема лазерного монитора показана на рисунке

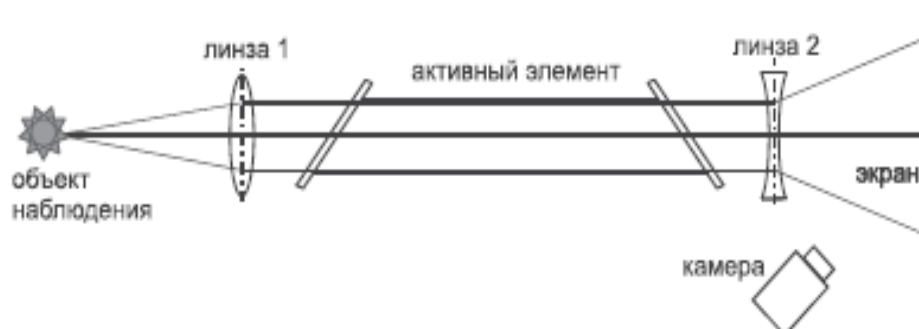


Рисунок 25 - Оптическая схема лазерного монитора

Принцип работы лазерного монитора следующий: поверхность объекта освещается сверхизлучением от активного элемента, отраженный сигнал, несущий информацию собирается объективом и заводится обратно в активную среду, где в дальнейшем усиливается. Изображение построенное тем же объективом проецируется на экран (при необходимости используются дополнительные оптические элементы). С экрана осуществляется съемка с помощью регистрирующей аппаратуры, или же визуальный контроль объекта наблюдения. В качестве активного элемента наиболее актуальным остается использования ГРТ с парами меди или бромида меди в связи с их уникальными характеристиками, такими как высокая частота следования импульсов, узкая спектральная линия, высокая временная плотность излучения.

В основном данной тематикой занимаются в России, в частности, наиболее известные работы это [35-37].

3. Разработка макета тестового объекта и блока синхронизации

Первым делом перед организацией работы по визуализации наночастиц было принято решение провести разработку тестового объекта, который бы дал возможность провести отладку экспериментальной

техники: временную синхронизацию регистрирующего оборудования и CuBr лазера. Это необходимо поскольку работа по диагностике различных процессов не редко подразумевает транспортировку экспериментального оборудования и сжатые сроки проведения экспериментов, то есть необходимо приступать к работе максимально подготовлено.

Было известно что воздействовать на объект будет волоконный лазер, который в основном будет работать в режиме одиночных импульсов с длительностями 100-500мкс. В нашем случае было принято решение в качестве тестового объекта разработать макет искрового разряда, который бы обеспечил похожие параметры и в то же время мог бы использоваться на базе лаборатории в качестве тестового объекта для проведения визуализации при различных режимах работы лазера (с повышенной длительностью импульса генерации, бистатическая схема лазерного монитора, с повышенной частотой и т.д.).

На рисунке 26 приведена схема разработанного устройства. Реализованный макет состоит из двух частей: силовой и блока запуска тиристора. В силовой части напряжение трансформатор обеспечивал гальваническую развязку, напряжение на вторичных обмотках и на входе выпрямителя с удвоением напряжения составляло 220В. После удвоения напряжение составило 440В. Мощный резистор R1 обеспечивает защиту схемы в случае если тиристор, по тем или иным причинам останется открытым. Индуктивность L1 так же стоит для надежного запираания тиристора. Емкость C3 представляла собою батарею из керамических конденсаторов. На выходе стоял трансформатор, состоящий из 5 секций на феритовом сердечнике.

Схема запуска тиристора должна была обеспечить достаточный для открытия ток, порядка 10А. Трансформатор TP2 обеспечивал гальваническую развязку схемы. На рисунке 27 приведены фотографии реализованного макета.

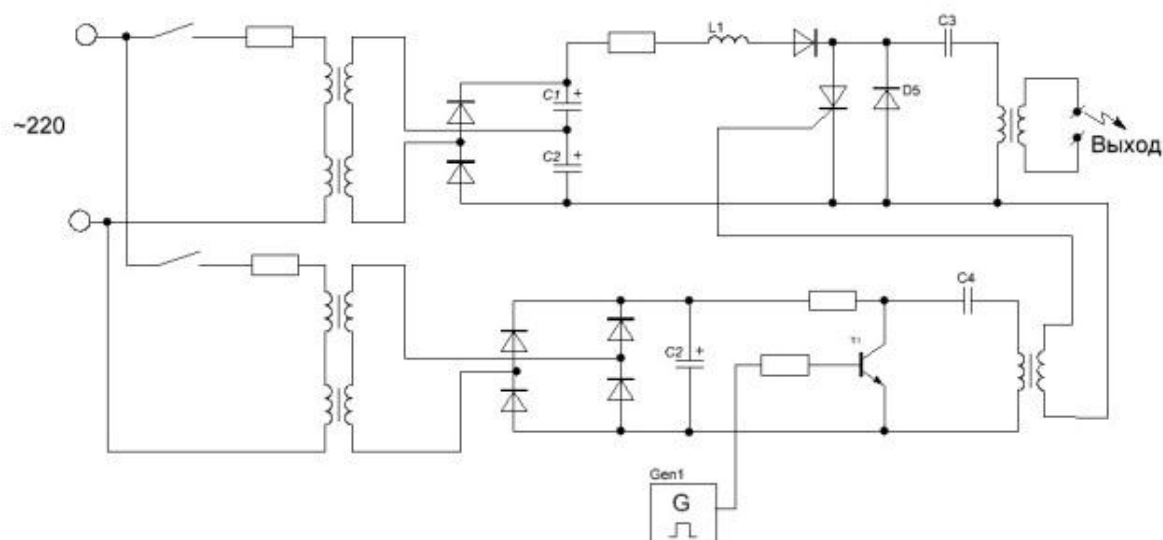


Рисунок 26 - Принципиальная схема макета искрового разряда



Рисунок 27 - Фотографии реализованного макета тест-объекта. Справа – силовая часть. Слева - конструкция подвижного электрода.

С помощью данной разработки мы провели серию экспериментов по визуализации искрового разряда, что помогло нам отстроить регистрирующее оборудование, схему синхронизации лазера (рис 30), оптическую схему. В том числе с помощью данного блока была проведена серия студенческих работ по визуализации искрового разряда с помощью лазерного монитора, выполненная студентами кафедры ТЭВН НИИ ТПУ.

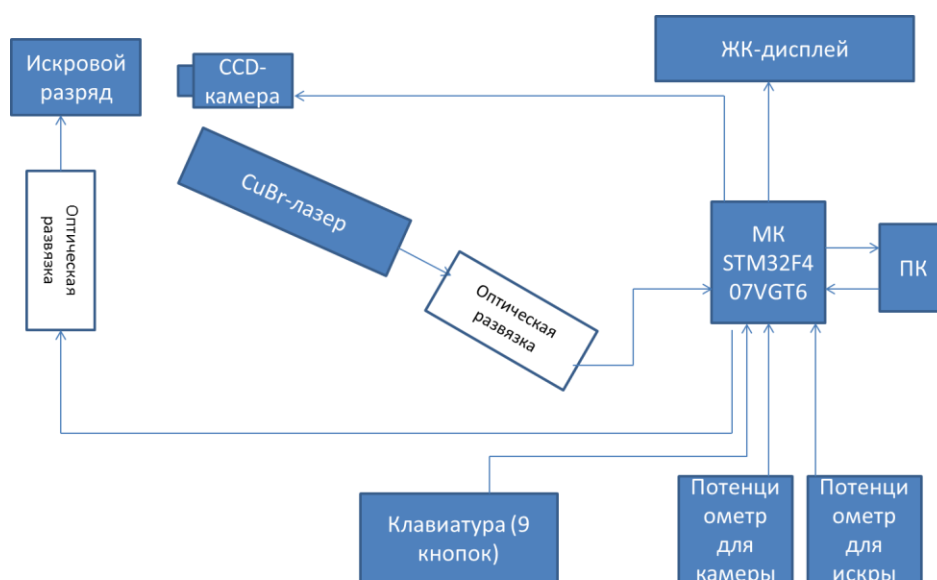


Рисунок 28 – Блок схема системы синхронизации искрового разряда, лазера и регистрирующей аппаратуры.

4. Визуализация лазерного факела

Данный этап работы проводился на базе Института Электрофизики УРО РАН, где занимаются получением наноматериалов путем лазерного испарения мишени. Полученные вещества в дальнейшем используются для создания так называемой керамики с максимальной прозрачностью (близкой к 100%), которая в дальнейшем может выступать, например, в качестве активной среды для лазеров, различных оптических материалов и т.д. В ходе своих работ авторы изучают влияние различных факторов на качество получаемого материала, таких как длина волны аблирующего

лазера, мощность лазерного излучения, длительность импульса и т.д. (Лазерный синтез нанопорошков в стехиометрии иттрий-алюминиевого граната). В настоящее время одной из основных задач перед учеными стоит повышение эффективности производства наноматериалов, которая ограничена в первую очередь образованием достаточно крупных осколков вещества, субмикронных размеров. Ведутся как теоретические так и экспериментальные исследования по расчету образования субмикронных частиц во времени.

В ходе совместных работ было решено провести визуализацию лазерного испарения мишени с помощью лазера на парах бромида меди. Основными трудностями при визуализации таких процессов является высокая интенсивность собственного свечения лазерного факела и характерный временной масштаб развития процессов от единиц микросекунд, до миллисекунд. Следовательно, визуализация подразумевает как использование высокоскоростной камеры, так и источника высокоинтенсивного импульсно-периодического излучения для подсветки области лазерного факела. Как было указано выше, лазер на парах бромида меди достаточно хорошо подходит для данной цели, поскольку способен генерировать лазерные импульсы длительностью десятки наносекунд, с ЧСИ вплоть до 700кГц в видимом диапазоне спектра. Более того, активная среда лазера позволяет создавать активную оптическую систему – лазерный монитор, когда освещение объекта и усиление отраженного от объекта излучения осуществляется одним и тем же активным элементом (рис. 27). В то же время за счет узкой спектральной линии (порядка 5пкм) удается достигнуть высокого уровня спектральной фильтрации и сократить влияние фоновой засветки высокой интенсивности.

4.1 Техника эксперимента

Для визуализации использовался малогабаритный CuVg лазер с полупроводниковым источником накачки. Источник питания, как и газоразрядная трубка расположены в одном корпусе. Характеристики ГРТ: длина активной зоны 380мм, диаметр – 15мм, в качестве буферного газа используется неон, давление – 25торр. Температура внешней стенки трубки не стабилизировалась, элемент работал в режиме саморазогрева. Концентрация паров рабочего вещества определялась температурой контейнеров с бромидом меди, которые располагались в отдельном нагревателе со стабилизатором температуры.

