На правах рукописи

Тригуб Максим Викторович

ЛАЗЕРНЫЙ МОНИТОР ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

Специальность 05.11.13 –
«Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», на кафедре промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля, и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук» (ИОА СО РАН), в лаборатории квантовой электроники.

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Евтушенко Геннадий Сергеевич**
Официальные оппоненты:	доктор технических наук **Бужинский Олег Игоревич** Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», начальник лаборатории перспективных разработок
	доктор технических наук, профессор **Кулешов Валерий Константинович** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения» СО РАН, г. Томск

Защита состоится 19 ноября 2013 г. в 15 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, Россия, г. Томск, ул. Савиных, 7, Институт неразрушающего контроля, зал заседаний, 2-й этаж.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «___» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время развитие новых технологий зачастую 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 – малые размеры области воздействия, высокая скорость протекания, наличие экранирующей засветки (как правило, широкополосной), интенсивность которой может достигать значительных величин, не позволяют проводить их визуализацию в режиме реального времени. Для решения задачи визуализации наиболее предпочтительными являются активные оптические методы неразрушающего контроля с использованием индуцированного излучения. К таким методам относятся лазерная подсветка и системы с усилителями яркости изображения [1].

Системы с усилителями яркости изображения – активные оптические системы (АОС) получили широкое распространение в 70–80 гг. XX в., когда применялись, в основном, для получения увеличенных изображений на больших экранах. С развитием современной проекционной техники интерес к ним снизился. Однако важная особенность подобных систем – возможность наблюдения процессов в условиях мощной фоновой засветки за счет высокой спектральной яркости излучения с высоким временным разрешением – стала активно использоваться с появлением на рынке высокоскоростной регистрирующей аппаратуры – высокоскоростных цифровых камер. Одним из первых, кто предложил использовать подобные системы для наблюдения процессов, протекающих в условиях мощной фоновой засветки в режиме реального времени, был И.И. Климовский [2]. Он же ввел термин «лазерный монитор» для подобных систем.

Большинство ранних и современных работ посвящено использованию АОС с усилителями яркости на самоограниченных переходах атома меди для наблюдения различных процессов [3–6]. Активные элементы (АЭ) на парах галогенидов меди, в том числе с добавками HBr, имеют более предпочтительные характеристики и параметры: меньшие рабочие температуры, бóльшие частоты следования импульсов (ЧСИ) и т.д. Использование таких элементов позволит увеличить временное разрешение АОС, упростить конструкцию и, как результат, разработать приборный вариант подобного устройства.

Цель диссертационной работы

Целью работы является разработка высокоскоростного лазерного монитора на основе активной среды на парах бромида меди, позволяющего наблюдать объекты и процессы, экранированные мощной широкополосной фоновой засветкой, с высоким временным разрешением.

Задачи диссертационной работы

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1) проанализировать результаты исследований АОС с усилителями яркости на парах металлов, а также примеры их использования для наблюдения различных процессов и объектов;

2) показать возможность использования в качестве усилителя яркости активных элементов на парах бромида меди с различными типами накачки (традиционной и емкостной) и способами создания активной среды;

3) разработать систему, позволяющую проводить визуализацию процессов в каждом импульсе сверхсветимости, со скоростью, равной ЧСИ усилителя яркости;

4) исследовать усилительные характеристики активных элементов лазеров на парах галогенидов металлов при различных режимах накачки, различных концентрациях паров рабочего вещества и добавки HBr;

5) разработать аппаратно-программный комплекс (скоростной лазерный монитор), включающий в себя активный элемент, источник накачки, систему регистрации, программное обеспечение;

6) с помощью разработанного устройства провести визуализацию объектов и процессов, протекающих в условиях широкополосной фоновой засветки в режиме реального времени.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались, в основном, экспериментальные методы исследования, которые включали в себя:

– исследование энергетических, частотных, спектральных и временных характеристик сверхизлучения и генерации лазеров на парах галогенидов металлов;

– измерение электрических параметров импульсно-периодического разряда в смесях CuBr–Ne–HBr (H_2) в широком диапазоне частот следования импульсов накачки от 15 до 100 кГц;

– измерение коэффициента усиления активных сред на парах металлов с различными способами создания паров и возбуждения;

– высокоскоростную регистрацию и обработку изображений, формируемых за время, равное времени сверхизлучения усилителя яркости, с использованием современного фоторегистрирующего оборудования и программного обеспечения, определение контраста изображений.

Анализ предельных характеристик фоновой засветки и расчет оптических схем проводились с использованием матричных методов в области Гаусса.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Использование активной среды CuBr-лазера с добавкой HBr (0.15–0.2 торр) совместно со схемой синхронизации усилителя яркости и скоростного регистратора позволяет визуализировать процессы, экранированные широкополосной фоновой засветкой с временным разрешением до 10 мкс.

2. Условия работы активных элементов на парах галогенидов металлов для получения контрастного изображения в режиме усилителя яркости отличаются от условий, обеспечивающих получение максимальной средней мощности генерации лазера. Отличие заключается в меньшей концентрации паров рабочего вещества (CuBr) и активной добавки (HBr) при работе в качестве усилителя яркости.

3. Активные элементы на переходах атомов металлов с внутренним реактором галогенида имеют такие же усилительные характеристики (усиление до 100 дБ/м), что и элементы с традиционным способом создания активной среды на парах металлов и их галогенидов, и могут быть использованы в качестве усилителя яркости в лазерных мониторах.

4. Разработанный аппаратно-программный комплекс (скоростной лазерный монитор) позволяет получать изображения объектов и процессов со скоростью съемки до 50 тыс. кадров/с, формируемые одним импульсом сверхизлучения, с локальным контрастом от 10 до 100% и пространственным разрешением до 1 мкм.

