

На правах рукописи



Губарев Федор Александрович

**Методы и аппаратура для визуализации и контроля
поверхности горения высокоэнергетических
материалов на основе нанопорошков металлов в
режиме реального времени**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ) и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)

Официальные оппоненты:

Дзидзигури Элла Леонтьевна доктор технических наук, доцент, доцент кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Кудряшова Ольга Борисовна доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов, Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск

Ломаев Михаил Иванович доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории оптических излучений, Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Защита диссертации состоится 20 января 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.01 при ФГАОУ ВО Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 43, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 55 и на сайте: dis.tpu.ru.

Автореферат разослан 11 октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.01
доктор технических наук



А.В. Мостовщиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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

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

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

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

материалов в режиме реального времени имеют важное научное и практическое значение.

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

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

Степень разработанности темы

Лазерный проекционный микроскоп на основе активной среды на парах меди, созданный сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР в 1974 году является уникальной лазерной системой, позволяющей получать увеличенное в тысячи раз и усиленное по яркости изображение на больших экранах. До появления в 2000-х годах современных компьютеров и проекторов, лазерный проекционный микроскоп оставался единственной системой, дающей такие возможности. В этот период времени были заложены основы построения таких систем и реализованы различные конфигурации на основе высокотемпературной саморазогревной среды на парах меди. При этом активная среда на парах бромида меди, имеющая ряд преимуществ, на тот период времени практически не использовалась в проекционных системах с усилением яркости.

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

Отсутствие скоростной цифровой регистрирующей аппаратуры с высоким качеством изображений сдерживало развитие лазерных мониторов в 1990-е годы. Прогресс в развитии скоростной видеотехники в начале 2000-х годов позволил внедрить скоростную видеокамеру в лазерный мониторинг и открыть новые возможности таких систем. С использованием скоростной видеокамеры в составе лазерного монитора исследовали гидродинамические неустойчивости и волны,

индуцированные импульсно-периодическим лазерным излучением на поверхности вещества, изменение рельефа поверхности углеродных материалов при лазерном воздействии, лазерную сварку металлов, плазмоиндуцированные процессы в капиллярном разряде.

Существенный прогресс в области лазеров на парах галогенидов металлов, достигнутый коллективами Томского политехнического университета (ТПУ) и Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) к 2008 году, в том числе с участием автора диссертации, создал предпосылки проведения исследований, направленных на создание лазерных мониторов на основе активной среды на парах бромида меди для исследования процессов, экранированных интенсивной фоновой засветкой.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Научная новизна диссертационного исследования:

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

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

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

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

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

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

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

Теоретическая значимость работы:

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

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

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

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

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

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

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

Практическая значимость работы:

1. Лабораторные установки и методики на основе лазерных мониторов позволяют исследовать временные параметры и режимы горения нанопорошков металлов и их смесей с временным разрешением до 0,8 мс и пространственным разрешением до 5 мкм (защищены патентами РФ на изобретение № 2712756 от 31.01.2020, № 2685040 от 16.04.19, № 2687308 от 13.05.19).

2. Аппаратная реализация оценки средней яркости изображений лазерного монитора с помощью быстродействующих фотодиодов (защищена патентом РФ на изобретение № 2685072 от 16.04.19) дает количественную информации об изменениях поверхности образца во время горения до проведения постобработки изображений, что актуально для оптимизации эксперимента.

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

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

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

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

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

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

Методология и методы диссертационного исследования:

Принцип работы лазерного монитора заключается в освещении поверхности объекта исследования усиленным спонтанным излучением активной среды на парах бромида меди, последующем усилении отраженного от поверхности излучения и проецировании усиленного излучения на матрицу скоростной видеокамеры. В связи с этим лазерный мониторинг считается активным методом исследования, сочетающим в себе оптическую микроскопию с лазерной подсветкой, усиление яркости и скоростную видеорегистрацию. Методы, основанные на лазерной подсветке, в том числе метод лазерных спеклов, также

являются активными методами исследования, так как скоростной камерой регистрируется не собственное свечение, а отраженное от поверхности излучение внешнего источника. При использовании импульсной подсветки применялся моноимпульсный режим регистрации с экспозицией, равной длительности импульса лазерного излучения. Прямая видеорегистрация горения с применением нейтральных и полосовых светофильтров и регистрация яркости свечения фотодиодами являются пассивными методами исследования. Перечисленные методы являются основными при построении систем визуализации, представленных в диссертационном исследовании.

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

Исследование электрических параметров схем накачки осуществлялось с использованием стандартных высоковольтных щупов, датчиков тока и цифровых осциллографов. Средняя мощность лазерного излучения измерялась современными полупроводниковыми и тепловыми датчиками. Яркость свечения оценивалась с использованием быстродействующего фотодиода и осциллографа. Обработка результатов измерений осуществлялась в пакетах программ Matlab, Origin, Microsoft Excel.

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

Положения, выносимые на защиту:

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

2. С использованием лазерного монитора на парах бромида меди возможно проводить качественный и количественный (распределение яркости, средняя яркость изображений, коэффициент корреляции изображений) анализ динамики

процессов горения высокоэнергетических порошковых материалов (на расстоянии до 0,5 м), в том числе с перемещаемой областью наблюдения.

3. Применение усилителей яркости на парах бромида меди малой мощности, формирующих уровень освещения объекта не более 130 мВт/мм², обеспечивает качество изображений лазерного монитора, достаточное для визуального анализа поверхности легковоспламеняющихся нанопорошков металлов и точность оценки изменения коэффициента отражения поверхности горящего образца нанопорошка металла в режиме реального времени не хуже 5,3 %.