Средняя мощность излучения с плоскопараллельным резонатором составляла 0,9 Вт, соотношение между мощностью на желтой (578,2 нм) и зеленой (510,6 нм) линиях генерации составляла 1 : 2,5 соответственно. В режиме усилителя яркости (без резонатора) средняя мощность сверхизлучения была в три раза меньше. Частота следования импульсов излучения составляла 22 кГц. Для фильтрации излучения факела применялись интерференционные фильтры на длинах волн генерации лазера с FWHM (полная ширина по полувысоте) 10 нм. Для регистрации изображений использовалась высокоскоростная камера Fastec HiSpec 1 с чувствительностью 1600 единиц ISO и максимальной частотой съемки 112 тыс. кадров/с.

Формирование облака наночастиц происходило при взаимодействии иттербиевого излучающего в ИК диапазоне (1070 нм) с различными мишенями. Используемый лазер позволял изменять длительность импульса излучения от 0,2 до 4 мс (в условиях эксперимента), средняя мощность составляла 720 Вт. Лазерный пучок фокусировался с помощью просветленной кварцевой линзы с фокусным расстоянием 400 мм на мишень, которая устанавливалась перпендикулярно лазерному пучку точно в середину его перетяжки.

Лазерное пятно на мишени имело форму круга диаметром 430 мкм, а распределение интенсивности излучения в нем было близко к гауссовому. С учетом ослабления кварцевой пластиной мощность импульсов излучения волоконного лазера на мишени составляла 670 Вт, а плотность мощности излучения была равной 4,6 МВт/см². Мишенями служили различные объекты: керамики 1% Nd:Y₂O₃, полученные спеканием порошков (непрозрачные) и из нанопорошков (полупрозрачные), непрозрачные образцы 1% Nd:Y₂O₃, 8,5YSZ, Fe₂O₃ и Al₂O₃, реакторный графит МПГ.

Для визуализации процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с мишенью, использовалось три различных методики, подразумевающих различных оптические схемы: схема с лазерной подсветкой, схема лазерного монитора и схема для теневой съемки.

4.2 Результаты визуализации лазерного факела с использованием метода лазерной подсветки

На рисунке 29 показана реализованная оптическая схема для визуализации процесса получения наноматериалов с помощью метода лазерной подсветки. Как уже было сказано, значительное снижение уровня фоновой засветки происходит за счет высокой временной фильтрации, которая обеспечивается сверхкороткой длительностью импульса лазера на парах бромида меди (20нс) и малого времени открытого затвора камеры (2мкс), а так же за счет спектральной фильтрации, которая обеспечена узким спектральным диапазоном лазера на парах бромида меди (порядка 5пкм) и шириной пропускания пассивного оптического фильтра (единицы нм). С целью обеспечения максимальной интенсивности и направленности лазерного излучения использовался резонатор состоящий из глухого (1.1) и полупрозрачного (1.2) зеркал, которые совместно с активным элементом (2) представляют собой типичную схему CuBr лазера. Для того что бы сформировать необходимую область зрения (диаметром около 50мм)

использовался расширитель пучка (3). Под цифрой 4 подразумевается сопло закрепленное на выходе оптического волокна, откуда выводилось мощное излучение иттербиевого лазера, которое фокусировалось линзой (5) подобранной на ИК диапазон. В качестве мишени (6), как уже было сказано, служили различные образцы керамики, такие как 1% Nd:Y₂O₃, Al₂O₃ и т.д. Спектральная фильтрация обеспечивалась полосовым оптическим фильтром (7). С целью обеспечения максимальной яркости изображения факела в рассеянном свете видеокамера 8 устанавливалась под углом 5–10° к пучку CuBr лазера.

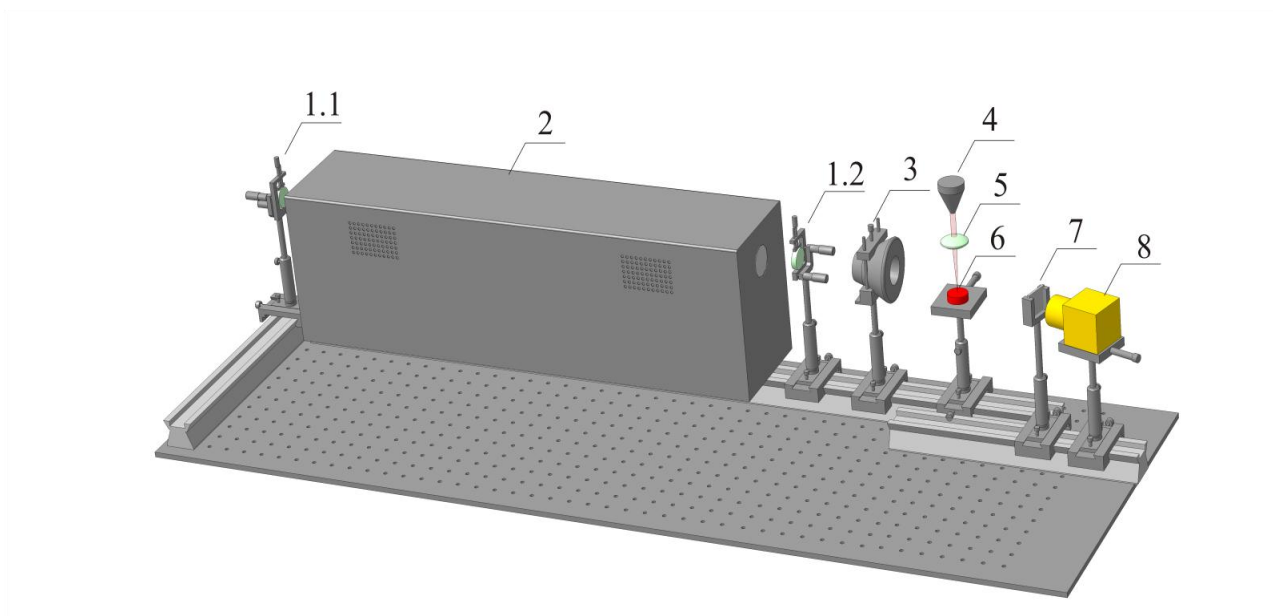


Рисунок 29 - Схема визуализации при регистрации процесса в рассеянном свете

С использованием данного метода визуализации удалось получить изображение образующегося облака наночастиц (Рисунок 30).

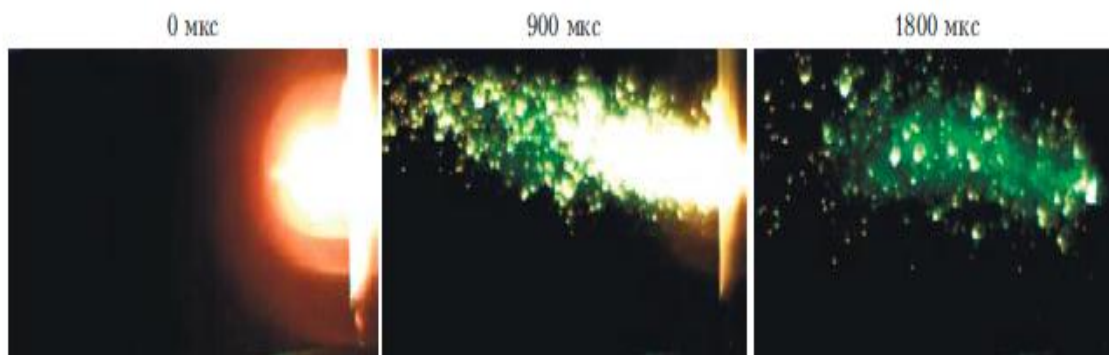


Рисунок 30 - Результаты визуализации взаимодействия импульса иттербиевого лазера с энергией 1 Дж с мишенью из 1% Nd:Y₂O₃ в рассеянном свете.

Спустя примерно 900 мкс после взаимодействия собственное свечение факела заканчивается, на кадрах становятся различимы вылетающие фрагменты и облако наночастиц, которые рассеивают излучение CuBr-лазера. До этого момента изображение полностью засвечено излучением возникающего факела. В первые моменты, как известно образуется ядро факела, которое обладает сверх большой температурой в районе 10 000К.

К сожалению, к настоящему моменту после глубокого анализа отечественной и зарубежной литературы не было найдено детальной информации по развитию яркостной температуры в ядре лазерного факела. Основная трудность связана с определением момента образования облака наночастиц, а также момента появления крупных осколков или крупных капель. Именно образование крупных частиц или капель может снижать эффективность получения нанопорошков.

Как видно из результатов визуализации, при минимальной экспозиции камеры собственное свечение факела и яркое свечение крупных фрагментов, образующихся при взаимодействии, «засвечивают» получаемые изображения. Проведение детального анализа процессов, протекающих в начальный момент времени, невозможно. Полученные ограничения прежде всего связаны с минимальным временем открытого

затвора камеры (2 мкс), которое значительно превосходит время лазерной подсветки (20 нс). В идеальном случае время открытого затвора должно быть столько же мало, как и время лазерной подсветки. Известно, что в настоящее время изготавливаются специализированные научные камеры, позволяющие выставлять время открытого затвора вплоть до 2х наносекунд, но при этом ведут регистрацию только в режиме одиночных кадров. В нашем же случае нам необходимо было использовать высокоскоростную камеру для того чтобы визуализировать полную временную динамику развития лазерного факела. Кроме того необходимо отметить, что регистрация каждого отдельного импульса CuBr лазера обеспечивала стробоскопический эффект, который играет огромную роль при визуализации быстропротекающих процессов. Это связано с тем, что на каждом кадре зафиксированы те самые 20нс лазерной подсветки, что в свою очередь значит что мы не будем наблюдать треков даже от очень быстродвигающихся частиц.

Другим вариантом уменьшения влияния фоновой засветки при визуализации в рассеянном свете является использование интерференционных фильтров на длинах волн подсвечивающего лазера, то есть спектральной фильтрации. Энергия импульса излучения CuBr-лазера была относительно низкой – 50 мкДж. Применение интерференционных фильтров приводило к тому, что энергии, рассеянной факелом, было недостаточно для получения контрастных изображений. Для увеличения яркости изображений при съемке с интерференционными фильтрами приходилось увеличивать экспозицию камеры, что обеспечивало попадание рассеянного света от нескольких импульсов излучения CuBr-лазера. Наиболее оптимальный результат наблюдался при длительности экспозиции 140 мкс, в этом случае кадр формируется тремя импульсами излучения лазера. Такой режим привел к значительному увеличению энергии, поступающей от собственного излучения факела. Результаты

визуализации взаимодействия импульса с энергией 1 Дж с мишенью из 1% Nd:Y2O3 приведены на рис. 31.