Достоверность защищаемых положений и других результатов работы

Достоверность защищаемых положений подтверждается применением общепринятых методик измерения параметров разряда и генерации, использованием современной регистрирующей аппаратуры (осциллографы Tektronix TDS3054C, LeCroyWJ 324, измеритель тока – Pearson Current Monitors 8450, высоковольтный пробник – Tektronix P6015A, измеритель мощности Ophir 30C-SH, измерители импульса генерации ФЭК-22, Thorlabs DET 10A/M), высокоскоростной регистрирующей аппаратуры (Fastec HiSpec 1, MotionPro X3), современного программного обеспечения (MATLAB, ImageJ). В качестве тестовых объектов для визуализации использовались дифракционные решетки, камера Горяева, оптические миры.

Научная новизна

1. Реализован режим покадровой регистрации изображения в лазерном мониторе при синхронизации усилителя яркости на парах галогенида меди и скоростного цифрового регистратора от источника накачки активного элемента.

2. На основе исследований усилительных характеристик активных элементов с различными типами накачки (традиционной и емкостной) и различными способами создания активных сред показано, что в качестве усилителей яркости изображений, наряду с традиционными, могут использоваться среды с внутренним реактором галогенида металла и емкостной накачкой.

3. Впервые, с использованием лазерного монитора, проведена визуализация процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) на примере горения различных смесей: Ni–Al, «Саянская» и др., что дает необходимую информацию о механизме формирования металлокерамических материалов в условиях фоновой засветки.

Научная и практическая значимость работы

1. Разработан действующий образец устройства на основе активного элемента на парах бромида меди, позволяющий осуществлять неразрушающий визуальный контроль изделий и быстропротекающих процессов, экранированных широкополосной фоновой засветкой, яркостная температура которой может достигать $4 \cdot 10^4$ К.

2. Предложен метод экспресс-оценки профиля усиления активной среды, позволяющий исследовать усилительные характеристики активного элемента без использования задающего генератора.

3. Разработанный макет лазерного монитора допускает работу с другими активными средами, в частности, на парах бромида марганца, с внутренним реактором галогенида металла.

4. Использование предложенной системы покадровой регистрации изображения позволяет визуализировать процессы и объекты с временным разрешением до 10^{-5} с. Каждый кадр формируется за время, равное длительности импульса сверхсветимости усилителя яркости $(2–10) \cdot 10^{-8}$ с.

Личный вклад автора состоит в:

– проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов;

– проведении модельных расчетов;

– создании действующего образца устройства.

Постановка задач исследований, анализ полученных данных осуществлялись совместно с научным руководителем. Результаты, составившие основу защищаемых положений, получены лично автором либо при его определяющем участии.

В работе на разных её этапах принимали участие сотрудники ИОА СО РАН и Томского политехнического университета В.Ф. Федоров, Д.В. Шиянов, С.Н. Торгаев, Ф.А. Губарев, В.Б. Суханов, магистранты кафедры ПМЭ ТПУ Е.З. Дашинимаева, И.В. Красников.

Визуализация процессов СВС проводилась совместно с сотрудниками Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН А.И. Кирдяшкиным, В.Д. Китлером, Р.А. Юсуповым.

Апробация результатов работы

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на:

1. XVII, XVIII, XIX симпозиумах «Лазеры на парах металлов», Лоо–Сочи, 2008, 2010, 2012;

2. International Conference and Seminar «Micro/Nanotechnologies and Electron Devices», г. Новосибирск, 2011, 2012;

3. I, II всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Инновации в неразрушающем контроле SibTest», г. Горно-Алтайск, 2011, пос. Листвянка, 2013;

4. IX, X, XI International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Lasers»-AMPL, Tomsk, Russia, 2009, 2011, 2013;

5. Молодежной школе-конференции с международным участием «Лазеры и лазерные технологии», г. Томск, 2010, 2012;

6. II Международной научно-практической конференции молодых ученых «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений», г. Томск, 2010;

7. XVIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers Conference, Sofia, 2010;

8. XXXI International Scientific Conference «Electronics and Nanotechnology» ELNANO, г. Киев, 2011;

9. XV, XVI, XVII, XVIII, XIX международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2009–2013;

10. VIII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применения», г. Москва, НИЯУ МИФИ, 2012;

11. XIII, XV всероссийских конференциях «Диагностика высокотемпературной плазмы», г. Звенигород, 2009, 2013;

12. Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технология. Инновация», г. Новосибирск, 2011;

13. XIII международной научно-технической конференции «Измерения, контроль, информатизация-2012», г. Барнаул, 2012;

14. Семинарах лаборатории квантовой электроники ИОА СО РАН и кафедры промышленной и медицинской электроники ТПУ.

Результаты исследований включены в отчеты по грантам Минобрнауки, АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект № 2.1.2/1425 «Активные среды на парах галогенидов металлов для создания скоростных лазерных мониторов», 2009–2011 гг., Президента РФ МК-4438.2012.8, Государственному заданию Минобрнауки № 7.586.2011 «Аппаратно-программный комплекс на основе лазерного монитора для неразрушающего контроля и диагностики», 2012–2014 гг. Результаты работы легли в основу индивидуального гранта «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» (У.М.Н.И.К., 2009–2011 гг.).

Основные результаты, включенные в диссертацию, опубликованы в 10 печатных работах в рецензируемых изданиях из Перечня ВАК. Получены патент РФ на изобретение и патент на полезную модель. Список основных публикаций приведен в конце автореферата. Общее число публикаций по теме – 31.

Структура и краткое содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 116 ссылок, и четырех приложений. Работа содержит 157 страниц, включая 82 рисунка, 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждается актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены защищаемые положения. Приводится краткое содержание работы, отмечаются практическая значимость и научная новизна.