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

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

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

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

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

Достоверность результатов работы. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, не противоречат основным законам физики и химии, обеспечиваются воспроизводимостью экспериментальных данных, использованием современной регистрирующей аппаратуры и программного обеспечения, согласием результатов измерений, выполненных различными методами и средствами, и непротиворечивостью опубликованным ранее результатам других авторов.

Для верификации разработанных методов применялись следующие общенаучные методы: прямая визуализация, в том числе с использованием скоростной видеорегистрации; тепловидение; термография; элементный анализ;

микроскопия; рентгенофазовый анализ; применение стандартных электроизмерительных приборов и методов измерения электрических и оптических величин; применение современных программных средств обработки изображений.

Личный вклад автора заключается в постановке задач, разработке методов и методик проведения исследований, анализе полученных расчетных и экспериментальных данных, составивших основу защищаемых положений.

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

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

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (г. Москва, 2020 г.), 38th International Symposium on Combustion (Аделаида, Австралия, 2021 г.), The Annual Conference «Saratov Fall Meeting» (г. Саратов, 2018, 2020 гг.), VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (г. Красноярск, 2019 г.), Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров – AMPL (г. Томск, 2007–2019 гг.), 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019, г. Севастополь, 2019 г.), International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices – EDM (ЗСОЛ НГТУ «Эрлагол», п. Чемал, 2019 г.), 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019, г. Томск, 2019 г.), VX Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2019» (г. Новосибирск, 2019 г.), Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) in Shanghai (Китай, 2016 г.), St. Petersburg (Россия, 2017 г.), Toyama (Япония, 2018 г.), NDE 2017 Conference & Exhibition of the society for NDT (Ченнаи, Индия, 2017 г.), Международная научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 2016 г.), Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (п. Катунь, 2011, 2015 гг.), Симпозиум “Лазеры на парах металлов” (г. Лоо, 2006–2012 гг.).

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

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

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

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследований в направлении разработки новых методов, методик и приборов для изучения физических процессов при высокотемпературном горении нанопорошков металлов и ВЭМ.

В **первой главе** рассмотрены методы и аппаратура для исследования высокотемпературных процессов. Рассматриваются лазерные проекционные системы на основе активных сред на парах металлов, принципы их построения и области применения, а также методы и оборудование для исследования горения ВЭМ, характеристик и свойств нанопорошков металлов, в том числе с использованием скоростной видеорегистрации. Делается вывод о степени разработанности темы исследования, формулируются цель и задачи исследования.

Обширной научной и технологической областью, в которой нанопорошки металлов стали важнейшим компонентом, являются ВЭМ, их синтез и использование. Наибольшее распространение в синтезе ВЭМ получил нанопорошок алюминия, так как, имея относительно высокую удельную энергию сгорания, он не является летучим или токсичным, как литий и бериллий, и легче воспламеняется, чем бор. Области применения нанопорошка алюминия включают топливные смеси, термитные и пиротехнические составы, взрывчатые вещества.

В исследовании закономерностей горения и разработке способов улучшения свойств ВЭМ, методы на основе скоростной визуализации являются важным инструментом, так как позволяют проводить анализ динамики процессов и получать информацию о физико-химических процессах, которую невозможно получить путем исследования исходных веществ и конечных продуктов сгорания. Высокие температуры (до 2500 °С), достигаемые при горении нанопорошка алюминия, и высокие скорости реакции усложняют исследование динамики процессов, в частности, исследование поверхности горящих веществ в режиме реального времени. Следовательно, существует потребность в разработке новых методов и исследовательского оборудования, в частности, методов и приборов визуализации, позволяющих осуществлять исследование поверхности образцов сквозь яркосветящийся экранирующий слой. Такую возможность дают лазерные мониторы – проекционные системы с усилителями яркости на парах металлов и скоростными видеокамерами. Направление практического использования лазерных мониторов в системах визуализации процессов горения порошковых ВЭМ оставалось и остается в настоящее время перспективной областью внедрения и разработки оптических систем с усилителями яркости на парах металлов.

Методы, основанные на анализе корреляции лазерных спекл-изображений, позволяют получать информацию об упругих деформациях поверхности в промышленном контроле, в том числе при повышенных температурах. В задачах медицинской визуализации метод лазерных спеклов используется для оценки частоты сердцебиения, в том числе дистанционно, измерения скорости кровотока в сосудах, исследования особенностей почерка, для повышения информативности оптической когерентной томографии и в других применениях. Малая мощность лазера, освещающего поверхность объекта исследования (единицы-десятки милливатт), излучение которого формирует спекл-изображения, дает основания полагать, что техника визуализации на основе метода лазерной спекл-корреляции может применяться для дистанционного мониторинга поверхности нанопорошков металлов во время горения.

Во **второй** главе рассмотрены различные варианты лазеров и усилителей яркости на парах бромида меди, особенности их работы и схемы накачки. Приводится обзор работ автора диссертации по исследованию условий работы активных элементов лазеров на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров с традиционной и емкостной накачкой (защищены патентами РФ № 62742 от 27.04.07 и № 2363080 от 27.07.09). Рассматривается диапазон режимов, в которых могут работать данные активные среды, в том числе режимы с пониженным энерговыделением в разряд, режим цугов, режимы управления энергией в импульсе генерации, режим длинного импульса.