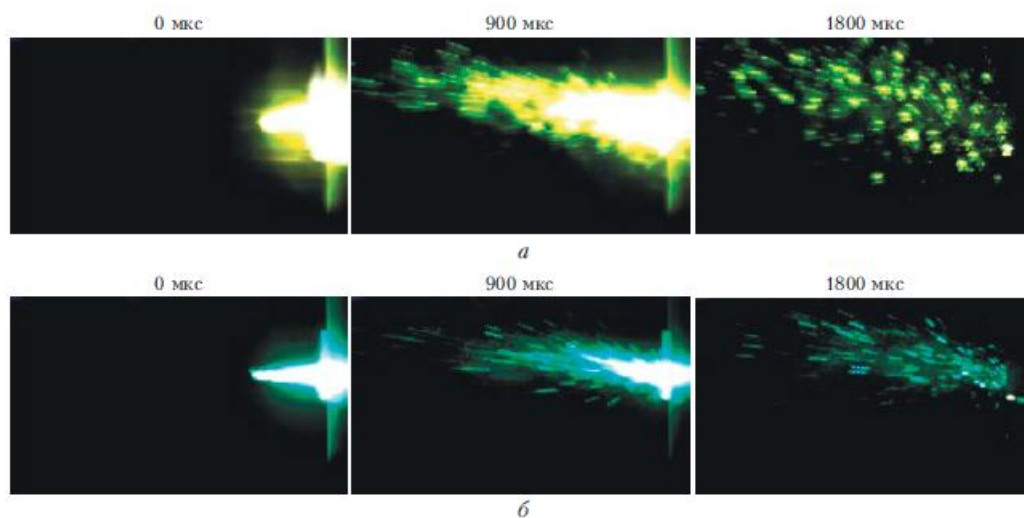


Рисунок 31 - Результаты визуализации в рассеянном свете с использованием интерференционных фильтров: а – 578 нм; б – 510 нм.

Экспозиция 140 мкс, поле кадра 5 x 3 см

При съемке образующегося факела с интерференционными фильтрами без подсветки CuBr-лазера увидеть облако наночастиц не удалось.

При использовании подсветки и регистрации рассеянного излучения от трех импульсов облако удалось визуализировать. Такой режим съемки, помимо увеличения влияния фоновой засветки, приводил к «размазыванию» изображения, снижая достоверность получаемых результатов. Иначе говоря, прямым следствием увеличения количества импульсов CuBr лазера попадающих в кадр являются треки от пролетающих крупных фрагментов и общая размытость изображения.

Использование метода лазерной подсветки позволило извлечь лишь некоторые данные о природе процесса. Например оценить скорость разлета крупных наночастиц когда изображение формировалось одним импульсом CuBr лазера, а так же сделать выводы о высоте разлета

субмикронных частиц и облака наночастиц. Отчетливо видно, что субмикронные частицы вылетают выше и дальше чем облако наночастиц. Подобная информация может быть использована при проектировке и расположении подложек при промышленном производстве порошков.

Основной трудностью при визуализации является яркое свечение ядра лазерного факела в начальный момент взаимодействия потока излучения с веществом.

4.3 Результаты визуализации лазерного факела с использованием лазерного монитора

Для полного устранения фоновой засветки была спроектирована схема показанная на рисунке 34. В данном случае CuBr лазер (2) работает в режиме сверхсветимости. Излучение сверхсветимости проходит через линзу (3) с фокусным расстоянием $F = 250\text{мм}$, которая одновременно несколько собирает излучение сверхсветимости и выступает в качестве объектива для построения изображения. Далее излучение проходит так же через объект наблюдения и отражается от поверхности 1.2, в качестве которой используется лист бумаги или кварцевая плоскопараллельная пластина. Отраженный от экрана свет вновь проходит через объект наблюдения и попадает в усилитель яркости в момент времени когда среда усиливает. Таким образом, лазерный факел два раза частично рассеивает и отражает излучение сверхсветимости усилителя яркости, что приводит к пространственной модуляции интенсивности света, вновь попадающего в активную среду. Сформированное на экране 7 изображение регистрируется с помощью камеры 8. Изображение на экране формируется в спектре излучения (усиления) усилителя яркости за время, соответствующее длительности импульса излучения CuBr-лазера, что составляет 40 нс. Благодаря высокому коэффициенту усиления и малой ширине спектра (2–3 пм) достигается «глубокая» фильтрация

формируемого на экране изображения, что полностью устраняет фоновую засветку от собственного свечения факела.

В качестве объекта наблюдения так же выступает лазерный факел, образованный взаимодействием мощного потока излучения выходящего из сопла (4) иттербиевого волоконного лазера с подложкой из оксида итрия (6). Излучение фокусируется собирающей линзой (5) просветленной на ИК диапазон.

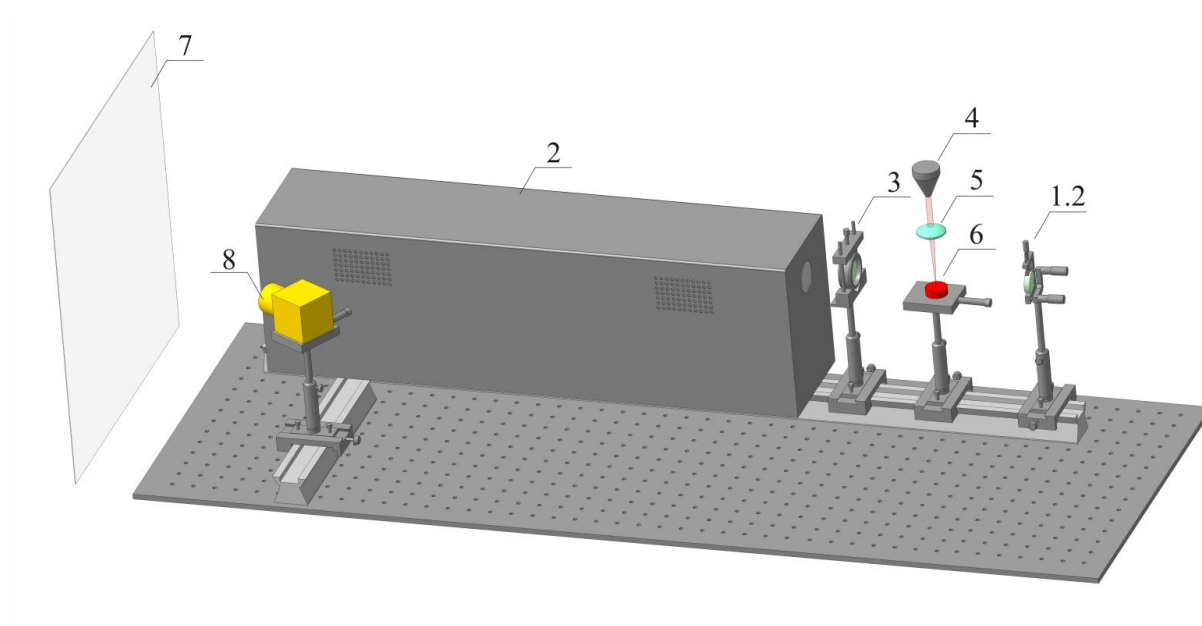


Рисунок 32 - Схема визуализации для регистрации процесса с помощью лазерного монитора

Результаты визуализации процесса взаимодействия лазерного излучения с мишенями из 1% Nd:Y₂O₃ с различной степенью прозрачности представлены на рис. 32. Как видно из снимков с экрана, влияние фоновой засветки полностью отсутствует.

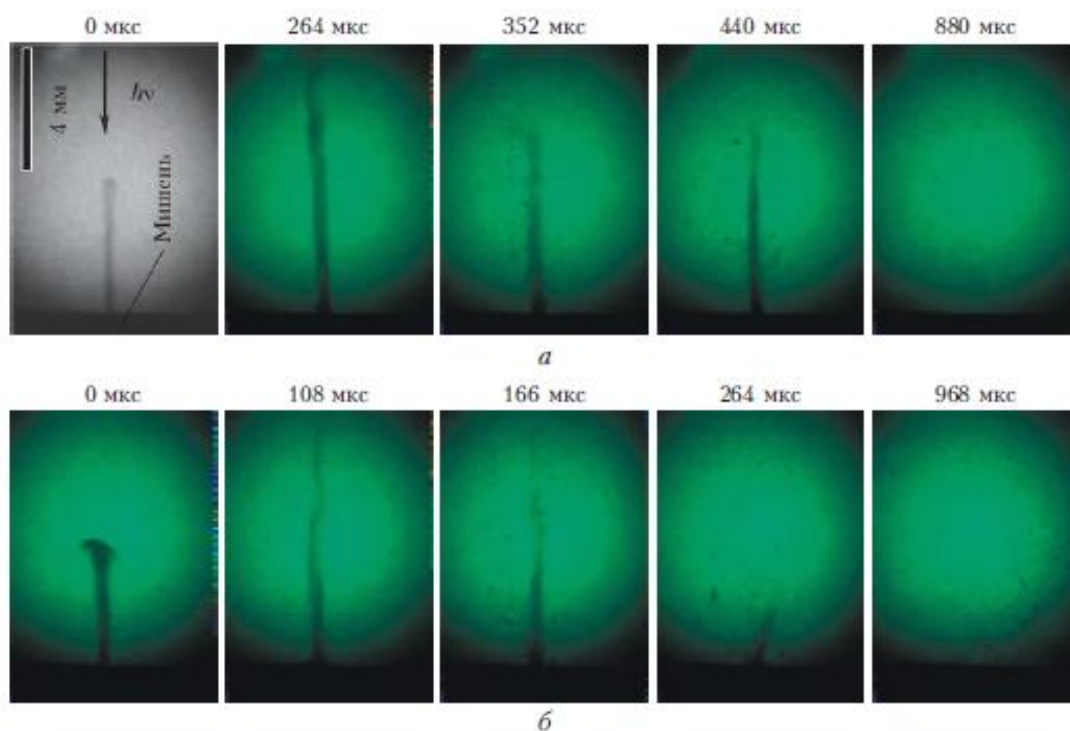


Рисунок 33 - Результаты визуализации в лазерном мониторе полупрозрачного (а) и непрозрачного (б) 1% Nd:Y₂O₃. Экспозиция 3 мкс

Появилась возможность наблюдать процессы происходящие в момент формирования ядра лазерного факела (0-200мкс), что как было показано выше невозможно при съемке в рассеянном свете. Главным образом это связано с тем что усилитель яркости выполняет роль качественного узкополосного фильтра, с полосой пропускания около 5пкм. Кроме того, рассматривая случай визуализации с методом лазерной подсветки мы могли сказать, что влияние временной фильтрации за счет малой длительности лазерного импульса и времени открытого затвора камеры равно по значимости влиянию спектральной фильтрации на избавление от фоновой засветки. В данном же случае, очевидно, превалирует спектральная фильтрация за счет ширины спектра CuVr лазера.