В **первой главе** проведен литературный обзор работ по теме исследования. Рассматриваются области применения активных оптических систем с усилителями яркости на парах металлов. Описаны основные особенности подобных систем. На начальном этапе использование АОС было сосредоточено, в основном, в сферах, где требовалось получение увеличенных изображений на больших экранах – проекционных системах. В дальнейшем такие системы стали применяться для визуализации процессов, протекающих в условиях, не позволяющих проводить их наблюдение обычными методами. Практически во всех работах, где производилось наблюдение реальных объектов и процессов с помощью АОС, использовались активные элементы на парах меди. Однако для построения высокоскоростных АОС целесообразно применять активные среды на парах бромида меди. Рассмотрены работы, проводимые в тот же период времени, что и настоящая работа, где также применялись современные скоростные регистраторы. Большое внимание уделено рассмотрению возможных конструкций усилителей яркости.

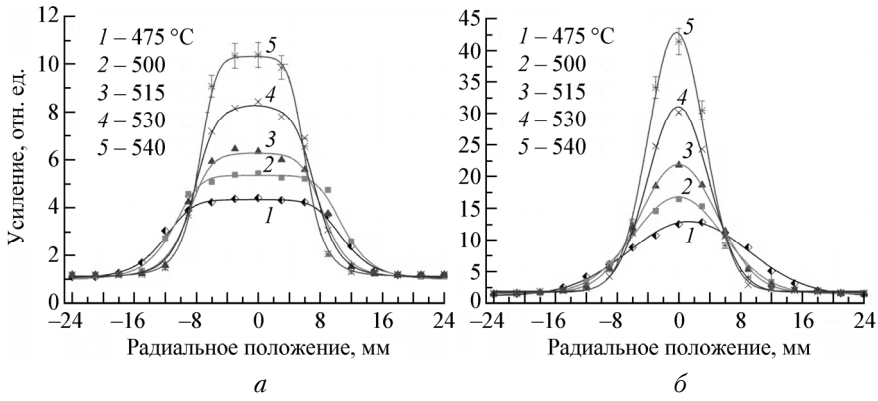
Во **второй главе** представлены приборы, методы и техника экспериментов, оптические схемы – лазерного проекционного микроскопа и лазерного монитора. Для регистрации изображений использованы как стандартные камеры Casio EX-FH10, так и профессиональные скоростные: MotionPro X3, Fastec HiSpec1. Представлено описание используемого программного обеспечения.

Приводятся конструкции и описание активных элементов и источников накачки. Предложенная конструкция источника накачки с полупроводниковыми коммутаторами позволила получить ЧСИ 120 кГц на газоразрядной трубке (ГРТ) малого объема. Также представлена схема с импульсным зарядом рабочей емкости, позволяющая увеличить ресурс коммутационного элемента (тиратрона).

Третья глава посвящена исследованию усилительных характеристик активных сред на переходах атомов металлов с различными способами возбуждения и их создания с целью выявления режима, обеспечивающего получение изображений с максимальным контрастом и полем зрения. Рассматривается возможность использования АЭ с различными способами возбуждения и создания активной среды для работы в АОС.

В первом разделе главы представлены результаты использования активных элементов на парах бромида меди с традиционной и емкостной накачкой для усиления изображений в АОС. Произведена визуализация различных объектов: металлическая сетка (размер грани 200 мкм), клетка кожицы лука, мазок цельной крови и др. Для исследования пространственного разрешения проведена визуализация дифракционных решеток 600 и 1200 штр./мм. Контраст при этом получается не хуже 35% в случае 600 пар линий на 1 мм. Кроме статичных объектов, проводилась визуализация процессов, протекающих в условиях фоновой засветки: горения бенгальской свечи и процесса СВС. Полученные результаты показали возможность использования активной среды на парах бромида меди с емкостным способом возбуждения для схем лазерного монитора и лазерного проекционного микроскопа.

Во втором разделе главы приведены результаты исследования усилительных характеристик (эффективного коэффициента усиления, профиля усиления) активного элемента на парах бромида меди с традиционной накачкой при различных концентрациях рабочего вещества, добавки HBr, различной мощности накачки. Наибольший интерес представляло влияние добавки HBr на профиль усиления, который определяет искажения, вносимые усилителем яркости. Добавка HBr позволяет увеличить ЧСИ, что определит временное разрешение лазерного монитора. Измерение характеристик проводилось в схеме «задающий генератор – усилитель». На рис. 1 приведены профили усиления при различных концентрациях паров CuBr в активной среде при мощности накачки усилителя 1440 Вт, диаметр активной зоны усилителя составлял 9 см. Установлено, чем больше диаметр ГРТ, тем меньше искажения, вносимые геометрией усилителя яркости. Однако, как показали результаты измерений, эффективный диаметр значительно меньше.



а *б*

Рис. 1. Профиль усиления при различной температуре контейнеров с бромидом меди без добавки (*а*) и с добавкой (*б*) HBr

Как видно из рис. 1, с ростом температуры контейнеров с бромидом меди происходит сужение профиля усиления, причем как с добавкой HBr, так и без нее. Ширина профиля усиления, измеряемая по полувысоте, без добавки изменяется от 24 до 15 мм при изменении температуры от 475 до 540 °С, а при наличии добавки – от 16 до 9 мм. Такое поведение активной среды, вероятно, связано с малым энерговкладом в разряд (~ 0.17 Вт/см^3 при вводимой в разряд мощности 780 Вт), когда введение активной примеси приводит к сужению разряда. В то же время добавка HBr значительно увеличивает коэффициент усиления (на оси он возрастает в 3–4 раза), что увеличивает выходную мощность. Данный эффект важен в задачах получения максимальной мощности генерации, но не требуется для лазерного монитора. Отсутствие провала в центральной области (рис. 1, *а*) свидетельствует о небольшом (остаточном) количестве HBr в среде. Профиль усиления, представленный на рис. 1, *а* при температуре 475 °С, является предпочтительным для работы активного элемента в качестве усилителя яркости, так как имеет большую ширину и равномерность, однако мощность генерации не будет максимальной.