На рисунке 1 приведены конструкции активных элементов лазеров и усилителей яркости на парах бромида меди с независимым контролем температуры активной области газоразрядной трубки (ГРТ) и контейнеров с рабочим веществом. Использование независимого нагрева позволило обеспечить режимы работы

усилителей яркости относительно большого диаметра с малой мощностью сверхизлучения, что имеет принципиальное значение для исследования легковоспламеняющихся материалов. Применение регуляторов температуры с точностью стабилизации ± 1 °С снизило колебания энергии в импульсе генерации, вызванные флуктуациями концентрации паров бромида меди.

Во второй главе также рассмотрены различные схемы накачки ГРТ лазеров на парах металлов с независимым нагревом и их влияние на энергию генерации. Отмечается, что использование схемы с импульсным зарядом накопительной емкости обеспечивает более стабильную работу тиратрона по сравнению со схемами с резонансным зарядом, увеличивает его срок службы и повышает стабильность импульсов возбуждения.

Преимуществом ГРТ с емкостной накачкой является отсутствие прямого контакта материала электродов с газовой средой. Высокие достигнутые мощности генерации лазеров на парах бромида меди с емкостной накачкой и гауссов пучок практически в любом режиме работы, открывают перспективы их использования в практических задачах. При этом следует принимать во внимание особенности эксплуатации таких активных элементов, ограничивающих их использование в мобильных диагностических комплексах: значительные размеры электродных областей, находящихся под высоким потенциалом, и более высокие рабочие напряжения, необходимые для эффективной работы, по сравнению с традиционными активными элементами.

Малая требуемая мощность накачки ГРТ с независимым нагревом позволила использовать маломощный источник питания и разработать компактные лазерные мониторы с одним и двумя каналами визуализации. При разработке лазерного монитора для исследования нанопорошков металлов мы ориентировались на использование ГРТ небольшого активного объема (диаметром 1,5–3 см, длиной 40–60 см) при работе в режимах со средней мощностью сверхизлучения менее 100 мВт. Для обеспечения таких режимов работы ГРТ достаточно использовать накопительные емкости 680–1000 пФ, заряжаемые до напряжения 5–6 кВ. Так как разряд емкостей в бистатической или двухканальной системах осуществляется практически синхронно, и время заряда значительно превышает время разряда, работа импульсной схемы заряда на две емкости аналогична работе на одну емкость. В этом случае проектная мощность импульсного источника питания при частоте повторения импульсов 20 кГц составляет $\sim 0,7$ кВт. Разработанный источник накачки на основе одного импульсного преобразователя (рисунок 2) использовался при построении двухканального лазерного монитора и лазерного монитора с независимой подсветкой (бистатического). Источник обеспечивал стабильную работу двух ГРТ, в том числе, одна из которых имела внешние (емкостные) электроды. Лазер на парах бромида меди с емкостной ГРТ использовался в диссертационной работе в качестве лазера подсветки в бистатическом лазерном мониторе.

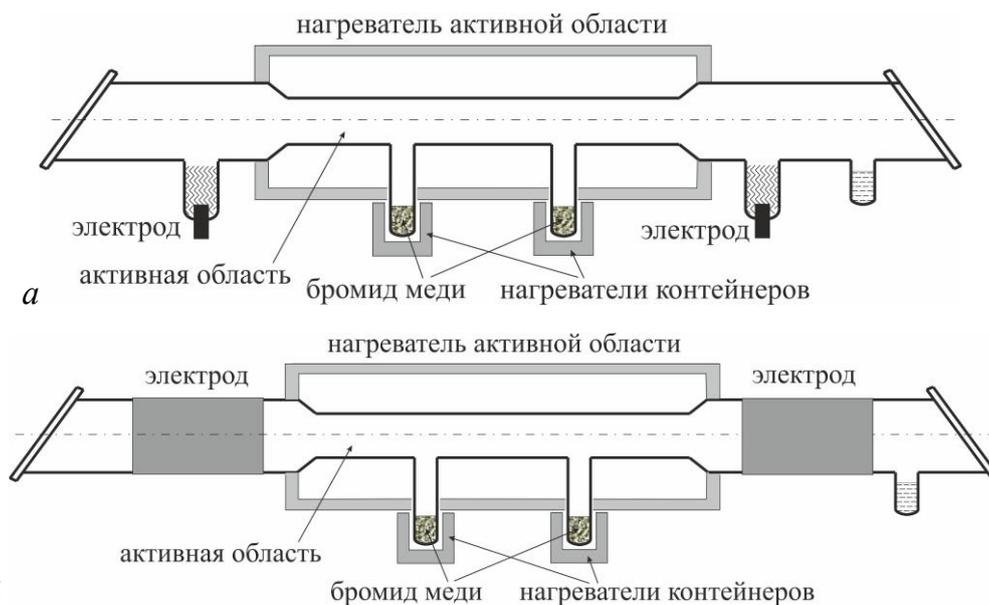
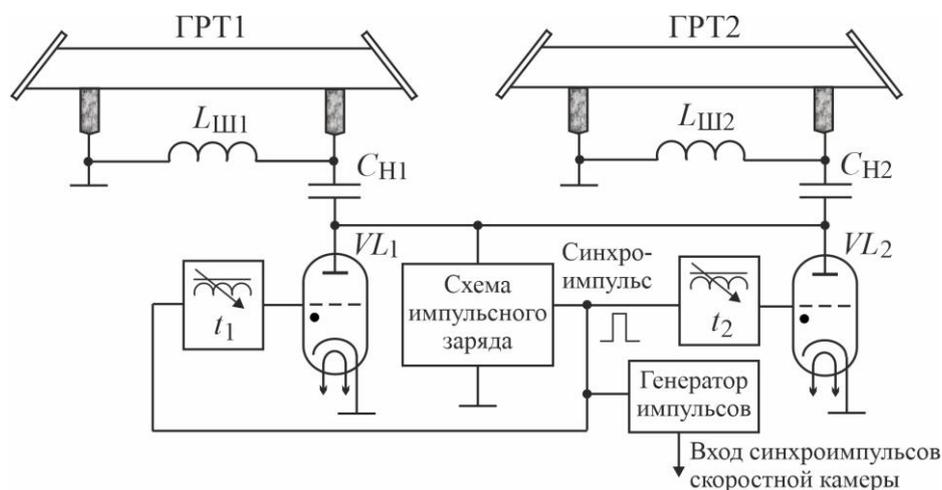