Тем не менее, наблюдение объекта в проходящем свете приводит к проигрышу в плане визуализации более мелких объектов. Как видно из

полученных изображений, мы вовсе не можем наблюдать облако наночастиц и наблюдаем заметно меньше субмикронных частиц.

По результатам визуализации лазерного факела с помощью лазерного монитора ученым из Института Электрофизики удалось сделать множество интересных выводов. Так, например, в начальный момент хорошо видна протяженная темная область, которая представляет собой тень от столба пара. В случае полупрозрачной мишени ($\alpha \lambda \approx 30,7 \text{ см}^{-1}$) паровой столб начинает уменьшаться спустя ~ 300 мкс после появления факела, а в случае непрозрачной мишени через ~ 150 мкс. Кроме столба на фотографиях хорошо видны крупные капли, разлетающиеся из самого устья кратера. Сделан вывод о том, что субмикронные частицы не вылетают из кратера ранее чем через 250 мкс после воздействия аблирующего импульса (для всех мишеней). Скорость разлета капель составляет от 12 до 60 м/с. В случае полупрозрачной мишени капли появляются через ~ 270 мкс после образования лазерного факела, в случае непрозрачной мишени через ~ 120 мкс. Уменьшение высоты столба и появление капель свидетельствуют о том, что в этот момент происходит удаление вещества из кратера. Причиной этого является превалирование разбрызгивания жидкого расплава над испарением.

Подобные данные собраны для всех актуальных мишеней из которых получают наноматериалы : 1% Nd:Y₂O₃, полученные спеканием порошков (непрозрачные) и из нанопорошков (полупрозрачные), непрозрачные образцы 1% Nd:Y₂O₃, 8,5YSZ, Fe₂O₃ и Al₂O₃, реакторный графит МПГ.

4.4 Результаты визуализации лазерного факела с использованием метода теневой съемки

Теневые методы исследования оптических неоднородностей основаны на использовании явления отклонения света в прозрачных объектах и средах с изменяющимся показателем преломления (оптических неоднородностях). Данными методами измеряют с высокой точностью очень маленькие расстояния и толщины (неровности), показатель преломления света в объекте, а также другие физические и химические величины, связанные с ними. Кроме того, изучаются течения газа с высокими скоростями и температурами, которые имеют место быть, например, в ходе химических реакций, турбулентного перемешивания и горения. Так же, теневые методы дают возможность визуализации и исследования звуковых и ударных волн для процессов высокой интенсивности.

В ходе данной работы была реализована одна из типичных схем для реализации теневой съемки (рис. 34).

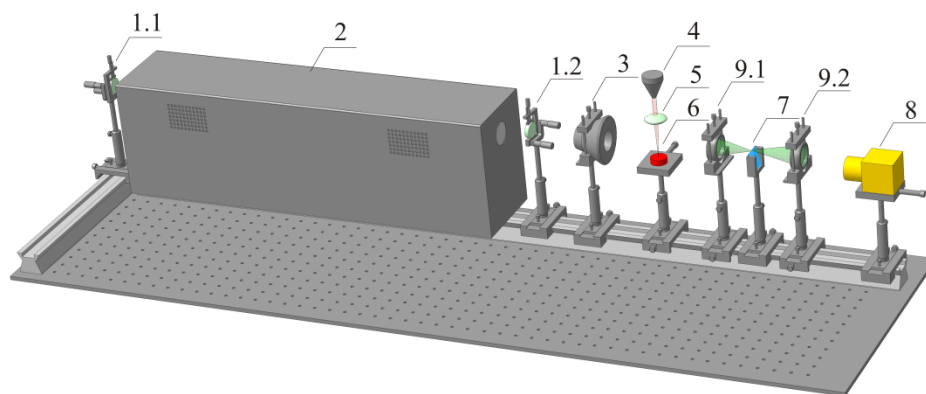


Рисунок 34 - Схема визуализации для регистрации процесса с помощью теневой съемки

Как известно, при теневой съемке объект необходимо освещать не расходящимся излучением. При этом, обычно, используют прожектор, который излучает во всем диапазоне видимого света, и, при необходимости, собирают излучение коллиматором. В нашем случае в качестве источника когерентного излучения использовался CuBr лазер (2) с установленным резонатором, состоящим из глухого (1.1) и полупрозрачного (1.2) зеркал. Пучок лазера расширялся с помощью коллиматора (3). Мощное излучение волоконного лазера выходило из сопла (4), фокусировалось линзой (5) и взаимодействовало с объектом(6), который представлял из себя различные мишени типа Al₂O₃ и других.

Прошедшее через лазерный факел излучение фокусировалось собирающей линзой (9.1) в точке, где располагался нож Фуко (7), который пропускал только тот свет, который испытал преломления из-за присутствия оптической неоднородности в факеле. Далее излучение, несущее информацию об оптической неоднородности попадало в объектив (9.2), который в свою очередь строил изображение объекта на матрице камеры.

Реализованная установка позволяла заснять процесс разлета части в реальном времени, то есть сделать несколько кадров в течении процесса абляции. В то время как большинство наиболее близких работ описывают так называемое «развитие» лазерного факела, то есть набирают множество кадров снятых для разных процессов абляции с различной задержкой относительно нулевой точки. (ссылки).

На рисунке 37 показаны результаты визуализации с помощью метода теневой съемки

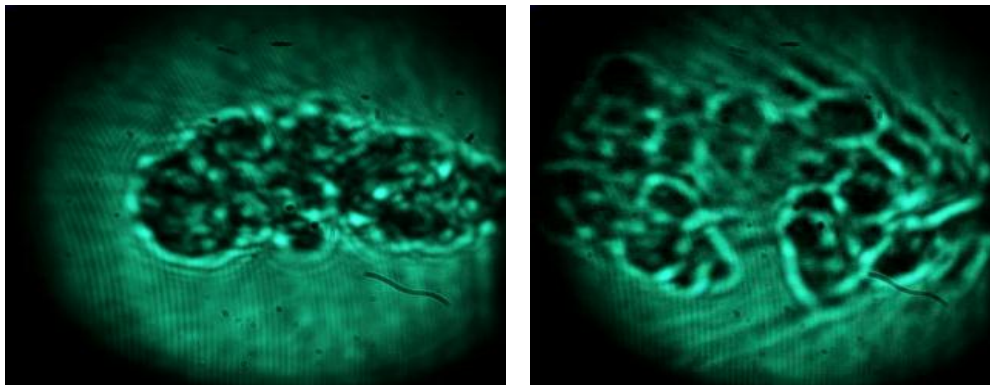


Рисунок 37 - Результаты визуализации с помощью теневой съемки полупрозрачного (а) и непрозрачного (б) 1% Nd:Y₂O₃.

Видно, что данный метод дает отличные от предыдущих данные для обсуждения. В частности, можно наблюдать форму паров расплавленного вещества и треки от летящих частиц субмикронного размера. Удалось выяснить скорость распространения переднего края паров лазерного факела, которая составила около 230 м/с, скорость распространения ударной волны. Удалось сопоставить наличие интенсивного вихреобразования со спектроскопическими данными о начале конденсации. Было выдвинуто предположение, что эти вихревые образования состоят из смеси конденсирующего пара, наночастиц и воздуха. Более детальный анализ с точки зрения физики развития аблирующего факела представлен в работе [38].

5. Результаты проведенного исследования

В работе продемонстрирована возможность использования малогабаритных лазеров на парах бромида меди в задачах визуализации процессов получения наноматериалов методом лазерного испарения.

Несмотря на то что использовалась активная среда малого объема с низкой мощностью излучения, удалось зафиксировать образующееся облако наночастиц в рассеянном свете при регистрации изображения, формируемого одним импульсом излучения CuBr-лазера с энергией 50 мкДж. Применение частотной фильтрации за счет интерференционных

фильтров с полосой пропускания 10 нм не позволило полностью избавиться от влияния собственного свечения лазерного факела.

Полностью устранить влияние фоновой засветки удалось в схеме лазерного монитора, когда в качестве фильтра выступает активная среда CuBr-лазера. В этом случае зафиксировать облако наночастиц не удалось, но был обнаружен паровой столб, время начала уменьшения которого зависит от прозрачности испаряемой мишени. Опираясь на результаты визуализации в лазерном мониторе, мы определили момент появления капель в зависимости от прозрачности используемой мишени.

Другие данные были получены при использовании CuBr лазера в качестве источника подсветки для съемки теневой картины. Интересной была информация о времени образования паров относительно прихода аблирующего импульса, сопоставление интенсивности парообразования и спектрального анализа.

Таким образом, лазеры на парах бромида меди могут быть использованы для проведения комплексных исследований процессов получения наноматериалов, успешно дополняя другие методы и средства диагностики. Уникальное сочетание свойств лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов и их галогенидов позволяет использовать их как для подсветки процесса образования наноструктур, так и для полного устранения фоновой засветки образующегося факела. Высокая спектральная яркость и малая длительность импульса лазера позволили полностью подавить фоновую засветку и зафиксировать крупные фрагменты. Кроме того, малая длительность импульса генерации лазера позволила добиться качественных изображений, не размазанных по кадру. Кроме того был разработан лабораторный макет источника искрового разряда с целью создать стенд на котором возможно проводить апробацию различных методик визуализации. Температура в плазменном канале искрового разряда может достигать 10000K, что сравнимо с температурой плазмы в ядре лазерного факела 3000-30000K.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00175) и грантов РФФИ (№ 14-32-50627- мол-нр, 14-08-00181А), а также в рамках тем государственных заданий № 0389-2014-0003 и 0389-2014-0027.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1AM41	Федорову Кириллу Валерьевичу

Институт	ИНК	Кафедра	ПМЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроника и нанoeлектроника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>В данной работе проводятся исследования по диагностики быстротекущих процессов, экранированных от наблюдателя высокоуровневой фоновой засветкой. Устройство найдет применение при фундаментальном изучении процессов, диагностике технологических процессов и демонстрации в учебных целях</i>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации лазерного монитора: – Отсутствие или недостаток естественного света; – Отклонение показателей микроклимата; – Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации лазерного монитора: – Термическое травмирование; – Электрический ток. 1.3. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.
2. Экологическая безопасность:	2.1. Анализ влияния лазерного монитора на окружающую среду 2.2. Анализ «жизненного цикла»

	лазерного монитора. 2.3. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	3.1 Возможные ЧС которые может вызвать эксплуатация лазерного монитора: пожар; 3.2 Возможные ЧС которые могут возникнуть в лаборатории: пожар; 3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	4.1 Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; 4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	К.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1АМ41	Федоров К.В.		