На качество получаемых изображений будет влиять не только профиль усиления активного элемента, но и то, как фиксируется изображение регистратором. Одной из особенностей активных сред на парах металлов является малая длительность импульса сверхизлучения (десятки – сотни нс). Следовательно, регистрация изображения, формируемого одиночным импульсом сверхизлучения, позволит снизить искажения, вносимые усилителем яркости. Достигается данный режим (покадровый) за счет использования схемы синхронизации. Эта часть работы изложена в третьем разделе главы 3. Синхронизация осуществляется от источника накачки, что позволяет использовать предложенную схему с любыми усилителями яркости. Структурная схема лазерного монитора с покадровой регистрацией изображения приведена на рис. 2.

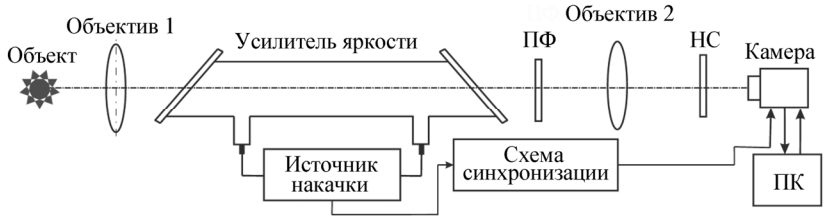


Рис. 2. Схема лазерного монитора с возможностью регистрации изображений, формируемых одиночным импульсом сверхсветимости

Активная оптическая система, представленная на рис. 2, содержит усилитель яркости на основе активной среды на парах галогенида металла с источником накачки, с одной стороны от которого вдоль оптической оси

расположены объектив 1 и объект, а с другой – фильтры: нейтральный (НС) и полосовой (ПФ), объектив 2 и скоростная камера. Камера управляется с помощью персонального компьютера (ПК), формирование синхроимпульса осуществляется в схеме синхронизации входным сигналом для которой является сигнал управления от источника накачки. Формирователь синхроимпульса, выполненный с использованием микроконтроллера семейства AVR, позволяет определять ЧСИ усилителя яркости, содержит клавиатуру для управления и индикатор для отображения параметров. Осциллограммы, поясняющие принцип действия устройства, приведены на рис. 3.

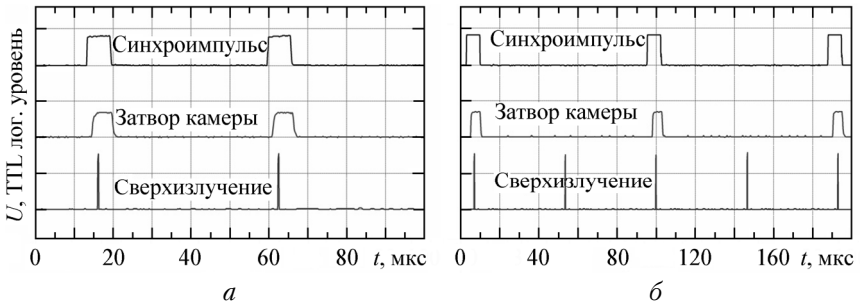


Рис. 3. Осциллограммы работы схемы синхронизации для лазерного монитора при различной скорости съемки

Таким образом, предложенная схема синхронизации дает возможность получать изображения в лазерном мониторе, формируемые одиночным импульсом сверхсветимости, что видно из диаграмм. В экспозицию камеры попадает лишь один импульс излучения, что позволяет проводить съемку со скоростью, равной ЧСИ усилителя яркости (рис. 3, *а*).

Помимо возможности получения изображений с малыми искажениями, предложенная схема позволяет проводить экспресс-оценку профиля усиления. Выше были показаны результаты исследования профиля усиления с использованием задающего генератора, что является довольно трудоемким процессом. Ниже дано описание схемы и методики, позволяющей оперативно проводить анализ профиля усиления без использования задающего генератора. Схема, аналогична представленной на рис. 2, однако вместо объекта и объектива 1 устанавливается глухое зеркало, обеспечивающее однопроходовый режим работы. Для устранения паразитных отражений от плоскостей оптических элементов их наклоняют под малыми углами относительно оптической оси. Нейтральными светофильтрами сигнал ослабляется до уровня чувствительности сенсора камеры. Суть метода заключается в регистрации и анализе изображения пучка, получаемого в однопроходовом режиме работы, а распределение интенсивности пикселей является профилем усиления. Метод позволяет отслеживать профиль усиления и его изменение при

варьировании условий работы усилителя яркости – мощности накачки, концентрации рабочего вещества, ЧСИ и т.д. Покадровый режим обеспечивает высокую точность метода. На рис. 4 приведены профили усиления при работе с добавкой HBr и без нее, по оси абсцисс отложен номер пикселя, по оси ординат – интенсивность при 8-битном кодировании изображения.

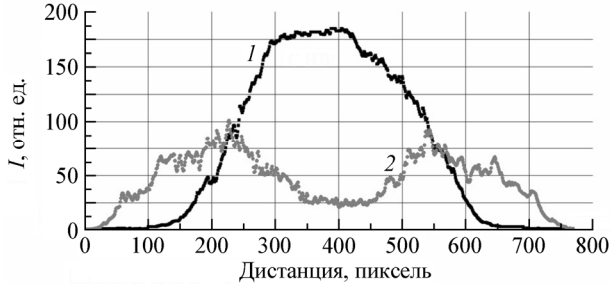


Рис. 4. Профиль усиления, полученный при использовании предложенной методики: *1* – с HBr; *2* – без HBr

Наряду с профилем усиления важными параметрами являются мощность сверхсветимости и коэффициент эффективного усиления среды. Сверхсветимость определяет уровень входного сигнала для усилителя яркости, а также является фоном на получаемом изображении, приводящим к снижению контраста. Эффективный коэффициент усиления (K), определяющий уровень выходного сигнала и контраст изображения, вычисляется как отношение мощности однопроходового сигнала к мощности сверхсветимости. В следующих разделах главы проводится анализ усилительных характеристик активных элементов с различными типами накачки, способами создания активной среды и т.д.

В четвертом разделе главы проводится анализ усилительных характеристик при работе активного элемента при наличии добавки HBr и без нее для традиционного типа накачки с внутренними электродами. На рис. 5 показаны зависимости характеристик от концентрации паров рабочего вещества при работе без добавки HBr.