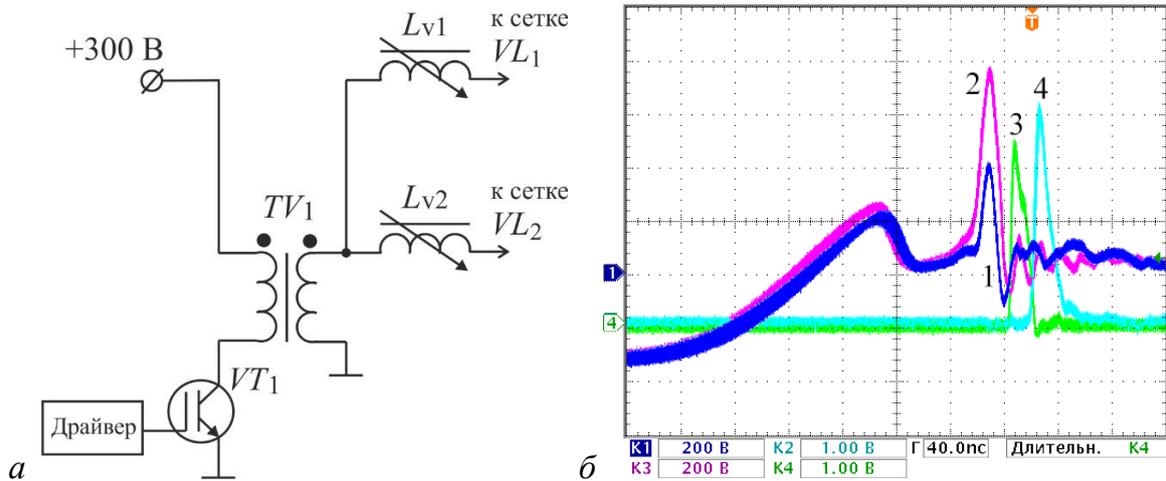
Рисунок 1 – Конструкции активных элементов лазеров и усилителей яркости на парах бромида меди с традиционной (а) и емкостной накачкой (б)



VL_1, VL_2 – тиратроны; C_{H1}, C_{H2} – накопительные конденсаторы; $L_{ш1}, L_{ш2}$ – шунтирующие индуктивности; t_1, t_2 – схемы задержки

Рисунок 2 – Схема накачки двух ГРТ

Существенной задачей при реализации лазерной системы на основе двух активных сред на парах металлов является синхронизация импульсов излучения, которая определяется оптической конфигурацией схемы и временным согласованием импульсов накачки. При использовании водородных тиратронов в генераторах высоковольтных импульсов принципиальное значение имеет согласование импульсов запуска, подаваемых на управляющие электроды. На рисунке 3, а показана схема формирования импульсов запуска, в которой один импульс запуска генерируется схемой на основе импульсного трансформатора и транзисторного ключа и подается на сетки тиратронов VL_1 и VL_2 (рисунок 2) через две линии задержки на основе ферровариометров. Схема обеспечивает синхронизацию импульсов генерации с рассогласованием не более 2 нс.



Напряжение на сетках VL_1 (2), VL_2 (1) и импульсы излучения ГРТ1 (4), ГРТ2 (3)

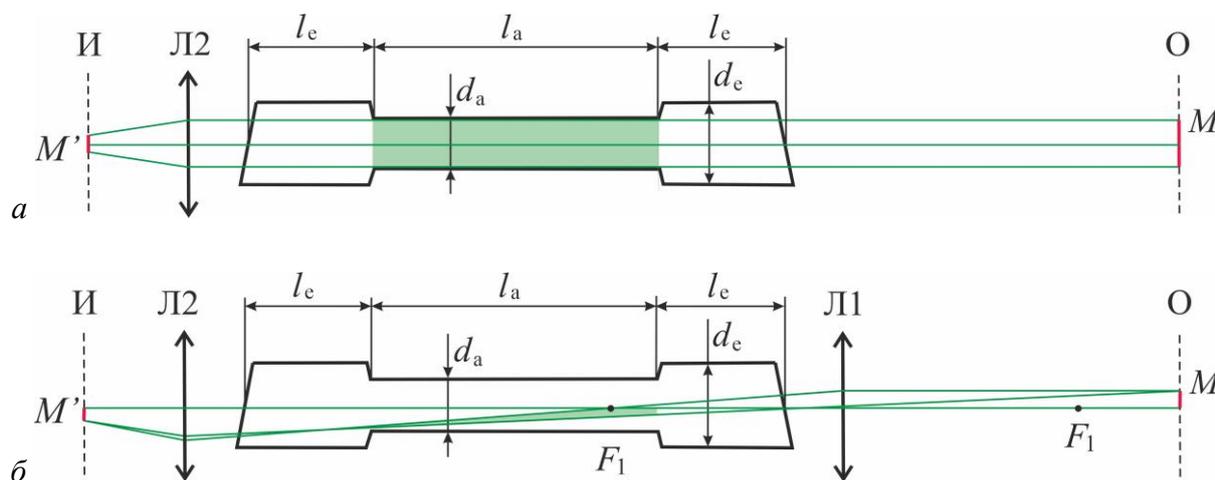
Рисунок 3 – Схема формирования импульсов запуска тиратронов (а) и осциллограммы работы схемы на рисунке 2 (б)

Основное внимание в **третьей главе** уделено исследованию распределения усиления в активном элементе на парах бромида меди и влиянию неоднородности усиления активной среды на изображение при использовании активного элемента в качестве усилителя яркости в лазерном мониторе. Представлены результаты исследования радиального распределения излучения активной среды усилителя яркости при двухпроходовом усилении, так как двухпроходовой режим усиления составляет основу работы лазерного монитора.