Социальная ответственность

Введение

В данной работе исследуется устройство для визуализации быстротекущих процессов экранированных от наблюдателя высокоуровневой фоновой засветкой. Исследования осуществлялись на базе института электрофизики УРО РАН, г. Екатеринбург. Объектом для визуализации являлся процесс взаимодействия лазерного импульса высокой мощности с подложкой из спрессованного оксида алюминия. В основе исследуемого прибора лежит CuVg-лазер осуществляющий подсветку исследуемого объекта. Подобные исследования позволяют приобретать полезные знания о процессах как для фундаментальных исследований, так и для промышленного неразрушающего контроля. Исследования проводятся подготовленным персоналом, как правило имеющим допуск для работы с высоким напряжением. В целях безопасности для работников, общества и окружающей среды разработаем комплекс мероприятий технического, организационного характера, которые минимизируют негативные последствия проектируемой деятельности.

1. Производственная безопасность

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды, данные сведены в табл.1.

*Таблица 1. Опасные и вредные факторы возникающие при разработке
бронхофонографа*

Источник фактора наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Настройка оптической схемы	1. Отсутствие или недостаток естественного света 2. Отклонение показателей микроклимата	1. Повышенный уровень электромагнитных излучений	1. СанПиН 2.2.4- 548-96. Параметры микроклимата 2. ГОСТ Р 50723-94 Лазерная безопасность 3. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ
3. CuBr-лазер	1. Повышенный уровень электромагнитных излучений	1. Электрический ток	4. СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение 5. ГОСТ 12.4.011-89 Средства защиты работающих. Общие требования и классификация 6. СанПиН 5804 Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров

Отклонение показателей микроклимата

При разработке устройства работа по энергозатратам относится к категории 1б - работа легкая физическая, производимая в сидячем положении или связанна с ходьбой, но которая не требует систематического физического напряжения, поднятия и переноса тяжестей.

При разработке устройства должны быть следующие параметры микроклимата, (оптимальные величины влажности, температуры, скорости

движения воздуха для рабочей зоны лабораторных помещениях). (СанПин 2.2.4.548-96)

Таблица 2 – Оптимальные показатели микроклимата

Температура, град. С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
20-28	40-60	<0,1- 0,2

Для создания благоприятных условий микроклимата должны быть использованы такие меры как, вентиляция, кондиционирование, а также системы центрального отопления, чаще всего его используют в зимний период времени.

Отсутствие или недостаток естественного, искусственного света

Назначение искусственного освещения – создать благоприятные условия видимости, сохранить хорошее самочувствие человека и уменьшить утомляемость глаз. При искусственном освещении все предметы выглядят иначе, чем при дневном свете. Это происходит потому, что изменяется положение, спектральный состав и интенсивность источников излучения. Недостаточное освещение рабочего места вызывает быструю усталость и болезни глаз, снижает внимательность и, следовательно, значительно уменьшает производительность труда, а также увеличивает вероятность несчастных случаев на производстве.

Оценка освещенности рабочей зоны проводится в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. В связи с тем, что при исследованиях требуется высокое интеллектуальное и зрительное напряжение, в помещении должна быть реализована достаточная освещенность. Для нормальной работы, она должна составлять не менее 200 люкс исходя из СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, коэффициент естественной освещенности

(КЕО) должен составлять 2,1%, а коэффициент пульсаций (K_p) не должен превышать 10%.

Для реализации достаточной освещенности в рабочем помещении должно присутствовать, как естественное освещение, так и искусственное. Чтобы увеличить освещенность на рабочем месте, следует так же использовать местное освещение, потому что работа связана с мелкими деталями. В рабочем помещении в качестве искусственного освещения должны использоваться люминесцентные лампы. Они имеют большую световую отдачу, высокий срок службы, отличную цветопередачу, относительно слабую яркость.

Опасность поражения электрическим током

Опасным фактором при работе с электрическими приборами является электрический ток. Источником электрического тока является общая электрическая цепь, благодаря которой питаются все электрические приборы. Электрический ток оказывает следующие воздействия на организм человека:

- Термическое действие – ожоги различных участков тела.
- Электролитическое действие - разложение различных жидкостей организма, что вызывает нарушения их физико-химического состава.
- Механическое действие - разрыв, расслоение, тканей организма (стенок кровеносных сосудов, мышечной ткани)
- Биологическое действие - раздражение живых тканей организма.

Предельно допустимые нормы воздействия электрического тока на человека представлены в табл.4. Согласно ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ.

Таблица 5. Наибольшие допустимые напряжения прикосновения $U_{пр}$ и токи I_h , проходящие через человека, в электроустановках напряжением до 1000, В с или изолированной нейтралью.

Род и частота тока	Нормируемая величина	Продолжительность воздействия t , с							
		0.01	0.1	0,3	0,5	0.7	0,9	1,0	Более 1с
Переменный, 50 Гц	$U_{пр}$, В	650	500	165	100	70	55	50	36
	I_h , мА	650	500	165	100	70	55	50	6
Постоянный	$U_{пр}$, В	650	500	350	250	230	210	200	40
	I_h , мА	650	500	350	250	230	210	200	15

Для обеспечения безопасной работы с электрическими приборами используют методы защитного заземления, зануления. Согласно ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ, защитное заземление следует выполнять преднамеренным электрическим соединением металлических частей электроустановок с "землей" или ее эквивалентом. Зануление следует выполнять электрическим соединением металлических частей электроустановок с заземленной точкой источника питания электроэнергией при помощи нулевого защитного проводника.

При эксплуатации разрабатываемого прибора следует соблюдать обычную технику безопасности обращения с электрическими приборами. В приборе отсутствуют высокие напряжения и токи, а следовательно вероятность поражения электрическим током мала.

Повышенный уровень электромагнитных излучений. Лазерная безопасность.

При разработке, изготовлении и эксплуатации лазерных изделий необходимо учитывать все воздействующие на организм человека вредные и опасные производственные факторы. Непосредственно в данной работе используемая лазерная техника относится к категории 3В, что является

предпоследней из самых опасных категорий. В ГОСТ Р 50723-94 эта категория характеризуется как: «Непосредственно наблюдение таких лазерных изделий всегда опасно. Видимое рассеянное излучение обычно безопасно».

Кроме того в ГОСТе прописано множество рекомендаций для эксплуатации лазеров подобного класса, например использование защитных экранов, специальных систем наблюдения (защитных очков), технологических кабин и т.д. Все необходимые средства защиты и безопасности как правило имеются в специализированных лабораториях.

Следует точно понимать, что исследования подобных приборов невозможно вне помещений специально спроектированных под функционирование лазеров класса 3В.

2. Экологическая безопасность

2.1. Защита селитебной зоны

Размеры санитарно-защитных зон регламентируются СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Лаборатория в которой проходила работа находится в учебном корпусе. Учебный корпус не является источником шума, электромагнитных излучений и других физических факторов, поэтому санитарно-защитная зона не устанавливается.

2.2. Защита литосферы

В лаборатории имеется мусорный контейнер, куда выбрасываются все отходы. Далее они утилизируются. Люминесцентные лампы находятся на обслуживании службы электриков, которые производят их замену и сдачу на утилизацию.

2.3. Защита атмосферы

Количество вредных веществ, выделяемых при работе лазера, не превышает установленных норм, вещества выделяются лишь периодически и выводятся из помещения вытяжкой.

3. Защита в чрезвычайных ситуациях

При разработки устройства, самой вероятной ЧС может явиться пожар в помещении. В связи этим в помещении, где разрабатывается устройство согласно ФЗ №123 о «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», должны быть реализованы все меры предосторожности, касающиеся правил пожарной безопасности. В здании должна быть установлена система охранно-пожарной сигнализации, в наличие должны быть порошковые и углекислотные огнетушители, план эвакуации, а так же таблички с указанием направления к запасному (эвакуационному выходу).

При возникновении ЧС, такого как пожар нужно:

- Сообщить о пожаре в пожарную охрану
- Если есть возможность отключить электроэнергию.
- Покинуть помещение, используя основные и запасные пути эвакуации

Так же могут возникнуть ЧС, вызванные природными явлениями, например сильные морозы.

Меры по предупреждению последствий морозов:

- Резервное энергосбережение.
- Резервное отопление.

4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

4.1. Правовые вопросы обеспечения безопасности

Работа в помещении осуществляется с девяти часов утра до шести часов вечера, в обед осуществляется отдых, продолжительностью в один час для снятия умственного и психологического напряжения. Проводимые исследования достаточно безопасны для человека, за исключением

опасности воздействия лазерного излучения. Лаборатория в которой проводятся подобные исследования должна быть оснащена всеми необходимыми защитными средствами, предусмотренными в ГОСТ Р 50723.

4.2. Организационные вопросы обеспечения безопасности

При разработке устройства основную долю работы приходится выполнять в сидячем положении. При работе сидя рекомендуются следующие параметры рабочего пространства:

- ширина – не менее 700 мм;
- высота рабочей поверхности – 700 мм над уровнем пола.

Под рабочей поверхностью должно быть предусмотрено пространство для ног:

- высота – не менее 650 мм;
- ширина – не менее 500 мм;
- глубина – не менее 650 мм.

1. Предпроектный анализ

1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевым рынком выполненной работы являются промышленные и научные предприятия, а так же университеты, деятельность которых связана с взаимодействием высокоэнергетических потоков с веществом.

1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

На сегодняшний день визуализация быстропротекающих процессов, в том числе процессов экранированных от наблюдателя высокоуровневой фоновой засветкой является одной из важнейших направлений в неразрушающем контроле.

В настоящее время ведутся исследования, с целью достигнуть большей функциональности, то есть визуализации более сложных процессов. И на данный момент уже существует несколько технических решений:

- Использование системы лазерного монитора;
- Использование современных высокоскоростных камер.