Максимум мощности сверхсветимости (P_0) и максимум эффективного коэффициента усиления наблюдаются при различных концентрациях паров рабочего вещества при различных мощностях накачки. Результаты визуализации металлической сетки для разных температур генератора бромида при мощности накачки 900 Вт приведены на рис. 6. При малых концентрациях паров рабочего вещества, соответствующих диапазону температур 415–430 °C, контраст мал (менее 10%), что вызвано фоном и недостаточным усилением. Изображение с наибольшим полем зрения и контрастом получается при температуре 450 °C, когда усиление максимально и контраст достигает 100%.

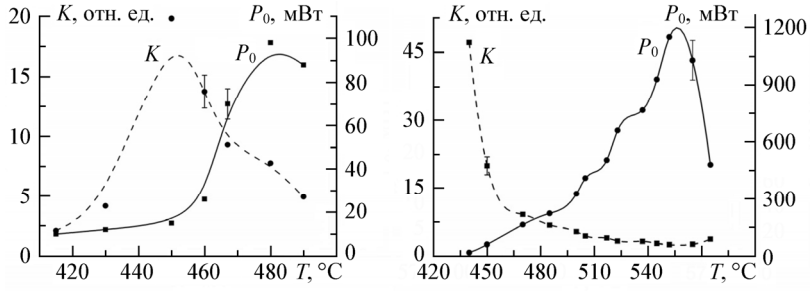


Рис. 5. Зависимость мощности сверхсветимости (P_0 – сплошная линия) и эффективного усиления (K – пунктирная линия) от температуры контейнеров с бромидом меди при различной мощности накачки: *а* – 900, *б* – 1500 Вт

При дальнейшем увеличении температуры наблюдается уменьшение диаметра пучка, что приводит к уменьшению поля зрения (460–490 °С). Максимум мощности генерации наблюдается при температуре 470–480 °С, что соответствует максимуму мощности сверхсветимости. С добавкой HBr наблюдалась аналогичная картина, однако значения мощности сверхсветимости и коэффициента усиления были выше. Таким образом, условия работы активного элемента, обеспечивающие получение изображений наилучшего качества, отличаются от условий максимума мощности генерации и наблюдаются при меньших концентрациях рабочего вещества.

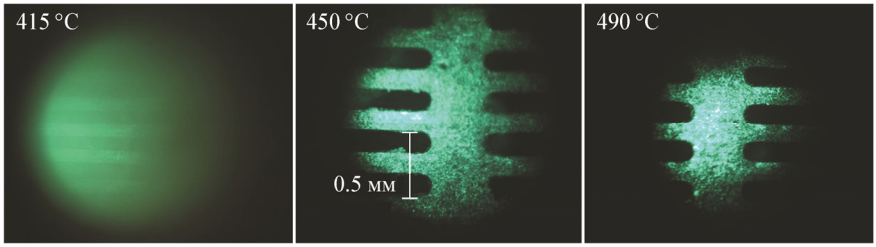


Рис. 6. Изображение тестового объекта при различной температуре контейнеров с бромидом меди

Для определения требуемой концентрации добавки HBr, обеспечивающей максимальное поле зрение и равномерность профиля усиления, проведены исследования усилительных характеристик. Температура генератора HBr, при которой наблюдался максимум мощности генерации (12 Вт при 1500 Вт накачки) составляла 120 °С. В эксперименте температура исходно устанавливалась на уровне 110 °С (давление HBr при этом составляло 0.2 торр) и фиксировался профиль усиления по предложенной методике через равные промежутки времени. Результаты эксперимента приведены на рис. 7.

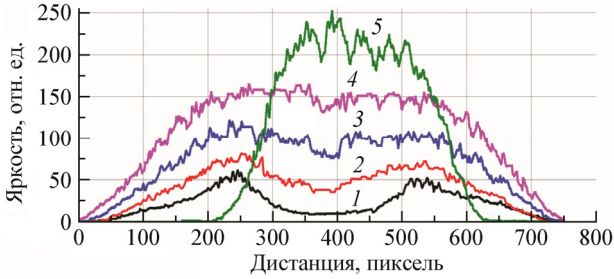
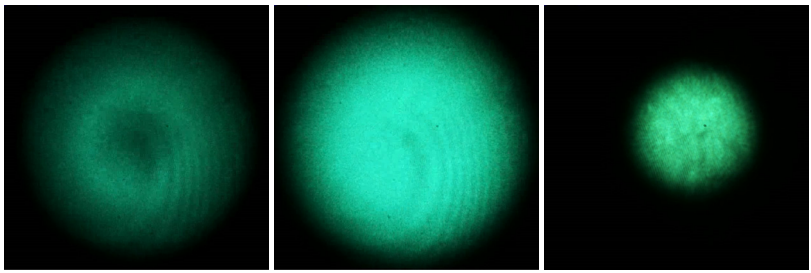


Рис. 7. Профиль усиления при различной концентрации HBr в активной зоне

Кривая *1* соответствует началу эксперимента. Профили снимались каждые 10 мин. Спустя 50 мин профиль не изменялся и соответствовал кривой *5*. Оптимальным условием является концентрация, обеспечивающая профиль *4*, так как в этом случае отсутствует провал в центре и ширина профиля по полувысоте максимальна. Такой режим наблюдается при температуре генератора HBr 100 °C, что обеспечивает давление 0.15 торр. Мощность генерации в этом случае составляла 8 Вт. На рис. 8 для наглядности приведены изображения однопроходового пучка. Следовательно, оптимальные концентрации паров HBr в активной среде для работы в режиме усилителя яркости изображения меньше, чем для режима генератора при максимальной мощности излучения.