На рисунке 4 показаны упрощенные схемы распространения параллельного пучка (а) и пучка, несущего изображение, в схеме с фокусирующей оптикой (б). В случае параллельного пучка отраженный луч усиливается вдоль одной радиальной области (центральной или пристеночной). В реальной лазерной проекционной системе с усилением яркости свет, отраженный от объекта, проходит через области активной среды с различным усилением. На рисунке 5 приведены радиальные распределения интенсивности излучения при различной температуре контейнеров с бромидом меди для двух ГРТ небольшого активного объема. Как следует из представленных данных, в обоих ГРТ имеет место провал интенсивности в центре параллельного пучка и формирование кольцевого пучка при уменьшении температуры контейнеров с рабочим веществом. В отличие от двухпроходового усиления параллельного пучка, при работе усилителя яркости в условиях реальной схемы лазерного монитора, интенсивность в центре пучка при тех же температурных параметрах существенно выше.

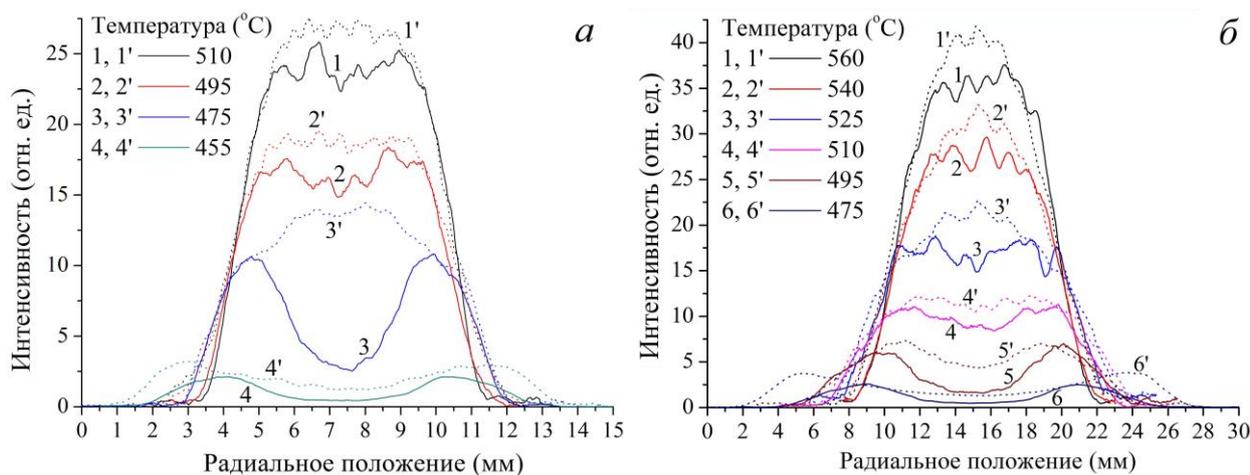
Исследование пространственно-временного распределения усиления в ГРТ диаметром 1,5 см, длиной 50 см и ГРТ диаметром 3 см, длиной 60 см (рисунок 6) показало, что диапазон наблюдения, который может обеспечить моностабильный лазерный монитор на основе одного активного элемента, ограничен 2–2,5 м, что необходимо учитывать при проектировании оптической системы. В этом диапазоне

профиль луча имеет равномерное распределение. На большем расстоянии полного выравнивания профиля не происходит. Указанный диапазон обусловлен уменьшением коэффициента усиления во время импульса генерации и справедлив для типичных режимов работы усилителей яркости с длительностью импульса генерации 25–40 нс. В этом случае отсутствует радиальная неоднородность на всем протяжении импульса генерации, которая наблюдается при усилении параллельного пучка.



a – параллельный пучок; *б* – пучок, несущий изображение; *О* – плоскость объекта (зеркало); *Л1* – фокусирующая оптика; *Л2* – объектив; *И* – плоскость изображения на матрице камеры; *М* – часть зеркала (объекта), освещенная пучком; *М'* – изображение; F_1 – фокусное расстояние; заливкой выделены области усиления