С помощью оценочной карты проведем анализ технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 1 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _д	Б _{к1}	Б _{к2}	Б _д	Б _{к1}	Б _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.4	5	2	1	2	0.8	0.4
2. Удобство в эксплуатации	0.1	3	5	5	0.3	0.5	0.5
3. Надежность и долговечность	0.15	3	5	5	0.45	0.75	0.75

конструкции							
4. Качество визуализации	0.15	3	3	5	0.45	0.45	0.75
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Уровень проникновения на рынок	0.05	1	5	4	0.05	0.25	0.2
2. Стоимость установки	0.05	5	2	4	0.25	0.1	0.2
3. Срок выхода на рынок	0.07	2	5	5	0.14	0.35	0.35
4. Стоимость эксплуатации	0.13	2	2	5	0.26	0.26	0.65
Итого	1				3.9	3.46	3.8

Анализ технических решений определяется по формуле:

$$K_i = \sum B_i \cdot \text{Б}_i$$

Где, К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

В_і – вес показателя (в долях единицы);

Б_і – балл і-го показателя.

Из всех критериев, характеризующих данные разработки, наибольший вес имеет предоставляемая мощность. По данному показателю у системы так же высший бал.

Анализ технических решений показал, что данная разработка имеет более высокую конкурентоспособность, по сравнению с уже существующими техническими решениями.

1.3. FAST-анализ

Проведение FAST-анализа предполагает шесть стадий.

Стадия 1. Выбор объекта FAST-анализа.

В качестве объекта FAST-анализа выступает объект исследования – лазерный монитор.

Стадия 2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом.

Главная функция: Неразрушающий контроль быстропротекающих процессов.

Основная функция: Получение изображения поверхности объекта, которая экранирована фоновой засветкой.

Вспомогательная функция: Усиление отраженного от объекта электромагнитного сигнала, который несет информацию о поверхности.

Таблица 2 - Классификация функций, выполняемых объектом исследования.

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
1. Высокоскоростная CCD-камера	1	Регистрация полученных изображений	X		
2. ПК + специализированное ПО	1	Обработка и анализ полученных данных	X		
3. ГРТ	1	Активный элемент CuBr-Лазера	X		
4. Источник накачки	1	Источник электрической накачки ГРТ		X	
5. Система управления лазером	1	Обеспечивает нужную частоту работы и длительность лазерных импульсов		X	
6. Объективы	3	Построение изображения			X
7. Оптические фильтры	5	Фильтрация отраженного сигнала			X
8. Оптоволоконные линии связи	1	Защита системы от наводок и гальваническая развязка			X

Стадия 3. Определение значимости выполняемых функций объектом.

Для оценки значимости функций будем использовать метод расстановки приоритетов, предложенный Блумбергом В.А. и Глуценко В.Ф. В основу данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции.

Таблица 3 - Матрица количественных соотношений функций

	1	2	3	4	5	6	7	8	Итого
1	1	1,5	1	1	1	1.5	1.5	1.5	10
2	0.5	1	0.5	0.5	0.5	1	1	1.5	6.5
3	1	1.5	1	1	1	1.5	1.5	1.5	7
4	1	1.5	1	1	1	1.5	1.5	1.5	7
5	1	1.5	1	1	1	1.5	1.5	1.5	7
6	0.5	1	0.5	0.5	0.5	1	1	1.5	6.5
7	0.5	1	0.5	0.5	0.5	1	1	1.5	6.5
8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	4.5
									55

Определим значимости функций путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям:

Функция	Значимость
1	0.18
2	0.11
3	0.12
4	0.12
5	0.12
6	0.11
7	0.11
8	0.08
	1

Стадия 4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования.

Таблица 4 - Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Норма расхода, кг (метр)	Стоимость материала, руб. /кг (шт.)	Себестоимость, руб.
1. Высокоскоростная CCD-камера	1	-	400000	400000
2. ПК + специализированное ПО	1	-	100000	100000
3. ГРТ	1	-	40000	40000

4. Источник на качки	1	-	60000	60000
5. Система управления лазером	1	-	30000	30000
6. Объективы	3	-	7000	21000
7. Оптические фильтры	5	-	3000	15000
8. Оптоволоконные линии связи	1	-	3000	3000
				669000

Рассчитаем относительные затраты на функции:

Функция	Относительные затраты
1	0.59
2	0.15
3	0.059
4	0.089
5	0.044
6	0.031
7	0.022
8	0.0044
	1

Видно, что наибольшие затраты ложатся на скоростную камеру.

Стадия 5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ.

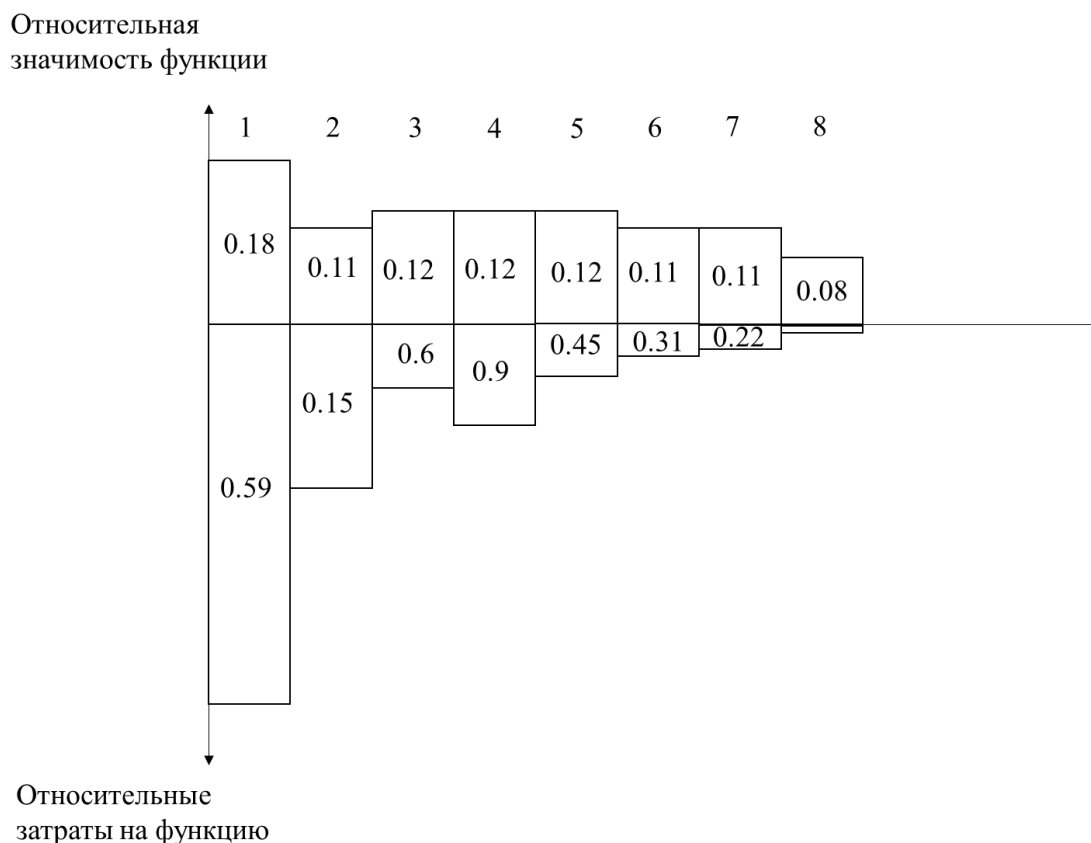


Рисунок 1 - Функционально-стоимостная диаграмма

Стадия 6. Оптимизация функций выполняемых объектом.

В качестве шагов, направленных на снижение стоимости устройства могут выступать:

- Поиск нового производителя высокоскоростных камер;
- Разработка собственного ПО.

1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

Таблица 5 - Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности	Уровень имеющихся
----------	--------------	----------------------------	----------------------

		научного проекта	знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	5
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	5
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	2	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	2
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	3
15.	Проработан механизм	3	3

	реализации научного проекта		
	ИТОГО БАЛЛОВ	34	40

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Получили, что для степени проработанности научного проекта и для уровня имеющихся знаний у разработчика $B_{\text{сум}}$ лежит в диапазоне от 44 до 30, что означает среднюю перспективность проекта.

На основе заполненной формы видно, что для повышения перспективности проекта необходимо в первую провести маркетинговые исследования рынков сбыта, разработать бизнес-план. Именно эти пункты на данный момент являются наименее проработанными.

2. Инициация проекта

2.1. Цели и результат проекта

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта.

Таблица 6 - Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИ ТПУ, Кафедра физических методов и приборов контроля качества (ФМПК)	Магистерская диссертация, отражающая теоретические и практические результаты работы по теме диплома
ИОА СО РАН, лаборатория квантовой электроники	Реализация нового технического продукта
РФФИ	Регулярная финансовая поддержка в виде грантов.

Таблица 7 - Иерархия целей проекта и критерии достижения целей

Цели проекта:	Представить разработанную систему для визуализации быстропротекающих процессов.
Ожидаемые результаты проекта:	Разработать макет устройства; Провести оценку эффективности системы.
Критерии приемки результата проекта:	Функционирующий макет устройства; Наличие проведенных экспериментов, показывающих работоспособность системы, а также экспериментальные данные, доказывающие или опровергающие эффективность использования разработанной установки.

2.2. Организационная структура проекта.

Таблица 8 - Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, час.
1	Федоров Кирилл Валерьевич	Магистрант	Проведение экспериментов; Отладка макета устройства; Обработка экспериментальных данных; Публикация научных статей по тематике работы;	480
2	Тригуб Максим Викторович, НИ ТПУ Кафедра ТЭВН, Доцент	Научный руководитель	Постановка задачи; консультирование; Промежуточная проверка достигнутых результатов.	30

2.3. Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 9 - Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	50000 руб.
3.1.1. Источник финансирования	РФФИ
3.2. Сроки проекта:	
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.11.2014
3.2.2. Дата завершения проекта	30.05.2015
3.3. Прочие ограничения и допущения	Ограничение по времени использования научной лаборатории и оборудования

3. Планирование управления научно-техническим проектом

3.1. План проекта

Таблица 10 - Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление технического задания	3	29.02.2015	2.03.2015	НР, М
2	Изучение литературы	12	3.03.2015	14.03.2015	М
3	Патентный поиск	5	15.03.2015	19.03.2015	М
4	Разработка структурной схемы устройства	11	20.03.2015	30.03.2015	НР, М
5	Разработка принципиальной схемы устройства	13	31.03.2015	12.04.2015	М
6	Расчет	10	13.04.2015	22.04.2015	М

	принципиальной схемы устройства				
7	Разработка макета устройства	14	23.04.2015	7.05.2015	НР, М
8	Проведение экспериментальны х исследований	7	8.05.2015	15.05.2015	НР, М
9	Оформление расчетно- пояснительной записки	8	16.05.2015	23.05.2015	М
10	Подведение итогов	2	24.05.2015	25.05.2015	НР, М
Итого		85			

НР – научный руководитель, М – магистрант.