а *б* *в*

Рис. 8. Изображение однопроходового пучка при температуре генератора с HBr, равной: *а* – 20, *б* – 100, *в* – 110 °C

Опираясь на полученные результаты, удалось получить изображения в АОС с усилителем яркости на парах бромида меди, работающем с ЧСИ 100 кГц. Эти результаты представлены в пятом разделе главы 3. Для сравнения на рис. 9 представлены результаты визуализации тестового объекта при ЧСИ 60 кГц без добавки (*а*) и при ее наличии (*б*). Также приведены распределения интенсивности пикселей по указанной пунктирной линии.

Очевидно, что возможность визуализации процессов и объектов на нескольких длинах волн позволит получать дополнительную информацию.

ГРТ реакторного типа допускает производить оперативную замену рабочего металла и, как следствие, изменять длину волны. А использование емкостного способа накачки исключает контакт материала электродов с химически агрессивной средой, в частности, содержащей галогенводороды. Проведены сравнения усилительных характеристик АЭ с емкостным и традиционным способами возбуждения. В качестве рабочих сред использовались среды на парах бромида марганца и хлорида меди. Эти результаты приведены в шестом разделе главы 3. Исследования показали, что усилительные характеристики АЭ на переходах атомов меди с емкостной накачкой при различном способе создания активной среды подобны этим величинам при традиционной накачке с внутренними электродами. А эффективный коэффициент усиления также велик и достигает 100 дБ при малом входном сигнале. Усилитель позволяет получать изображения с контрастом до 100%.

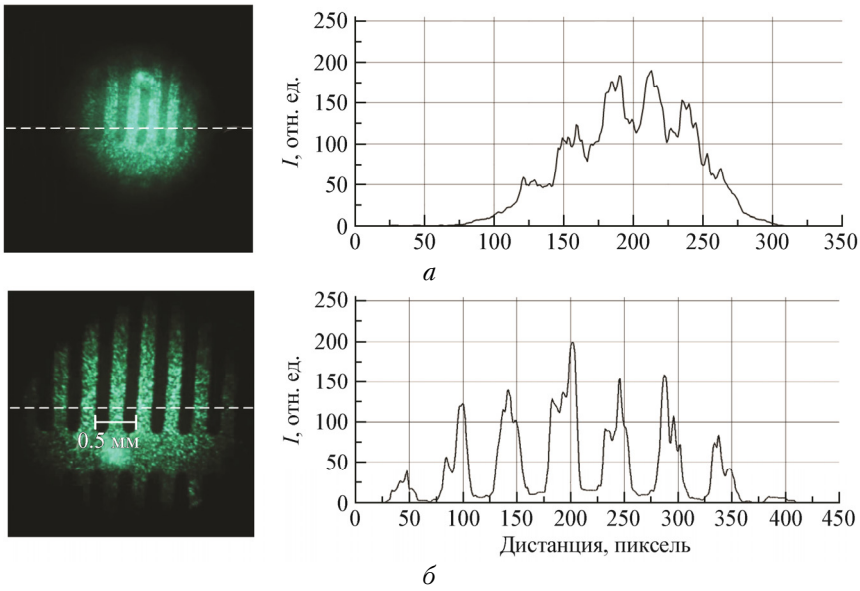
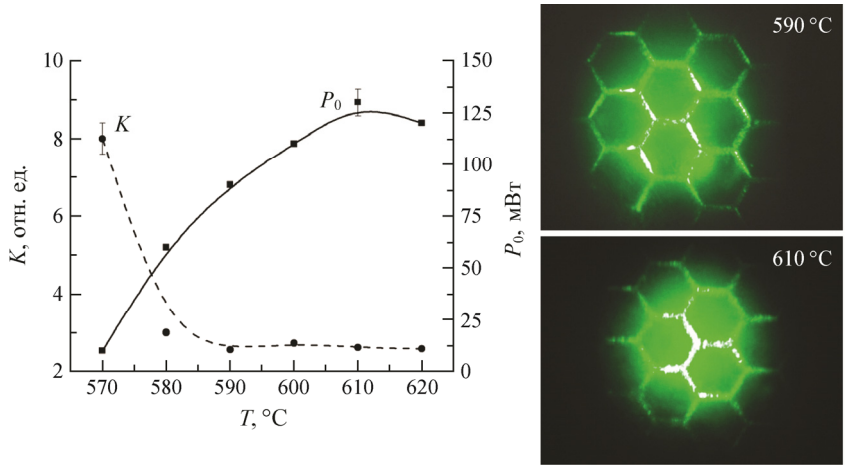


Рис. 9. Изображения тестового объекта при высоких ЧСИ (60 кГц) усилителя яркости на парах бромида меди: *а* – без добавки HBr; *б* – с добавкой

Усилительные характеристики активной среды на переходах марганца с созданием галогенида металла непосредственно в разрядной трубке и традиционным способом возбуждения приведены на рис. 10, *а*. Изображения тестового объекта, получаемые с данным усилителем при различной концентрации паров рабочего вещества, представлены на рис. 10, *б*. Данная среда менее пригодна для получения изображений высокого качества. Контраст получаемых изображений очень низок (20%), а изображения в значительной

степени зашумлены. Как и для случая активной среды на парах бромида меди, условия, обеспечивающие максимум мощности генерации и максимальный контраст изображения, отличаются. Максимум мощности генерации соответствует температуре 610 °С, а наибольший контраст – 590 °С, что наблюдалось и для ГРТ с традиционным способом создания активной среды. Для указанного АЭ, работающего в режиме генератора, удалось достичь ЧСИ 100 кГц в трубке диаметром 2 см. Это значение является рекордным для лазера на самоограниченных переходах атома марганца.