Рисунок 4 – Упрощенные диаграммы хода лучей в схемах с усилителем яркости

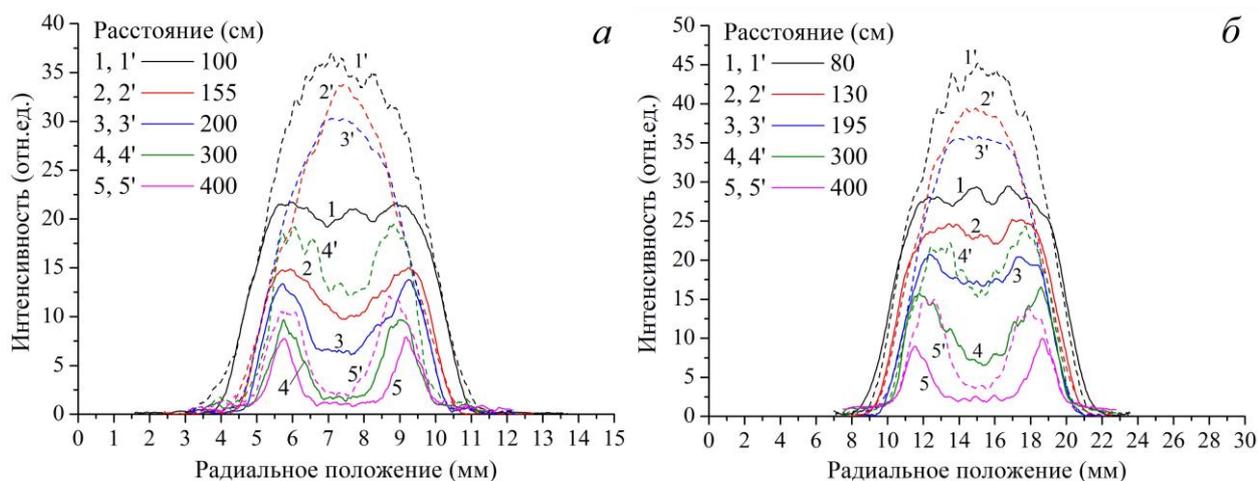


a – ГРТ диаметром 1,5 см, длиной 50 см; *б* – ГРТ диаметром 3 см, длиной 60 см; 1–6 – параллельный пучок; 1'–6' (пунктир) – пучок излучения в реальной схеме

Рисунок 5 – Профили излучения при различных температурах контейнеров

Анализ радиального распределения усиления в импульсе генерации, а также при уменьшении концентрации паров рабочего вещества, для случаев усиления параллельного пучка и скрещенных пучков, формируемых оптически

элементами лазерных мониторов (линзы, зеркала), показал, что в усилителях яркости в составе лазерных мониторов, профиль луча, несущего изображение, выравнивается в широком диапазоне рабочих температур контейнеров с бромидом меди. Таким образом, радиальная неоднородность усиления в центре ГРТ, возникающая при уменьшении концентрации паров бромида меди, практически не приводит к снижению интенсивности в центре усиленного пучка, формирующего изображение объекта наблюдения. Эта особенность позволяет эксплуатировать ГРТ усилителей яркости в лазерных мониторах практически до полной выработки рабочего вещества (бромида меди).



a – ГРТ диаметром 1,5 см, длиной 50 см; *б* – ГРТ диаметром 3 см, длиной 60 см;
1–3 – параллельный пучок; 1'–3' (пунктир) – пучок излучения лазерного монитора

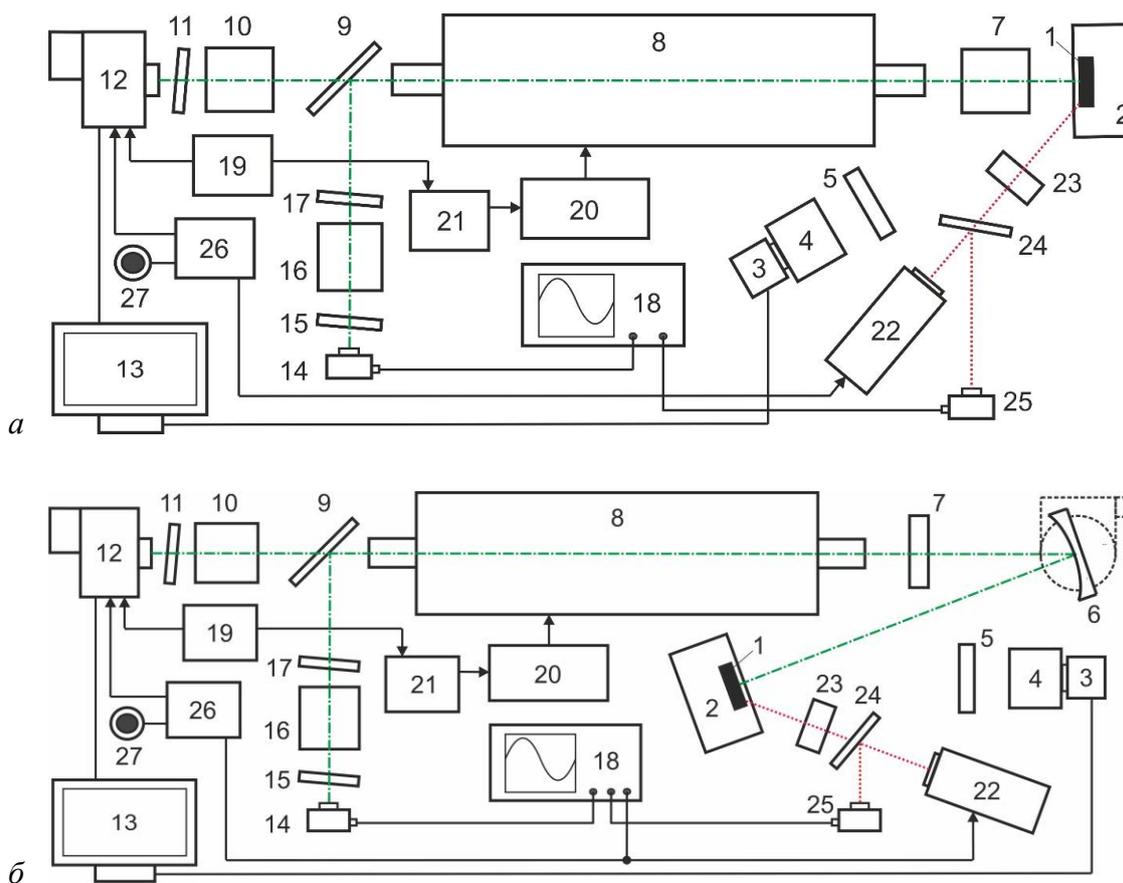
Рисунок 6 – Профили излучения при различном расстоянии

Четвертая глава диссертации посвящена описанию лазерного комплекса на основе усилителя яркости для скоростной визуализации и исследования параметров высокотемпературного горения. Для визуализации поверхности горения в диссертационной работе предложен ряд оптических схем на основе усилителя яркости на парах бромида меди и лазерной подсветки.