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта.

Таблица 11 - Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работы	Вид работ	Исполнители	Тк, кал, дн.	Продолжительность выполнения работ											
				фев			март			апрель			май		
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление технического задания	НР, М	3												
2	Изучение литературы	М	12												
3	Патентный поиск	М	5												
4	Разработка структурной схемы устройства	НР, М	11												
5	Разработка принципиальной схемы устройства	М	13												
6	Расчет принципиальной схемы устройства	М	10												
7	Разработка макета устройства	НР, М	14												
8	Проведение экспериментальных исследований	НР, М	7												
9	Оформление расчетно- пояснительной записки	М	8												
10	Подведение итогов	НР, М	2												

3.2. Бюджет научного исследования

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов).

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Таблица 12 - Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Фильтр оптический		1	2000	2000
Провод	4м		12	48
Держатель для оптики		1	8500	8500
Пленка защитная			1000	1000

Всего за материалы	11548
Прочие транспортно-заготовительные расходы (3-5%). Транспортировка устройства в г. Екатеринбург и обратно	20000
Итого по статье См	31548

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.

Для проведения научной работы специальное оборудование не приобреталось.

Основная заработная плата.

Таблица 13 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб.	k _{пр}	k _д	k _р	З _м , руб.	З _{дн} , руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Научный руководитель	28942	1	1	1.3	37624	1898	27	51246
Магистрант	3900	1	1	1.3	5070	354	85	30090

Месячный должностной оклад работника:

$$З_m = З_b \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

где З_б – базовый оклад, руб.;

k_{пр} – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

k_д – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

k_р – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}$$

где З_м – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня M=11,2 месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней M=10,4 месяца, 6-дневная неделя;

F_д – действительный годовой фонд рабочего времени научно- технического персонала, раб. дн.

Таблица 14 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	119	119
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	24	90
Действительный годовой фонд рабочего времени	222	156

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}$$

Где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{р}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

Зарплата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата	51246	30090
Дополнительная зарплата	6149	3610
Зарплата исполнителя	57395	33700
Итого по статье $C_{зп}$	91095	

Отчисления на социальные нужды.

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Научные и производственные командировки.

В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы.

Накладные расходы.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

4.1 Оценка сравнительной эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования.

Таблица 16 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Повышение эффективности преобразования		0.35	5	3	1
2. Удобство в эксплуатации		0.15	4	4	5
3. Надежность конструкции		0.2	4	4	5
4. Простота установки конструкции		0.1	3	3	5
6. Материалоемкость		0.2	3	2	4
ИТОГО		1			

Аналог 1 – Использование метода лазерной подсветки;

Аналог 2 – Использование различных вариантов теневой съемки.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

Где Φ_{pi} стоимость i-го варианта исполнения

Φ_{max} максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a$$

Где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания

n – число параметров сравнения

$$I_m^p = 0.35 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.1 \cdot 3 + 0.2 \cdot 3 = 4.05$$

$$I_m^{a1} = 3.15$$

$$I_m^{a2} = 3.4$$

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формулам:

$$I_{\text{финир}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p}$$

$$I_{\text{финир}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

(13)

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финир}}^p}{I_{\text{финир}}^a}$$

Сравнительная эффективность разработки

Таблица 17. Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Интегральный финансовый показатель разработки	1	0.7	0,7
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.05	3.15	3.4
Интегральный показатель эффективности	4.05	4.5	4.85
Сравнительная эффективность вариантов исполнения		0.9	0.83

По результатам данного анализа текущий проект менее эффективен чем визуализация методом лазерной подсветки и теневой съемки.

Заключение

В работе продемонстрирована возможность использования малогабаритных лазеров на парах бромида меди в задачах визуализации процессов получения наноматериалов методом лазерного испарения.

Несмотря на то что использовалась активная среда малого объема с низкой мощностью излучения, удалось зафиксировать образующееся облако наночастиц в рассеянном свете при регистрации изображения, формируемого одним импульсом излучения CuBr-лазера с энергией 50 мкДж. Применение частотной фильтрации за счет интерференционных фильтров с полосой пропускания 10 нм не позволило полностью избавиться от влияния собственного свечения лазерного факела.

Полностью устранить влияние фоновой засветки удалось в схеме лазерного монитора, когда в качестве фильтра выступает активная среда CuBr-лазера. В этом случае зафиксировать облако наночастиц не удалось, но был обнаружен паровой столб, время начала уменьшения которого зависит от прозрачности испаряемой мишени. Опираясь на результаты визуализации в лазерном мониторе, мы определили момент появления капель в зависимости от прозрачности используемой мишени.

Другие данные были получены при использовании CuBr лазера в качестве источника подсветки для съемки теневой картины. Интересной была информация о времени образования паров относительно прихода аблирующего импульса, сопоставление интенсивности парообразования и спектрального анализа.

Таким образом, лазеры на парах бромида меди могут быть использованы для проведения комплексных исследований процессов получения наноматериалов, успешно дополняя другие методы и средства диагностики. Уникальное сочетание свойств лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов и их галогенидов позволяет использовать их как для подсветки процесса образования наноструктур, так и для полного устранения фоновой засветки образующегося факела. Высокая спектральная

яркость и малая длительность импульса лазера позволили полностью подавить фоновую засветку и зафиксировать крупные фрагменты. Кроме того, малая длительность импульса генерации лазера позволила добиться качественных изображений, не размазанных по кадру.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00175) и грантов РФФИ (№ 14-32-50627-мол-нр, 14-08-00181А), а также в рамках

Список публикаций студента

- [1] Evtushenko G. S. , Fedorov V. F. , Shiyanov D. V. , Fedorov K. V. , Torgaev S. N. , Kulagin A. E. Low Current Discharge Copper Vapor Laser // Russian Physics Journal. - 2016 - Vol. 58 - №. 9. - p. 1278-1283
- [2] Gubarev F. A. , Fedorov V. F. , Fedorov K. V. , Shiyanov D. V. , Evtushenko G. S. Copper bromide vapour laser with an output pulse duration of up to 320 ns // Quantum Electronics. - 2016 - Vol. 46 - №. 1. - p. 57-60
- [3] Trigub M. V. , Fedorov K. V. , Evtushenko G. S. Investigation of Active Optical Systems for Remote Object Visualization // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM - 2015): proceedings, Novosibirsk, 29 June-3 July 2015. - New York: IEEE, 2015 - p. 321-324
- [4] Fedorov K. V. , Evtushenko G. S. , Trigub M. V. Laser Monitor for Remote Object Visualization // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) : proceedings, Omsk, May 21-23, 2015. - Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2015 - p. 1-5
- [5] Fedorov K. V. , Fedorov V. F. , Gubarev F. A. , Evtushenko G. S. Long-Pulse Copper Bromide Laser // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2014): proceedings, Алтай, 30 June-4 July 2014. - Novosibirsk: NSTU, 2014 - p. 333-336
- [6] Gubarev F. A. , Trigub M. V. , Fedorov K. V. Influence of Discharge Circuit Reactance on CuBr Laser Output // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2014): proceedings, Алтай, 30 June-4 July 2014. - Novosibirsk: NSTU, 2014 - p. 309-31
- [7] Тригуб М. В. , Платонов В. В. , Федоров К. В. , Евтушенко Г. С. , Осипов В. В. CuBr-лазер в задачах визуализации процессов получения наноматериалов // Оптика атмосферы и океана. - 2016 - Т. 29 - №. 3. - С. 249-253
- [8] Евтушенко Г. С. , Федоров В. Ф. , Шиянов Д. В. , Федоров К. В. , Торгаев С. Н. , Кулагин А. Е. Слаботочный разряд в лазере на парах меди // Известия вузов. Физика. - 2015 - Т. 58 - №. 9. - С. 65-70
- [9] Тригуб М. В. , Федоров К. В. , Евтушенко Г. С. Визуализация объектов, расположенных на удалении до 5м от CuBr-усилителя яркости, с импульсом

излучения типичной длительности // Оптика атмосферы и океана. - 2015 - Т. 28 - №. 9. - С. 850-853

[10] Губарев Ф. А. , Тригуб М. В. , Евтушенко Г. С. , Федоров К. В. Влияние индуктивности разрядного контура на энергетические характеристики CuBr-лазера // Оптика атмосферы и океана. - 2013 - Т. 26 - №. 7. - С. 604-609

[11] Губарев Ф. А. , Федоров В. Ф. , Федоров К. В. , Евтушенко Г. С. Режим одиночных импульсов генерации CuBr-лазера // Оптика атмосферы и океана. - 2012 - Т. 25 - №. 12 - С. 1107-11114

[12] Губарев Ф. А. , Федоров В. Ф. , Федоров К. В. , Евтушенко Г. С. Управление энергией генерации CuBr-лазера // Известия Томского политехнического университета. - 2012 - Т. 320 - №. 4. - С. 106-110

[13] Федоров К. В. , Тригуб М. В. , Евтушенко Г. С. , Гребенников В. В. Исследование области зрения активной оптической системы с усилителем яркости при визуализации отдаленных объектов [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. - 2015 - №. Спецвыпуск (15). - С. 168-172. - Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/1217>

[14] Gubarev F. A. , Trigub M. V. , Evtushenko G. S. , Fedorov K. V. Influence of the Discharge Circuit Inductance on Output Characteristics of a CuBr Laser // Atmospheric and Oceanic Optics. - 2013 - Vol. 26 - №. 6. - p. 559-564

[15] Федоров К. В. , Губарев Ф. А. , Федоров В. Ф. Получение длинного импульса генерации в лазерах на парах металлов [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 9-13 Апреля 2012. - Томск: ТПУ, 2012 - Т. 1 - С. 273-274 - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

[16] Евтушенко Г. С. , Лисенков В. В. , Осипов В. В. , Платонов В. В. , Подкин А. В. , Спирина А. В. , Тихонов Е. В. , Тригуб М. В. , Федоров К. В. Исследование разлета в воздух лазерного факела, образующегося при испарении твердой мишени излучением мощного волоконного лазера // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: доклады VI Всероссийской конференции, Новосибирск, 24-27 Марта 2015. - Новосибирск: Параллель, 2015 - Т. 1 - С. 102-106