а *б*

Рис. 10. Усилительные характеристики активной среды на парах бромида марганца с внутренним реактором галогенида (*а*) и изображения, получаемые в АОС на его основе при различных условиях работы (*б*)

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию лабораторного макета и действующего образца лазерного монитора. В первом разделе главы рассмотрен лазерный монитор с покадровой регистрацией изображения. Расчет оптической схемы проведен с использованием алгоритма, реализованного в Mathcad, который основан на матричных методах в области Гаусса. Он позволяет определить положение изображения и увеличение системы. Здесь же рассмотрены аппаратные и программные методы улучшения контраста изображения. В схемах с усилителями яркости на парах металлов на контраст влияют обратные связи – паразитные отражения и блики от оптических элементов. Показано, что контраст, в значительной мере, зависит и от мощности сверхсветимости и от коэффициента отражения объекта наблюдения. Визуализация объекта со 100%-м контрастом, в качестве которого использовалось глухое зеркало с отверстием, показала, что контраст изображения при некоторых условиях работы составляет менее 70%, что

обусловлено наличием фона. Однако покадровая регистрация изображения и предложенные методики улучшения контраста изображения путем математического учета фона, получаемого при отсутствии объекта, позволили увеличить контраст на 30% относительно исходного.

Для исследования ряда процессов, наблюдаемых с помощью лазерного монитора, важно знать перемещение интересующей области (при СВС, лазерной обработке и т.д.). Нами разработано программное обеспечение в среде MatLAB и ImageJ для определения перемещений объекта или его области с использованием корреляционного подхода. Тестирование алгоритма проводилось на полученных в АОС изображениях тестовых объектов (металлическая сетка, камера Горяева и др.), которые перемещались на заданные расстояния с использованием точного оптомеханического оборудования фирмы Standa. Для проверки результатов измерения использовалась программа DVector, позволяющая с субпиксельной точностью определять перемещения объекта по изображениям. При перемещении объекта на 50 мкм погрешность определения не превышала 1%, при движении объекта с шагом 100 мкм она составила менее 2%. Погрешность объясняется изменением усилительных характеристик активного элемента в течение импульса сверхизлучения.

Второй раздел посвящен рассмотрению возможностей АОС с усилителем яркости на парах бромида меди для визуализации процессов, экранированных широкополосной фоновой засветкой. Предельный уровень засветки, при котором она остается «прозрачной» для усилителя яркости, является собственный шум усилителя, вызванный спонтанным излучением. Исходя из этого, а также из оптической схемы, был проведен расчет предельных уровней засветки, при которых будут наблюдаться искажения. При использовании объектива 1 (см. рис. 2) с фокусным расстоянием 8 см для ГРТ диаметром пучка 2.5 см и длиной 50 см, при наличии перед объектом плазмы, занимающей весь объем до линзы, с эквивалентной температурой до 19000 К, объект «виден» в системе. Тестовые эксперименты подтверждают полученный результат. Нами проведена визуализация объекта, экранированного дугой постоянного тока в атмосфере аргона, яркостная температура которой составила 6000 К. Контраст изображения при зажигании дуги не менялся, детали объекта оставались отчетливо видны.

Следующая серия экспериментов посвящена наблюдению процессов, протекающих в условиях так называемой собственной широкополосной фоновой засветки. Это процесс взаимодействия излучения CO_2-лазера с поверхностью (стеклом) и СВС. Первый процесс сопровождается засветкой с температурой 3600 К, которая, как следует из эксперимента, не оказывает экранирующего воздействия. Полученные изображения позволяют проводить анализ процессов на поверхности стекла, с выделением во времени фаз локального нагрева и растрескивания. Во втором случае визуализировался процесс

горения различных СВС-структур с характерными значениями яркостных температур от 1500 до 3300 К. Полученные результаты позволяют проводить анализ структурных превращений, определять характер протекания процесса, его скорость и т.д. На примере смеси (51.28% $FeTiO_3$ + 22.82% Al + + 11.26% SiO_2 + 11.16% Si + 3.48% C) была определена скорость протекания процесса, которая составила 2.23 мм/с, что хорошо коррелирует с результатами, представленными в [7], отклонение не превышает 1%. Результаты визуализации процесса СВС приведены на рис. 11, поле зрения составляет 1.5×1.5 мм.

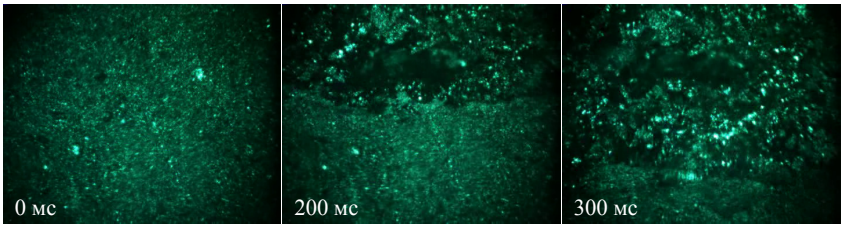


Рис. 11. Процесс горения СВС структуры «Саянская»

Для смеси Ni + 20% Al, процесс горения которой протекает в спиновом режиме, определена скорость спина – 160 мм/с. Кроме того, были визуализированы процессы горения смесей: «Саянская» и титан–бор. Последняя характеризуется относительно высокой температурой горения – 3000 К. Таким образом, лазерный монитор позволяет наблюдать процессы, протекающие в условиях широкополосной фоновой засветки.

Третий раздел главы посвящен разработке и исследованию характеристик действующего образца лазерного монитора. Неотъемлемой частью усилителя яркости является источник накачки, эффективность которого должна быть высокой. Она в значительной степени зависит от скорости нарастания импульсов тока и напряжения на ГРТ. Изменение скорости нарастания тока через ГРТ путем введения дополнительной индуктивности в разрядный контур оказало меньшее влияние на мощность генерации в случае наличия добавки HBr. Следовательно, добавка HBr в активную среду позволяет улучшить усилительные характеристики, увеличить ЧСИ усилителя яркости, обеспечить более эффективную накачку, что делает среду CuBr–Ne–HBr наиболее подходящей для использования в АОС. Последний раздел посвящен исследованию метрологических характеристик действующего образца лазерного монитора с активной средой на парах бромида меди. Для действующего образца использована ГРТ диаметром активной среды 2.5 см, длиной 50 см, с внутренними электродами и традиционным способом создания паров рабочего вещества. Источник накачки мощностью до 1.5 кВт и напряжением до 12 кВ выполнен по схеме с импульсным зарядом рабо-

чей емкости и прямым разрядом ее через ГРТ. ЧСИ изменяется от 15 до 50 кГц. В качестве скоростного регистратора использована CMOS-камера Fastec HiSpec 1, с максимальной скоростью съемки 100 тыс. кадров/с. Тестовые испытания показали, что усилитель яркости не вносит заметных искажений в формируемые изображения, а характеристики системы зависят от используемой оптики.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

1. Работа АЭ в режиме усилителя яркости изображения, обеспечивающая наибольшую область зрения и контраст получаемых изображений, отличается от режима получения максимальной мощности лазерного излучения. Для усилителя яркости требуются меньшие концентрации паров рабочего вещества и добавки HBr в активной среде.