1. Лазерный монитор с традиционной схемой построения изображения, с независимым контролем температурных параметров и малой мощностью сверхизлучения, усовершенствованный введением скоростного фотодиода для регистрации средней яркости изображений.

Снижение мощность, освещающей объект исследования, за счет применения активных элементов с независимым контролем температурных параметров и пониженным энергозатратом в разряд, позволило не только использовать лазерные мониторы на основе активных элементов на парах бромида меди для визуализации поверхности легковоспламеняющихся нанопорошков металлов, но и анализировать с высокой точностью изменение средней яркости изображений лазерного монитора. Предложен способ исследования процесса горения (патент РФ № 2685072 от 16.04.19) и аппаратная реализация оценки средней яркости

изображений с помощью быстродействующих фотодиодов (патенты № 2685040 от 16.04.19, № 2687308 от 13.05.19). Анализ яркости изображений лазерного монитора дает численную информации об изменении поверхности образца во время горения. На рисунке 7, а приведена схема лазерного монитора, которая сочетает синхронизацию инициирующего лазера и начало записи скоростной камеры, скоростную покадровую запись изображений, формируемых импульсами излучения усилителя яркости, и аппаратную регистрацию средней яркости изображений.



1 – образец; 2 – предметный столик; 3 – USB-камера; 4, 10, 16 – объективы; 5 – полосовой фильтр; 6 – вогнутое зеркало; 7 – объектив (а) или линза (б); 8 – усилитель яркости; 9, 17 – нейтральные светофильтры; 11 – полосовой фильтр 510 ± 5 нм; 12 – скоростная камера; 13 – ПК; 14, 25 – фотодиоды; 15 – диффузор; 18 – осциллограф; 19 – генератор импульсов; 20 – высоковольтный источник накачки; 21 – оптический преобразователь; 22 – инициирующий лазер; 23 – линза; 24 – светоделительная пластина; 26 – ждущий мультивибратор; 27 – кнопка начала исследования

Рисунок 7 – Схемы лазерного монитора с традиционной (а) и зеркальной (б) схемами построения изображений

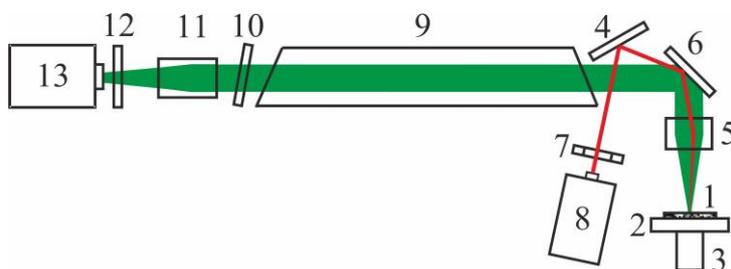
2. Лазерный монитор на основе зеркальной схемы построения изображения с увеличенной дистанцией мониторинга для исследования процессов, сопровождающихся разлетом продуктов сгорания.

В работе предложен лазерный монитор, в котором изображение формируется оптической системой на основе линзы и вогнутого зеркала, которая дает возможность исследовать процессы горения, сопровождающиеся интенсивным свечением и разлетом продуктов сгорания на расстоянии до 50 см от оптической системы. Реализация дистанционного лазерного монитора, сочетающего в себе также возможности предыдущей схемы, показана на рисунке 7, б. Перспективность применения разработанной оптической системы показана с использованием как стабильно горящего нанопорошка алюминия, так и модельного твердого топлива на основе алюминия, горение которого сопровождается разлетом продуктов на расстояние 30–40 см при объеме навески $\sim 0,8 \text{ см}^3$.

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

Дополнение лазерного монитора поворотной платформой (показана пунктиром на рисунке 7, б) позволило реализовать перемещение области наблюдения в процессе исследования поверхности горящего образца (патент № 2712756 от 31.01.2020). Предложенная опция позволяет исследовать однородность горения и образования продуктов по мере распространения фронта горения. В работе также рассмотрена схема сканирования поверхности путем перемещения образца в направлении, перпендикулярном оптической оси вогнутого зеркала. Сравнение изображений тестового объекта в двух схемах показало, что перемещение области наблюдения на 2 см при повороте зеркала дает изображения поверхности, визуально идентичные линейному перемещению объекта на такое же расстояние. Преимуществом поворотной схемы является неподвижность объекта исследования, что имеет значение при исследовании плохоформируемых порошковых материалов.

4. Лазерный монитор для визуализации горизонтальной поверхности, в том числе для исследования тонких слоев нанопорошков металлов (рисунок 8).