- [17] Федоров К.В., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Осипов В.В., Платонов В.В., Подкин А.В., Спирина А.В., Тихонов Е.В. Исследование разлета в воздух лазерного факела, образующегося при испарении твердой мишени излучением мощного волоконного лазера // Взаимодействия высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI всероссийской конференции. - 2015 - Т.1 - С.102-107
- [18] Федоров К. В. , Федоров В. Ф. , Губарев Ф. А. Применение лазера на парах бромида меди для передачи сигналов звуковой частоты // Научная сессия ТУСУР-2011: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 4-6 Мая 2011. - Томск: В-Спектр, 2011 - Т. 1 - С. 242-245
- [19] Evtushenko G. S. , Lisenkov V. V. , Osipov V. V. , Platonov V. V. , Podkin A. V. , Spirina A. V. , Tikhonov E. V. , Trigub M. V. , Fedorov K. V. Dynamic of laser plume from refractory oxide targets // Atomic and Molecular Pulsed Lasers: Abstracts of 12th International Conference , Tomsk, September 14-18, 2015. - Tomsk: Publishing House of IOA SB RAS, 2015 - p. 92
- [20] Fedorov K. V. , Trigub M. V. , Evtushenko G. S. Investigation of laser monitor for remote object visualization // Atomic and Molecular Pulsed Lasers: Abstracts of 12th International Conference , Tomsk, September 14-18, 2015. - Tomsk: Publishing House of IOA SB RAS, 2015 - p. 19
- [21] Fedorov V. F. , Shiyonov D. V. , Fedorov K. V. , Evtushenko G. S. Combined low-current discharge in copper vapor laser // Atomic and Molecular Pulsed Lasers: Abstracts of 12th International Conference , Tomsk, September 14-18, 2015. - Tomsk: Publishing House of IOA SB RAS, 2015 - p. 24
- [22] Trigub M. V. , Evtushenko G. S. , Fedorov K. V. The use of metal vapor lasers for object and process visualization // Atomic and Molecular Pulsed Lasers: Abstracts of 12th International Conference , Tomsk, September 14-18, 2015. - Tomsk: Publishing House of IOA SB RAS, 2015 - p. 81
- [23] Федоров В. Ф. , Федоров К. В. , Шиянов Д. В. , Евтушенко Г. С. Слаботочный разряд в лазере на парах меди // Лазеры на парах металлов (ЛПМ - 2014): сборник трудов симпозиума, Верхнее Лео, 22-26 Сентября 2014. - Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2014 - С. 84
- [24] Федоров К. В. , Губарев Ф. А. , Федоров В. Ф. , Евтушенко Г. С. Получение длинного импульса генерации лазера на парах бромида меди //

Лазеры на парах металлов (ЛПМ - 2014): сборник трудов симпозиума, Верхнее Лоо, 22-26 Сентября 2014. - Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2014 - С. 83

[25] Fedorov K. V. , Shiyanov D. V. , Fedorov V. F. , Gubarev F. A. Copper Vapor Laser with Pulse Duration of 200 ns // Atomic and Molecular Pulsed Lasers: Abstracts of XI International Conference, Tomsk, September 16-20, 2013. - Томск: Publishing House of IAO SB RAS, 2013 - p. 17-18

[26] Федоров В. Ф. , Федоров А. И. , Шиянов Д. В. , Федоров К. В. Низкочастотный лазер на парах бромида меди // Лазеры на парах металлов (ЛПМ - 2012): сборник трудов симпозиума, посвященного памяти Г.Г. Петраша, Сочи, 24-28 Сентября 2012. - Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2012 - С. 84

[27] Федоров В. Ф. , Федоров К. В. , Губарев Ф. А. Режим одиночных импульсов генерации CuBr-лазера // Лазеры на парах металлов (ЛПМ - 2012): сборник трудов симпозиума, посвященного памяти Г.Г. Петраша, Сочи, 24-28 Сентября 2012. - Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2012 - С. 83

[28] Fedorov K. V. , Fedorov V. F. , Gubarev F. A. Cubr lasing control for data transmission system // Atomic and Molecular Pulsed Lasers: Abstracts of 10th International Conference , Tomsk, September 12-16, 2011. - Tomsk: Publishing House of IOA SB RAS, 2011 - p. 129-130

Список использованных источников

- [1] Ребиндер П.А. Избранные произведения. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. М., 1979.
- [2] Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. Екатеринбург, 1998. 3. Андриевский Р.А. // Усп. хим. 1994. 63. С. 431.
- [4] Ролдугин В.И. // Усп. хим. 1994. 69. С. 899
- [5] Хайрутдинов Р.Ф. // Коллоид. журн. 1993. 55. С. 144.
- [6] Губин С.П. Химия кластеров. М., 1987.
- [7] Muller H., Opitz C., Skala L. // J. Mol. Catal. 1989. 54. P. 389
- [8] Алымов М.И. Механические свойства нанокристаллических материалов. – М.: МИФИ, 2004. – 32 с.
- [9] Алымов М.И., Зеленский В.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. - М.: МИФИ, 2005. – 52 с.
- [10] Коротеев Н.И., Шумай И.Л. Физика мощного лазерного излучения. М.: “Наука”. Физматлит, 1991. 312 С.
- [11] Ready J.F. Effects of High-Power Laser Radiation. New York: Academic Press, 1971. 637 P.
- [12] Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. 2002. Т. 172. № 3. С. 301-333.
- [13] Riehemann W. Synthesis of Nanoscaled Powders by Laser Evaporation of Materials // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. V. 501. P. 3-14.
- [14] Popp U., Herbig R., Michel G. et al. Properties of Nanocrystalline Ceramic Powders Prepared by Laser evaporation and Recondensation // Journal of the European Ceramic Society. 1998. V. 18. P. 1153-1160.
- [15] Котов Ю.А., Осипов В.В., Иванов М.Г. и др. Исследование характеристик оксидных нанопорошков, получаемых при испарении мишени импульсно-периодическим СО₂-лазером // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 11. С. 76-82.

- [16] Osipov V.V., Kotov Yu.A., Ivanov M.G., Samatov O.M., Lisenkov V.V., Platonov V.V., Murzakaev A.M., Medvedev A.I., Azarkevich E.I. Laser synthesis of nanopowders// Laser Physics. 2006. Vol. 16, №1. P.166-125.
- [17] Осипов В.В., Лисенков В.В., Платонов В.В., Орлов А.Н., Подкин А.В., Саввин И.А. Исследование воздействия импульсов мощного волоконного лазера иттербиевого лазера на вещество с неоднородным показателем поглощения. II. Получение и характеристики нанопорошков Nd:Y2O3//ЖТФ.2014.Т.84, №5. С.97-105.
- [18] Котов Ю.А., Саматов О.М., Иванов М.Г., Мурзакаев А.М., Медведев А.И., Тимошенкова О.Р., Демина Т.М., Выхина И.В. Получение композиционных нанопорошков с помощью волоконного иттербиевого лазера и их характеристики// ЖТФ.2011.Т.81, №5. С.65-68.
- [19] Оптические системы с усилителями яркости / Под ред. Г.Г. Петраша. – М.: Наука, 1991. (Труды ФИАН. 1991. Т. 206). – 152 с.
- [21] Асиновский Э.И., Батенин В.М., Климовский И.И., Марковец В.В. Исследование областей замыкания тока на электродах слаботочной угольной дуги с помощью лазерного монитора // Техника высоких температур. – 2001. – Т. 39. – № 5. – С. 794.
- [22] Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 152 с.
- [23] Abramov D.V., Arakelian S.M., Galkin A.F., Klimovskii I.I., Kucherik A.O., Prokoshev V.G. A laser-induced process on surface of a substance and their laser diagnostics in real time // Laser Physics. – 2005. – V. 15. – N 9. – Pp. 1313–1318.
- [24] Бужинский Р.О., Савранский В.В., Земсков К.И., Исаев А.А., Бужинский О.И. Наблюдение объектов в условиях сильной фоновой засветки от плазмы // Прикладная физика. – 2009. – № 3. – С. 96–98.
- [25] Беликов А.В., Скрипник А.В., Зулина Н.А. Лазерный синтез наноразмерных углеродных структур и их свойства. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 9. С. 50-56. [Тип: Статья, Год: 2013]
- [26] Zhang Liang ; Xiaowu Ni and Jian Lu" Interferometry and shadow method observation millisecond laser interaction with silicon plate ", Proc. SPIE 9543,

Third International Symposium on Laser Interaction with Matter, 95430Q (May 4, 2015); doi:10.1117/12.2182141;

[27] X. N. He ; L. B. Guo ; Z. Q. Xie ; X. Huang ; W. Hu, et al. "Laser-induced breakdown spectroscopy with improved spectral resolutions through the generation of high-temperature and low-density plasmas", Proc. SPIE 8244, Laser-based Micro- and Nanopackaging and Assembly VI, 82440H (February 9, 2012); doi:10.1117/12.910352;

[28] Santiago Palanco, Salvatore Marino, M. Gabás, Shanti Bijani, Luis Ayala, and José R. Ramos-Barrado, "Micro- and nanoparticle generation during nanosecond laser ablation: correlation between mass and optical emissions," Opt. Express 22, 3991-3999 (2014)

[29] Rajesh N. Raman, Selim Elhadj, Raluca A. Negres, Manyalibo J. Matthews, Michael D. Feit, and Stavros G. Demos, "Characterization of ejected fused silica particles following surface breakdown with nanosecond pulses," Opt. Express 20, 27708-27724 (2012)

[30] В.В. Осипов, В.В. Платонов, В.В. Лисенков, "Динамика лазерного факела в процессе синтеза наночастиц", *Квант. электроника*, 2009, **39** (6), 541–546.

[31] Foucault L., Ann. De l'observ. Imp. De Paris 5, 203 (1858)

[32] Toepler A., Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode, Bonn (1684)

[33] Тригуб, Максим Викторович. Лазерный монитор для неразрушающего контроля изделий и визуализации быстропротекающих процессов в условиях фоновой засветки [Электронный ресурс] : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.11.13 / М. Томск: 2013.

[34] Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости. ИПН АФ СССР. Горький, 1988. 173с.

[35] Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Торгаев С.Н., Тригуб М.В. Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах металлов в условиях мощной засветки // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 141–146.

- [36] Евтушенко Г.С., Тригуб М.В., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. Лазерный проекционный микроскоп с покадровой регистрацией изображения // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 154–158
- [37] . Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображений // Контроль. Диагностика. Спецвыпуск. – 2011. – С. 140–143.
- [38] Тригуб М.В., Платонов В.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С., Осипов В.В. CuBr-лазер в задачах визуализации процессов получения наноматериалов. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 03. С. 249–253.