2. Использование активной среды CuBr-лазера с малыми добавками HBr (давление 0.15–0.2 торр) и схемы синхронизации для скоростного регистратора позволяет визуализировать процессы, экранированные широкополосной фоновой засветкой с временным разрешением до 10 мкс. При этом экспозиция кадра будет составлять порядка 40 нс.

3. Использование схемы лазерного монитора с покадровой регистрацией изображения и программного обеспечения ImageJ позволяет проводить экспресс-оценку профиля усиления АЭ, тем самым подбирать оптимальный режим его работы.

4. Усилительные характеристики АЭ с емкостным способом возбуждения активной среды не отличаются от характеристик АЭ с традиционной накачкой.

5. Активный элемент с внутренним реактором галогенида металла (как с традиционным, так и емкостным способом накачки) имеет усилительные характеристики, аналогичные традиционным ГРТ, и может быть использован в качестве усилителя яркости.

6. По результатам визуализации процесса СВС для смеси (51.28% $FeTiO_3$ + + 22.82% Al + 11.26% SiO_2 + 11.16% Si + 3.48% C) определена скорость протекания процесса – 2.23 мм/с, что согласуется с измерениями, проведенными по известным методикам.

7. Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет производить визуализацию процессов, экранированных широкополосной фоновой засветкой с эквивалентной температурой черного тела от 19000 до 40000 К. Предложенный метод улучшения контраста дает возможность улучшить контраст до 90–97%, в зависимости от наблюдаемого объекта. Пространственное разрешение достигает 1 мкм.

В **приложении 1** представлены акты использования результатов работы в Отделе структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН и работы в учебном процессе на кафедре ПМЭ ИНК ТПУ.

В **приложении 2** представлены патенты на изобретение и полезную модель.

В **приложении 3** представлен расчет источника накачки действующего макета лазерного монитора

В **приложении 4** приведены результаты использования разработанного макета для наблюдения процессов СВС с помощью метода лазерной подсветки.

Цитируемая литература

1. *Оптические* системы с усилителями яркости / Под ред. Г.Г. Петраша. – М.: Наука, 1991. (Труды ФИАН. 1991. Т. 206). – 152 с.
2. *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.
3. *Солдатов А.Н., Соломонов В.И.* Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 152 с.
4. *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.
5. *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.
6. *Yermachenko V.M., Kuznetsov A.P., Petrovskiy V.N., Prokopova N.M., Streltsov A.P., Uspenskiy S.A.* Specific features of the welding of metals by radiation of high-power fiber laser // Laser Physics. – 2011. – V. 21. – N 8. – Pp. 1530–1537.
7. *Юсупов Р.А., Максимов Ю.М., Китлер В.Д.* Закономерности технологического горения порошковых систем на минеральной основе при получении пористых композиционных материалов // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. – № 5. – С. 85–89.

Основные публикации по теме диссертационной работы

1. *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.
2. *Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С.,* ***Тригуб М.В.*** Управление генерацией CuBr-лазера // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 147–151.
3. ***Тригуб М.В.****, Торгаев С.Н., Фёдоров В.Ф.* Полупроводниковые источники накачки CuBr-лазеров // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 164–168.
4. *Gubarev F.A.,* ***Trigub M.V.****, Troitsky V.O., Sukhanov V.B.* Gain characteristics of large volume CuBr-laser active media // Opt. Commun. – 2011. – V. 284. – Iss. 10–11. – Pp. 2565–2568.

5. *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.
6. ***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.
7. ***Тригуб М.В.,*** *Евтушенко Г.С., Кирдяшкин А.И., Китлер В.Д., Юсупов Р.А., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н., Шиянов Д.В.* Визуализация процесса СВС с использованием активных сред CuBr-лазеров // Ползуновский вестн. – 2012. – № 2/1. – С. 181–184.
8. ***Тригуб М.В.,*** *Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С.* Усилительные характеристики активного элемента лазера на парах хлорида меди с внутренним реактором // Изв. вузов. Физ. – 2012. – Т. 55. – № 10. – С. 46–50.
9. *Попов А.С.,* ***Тригуб М.В.,*** *Кушик Н.Г.* Клеточно-автоматное моделирование процесса высокотемпературного горения твёрдого тела // Изв. вузов. Сер. Физ. – 2012. – Т. 55. – № 9/2. – С. 327–331.
10. ***Тригуб М.В.,*** *Агапов Н.А., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А.* Алгоритм расчета схемы активной оптической системы с усилителем яркости // Изв. вузов. Физ. – 2013. – Т. 56. – № 5. – С. 92–95.
11. *Патент* на изобретение: 2463634 Российская Федерация, МПК G02B, 21/00. Лазерный проекционный микроскоп (варианты) / **М.В. Тригуб**, Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев. – № 2011120852/28, заявл. 24.05.2011, опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28. – 5 с.
12. *Патент* на полезную модель: 126852 Российская Федерация, Лазерный проекционный микроскоп / **М.В. Тригуб**, Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев. – № 2012145585, заявл. 25.10.2012, опубл. 10.04.2013. – 5 с.

Печ. л. 1.
Тираж 100 экз. Заказ № 63.

Тираж отпечатан в типографии ИОА СО РАН.
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.
Тел. 49-10-93.