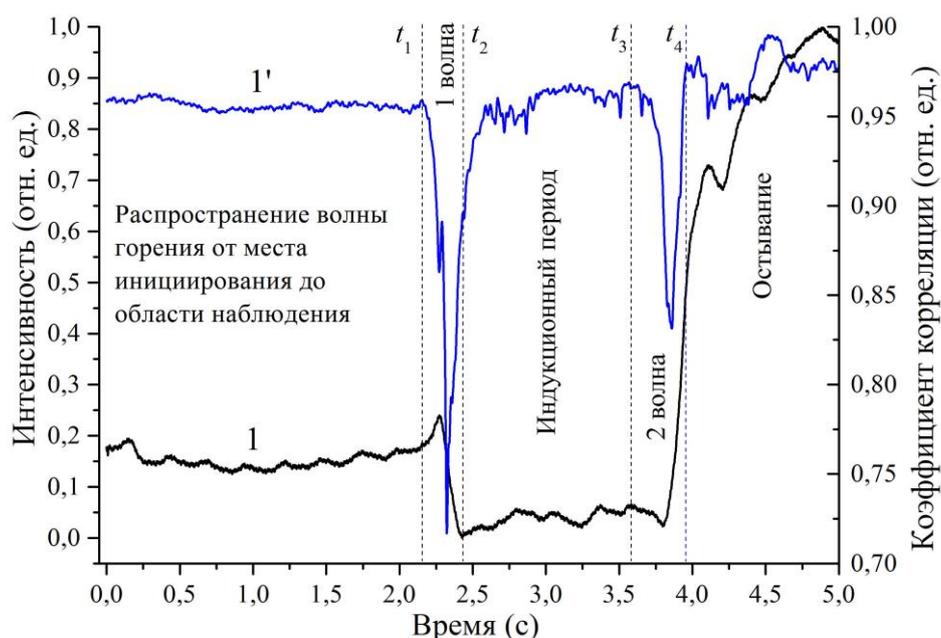
- 1 – нанопорошок на подложке; 2 – горизонтальный линейный транслятор;
 3 – вертикальный линейный транслятор; 4, 6 – поворотные зеркала; 5, 11 – объективы;
 7 – механический затвор; 8 – иницирующий лазер; 9 – усилитель яркости;
 10 – нейтральный светофильтр; 12 – узкополосный фильтр $510 \pm 5 \text{ нм}$; 13 – камера

Рисунок 8 – Лазерный монитор для исследования горизонтальных объектов с совмещенным вводом излучения

В предложенной конфигурации лазерного монитора излучение усилителя яркости и инициирующее излучение направляются на объект сверху. Применение соответствующего объектива позволяет исследовать небольшую область объекта с большим увеличением или широкую область объекта с относительно малым увеличением. Рассмотрены различные варианты установки оптических элементов для получения изображения и воздействия инициирующим лазером. Впервые в лазерном мониторинге использована совмещенная схема, в которой инициирующий лазерный луч подается на объект исследования через объектив, формирующий изображение лазерного монитора. Схема позволила фокусировать излучение инициирующего лазера в зоне наблюдения лазерного монитора.

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

Предлагается применение метода корреляции цифровых изображений для обработки изображений лазерного монитора с целью получения количественной информации об изменениях поверхности нанопорошков металлов во время горения (рисунок 9).



t_1 — начало первой волны горения в области наблюдения; t_2 — окончание первой волны;
 t_3 — начало второй волны; t_4 — окончание второй волны

Рисунок 9 – Средняя интенсивность (1) и коэффициент корреляции (1') изображений поверхности образцов нанопорошка алюминия при наблюдении с использованием лазерного монитора на рисунке 7, а

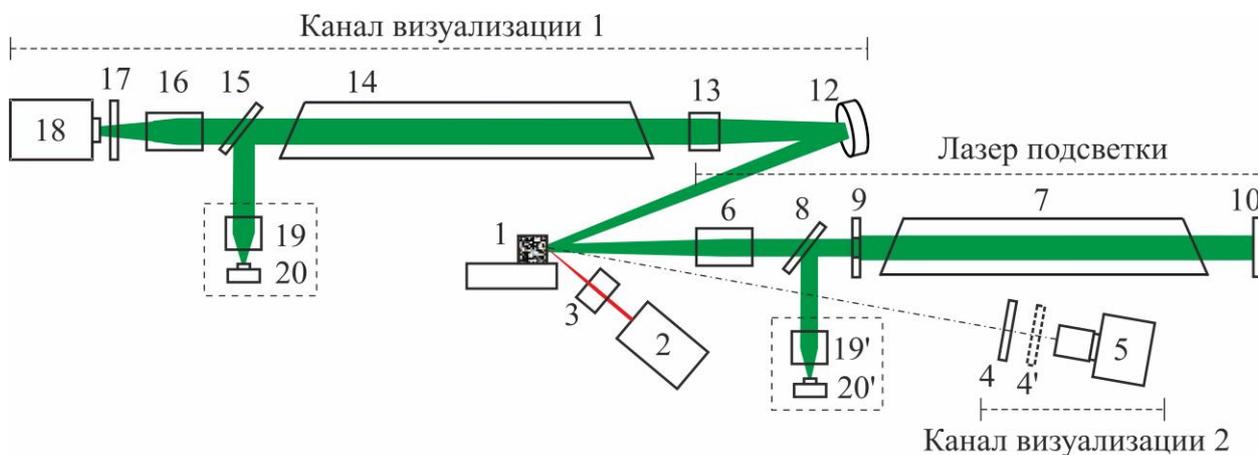
Анализ кривых коэффициента корреляции и средней яркости изображений лазерного монитора, а также самих изображений лазерного монитора, и визуальное наблюдение за процессом горения показывают, что средняя яркость изображений и коэффициент корреляции находятся в соответствии с временными параметрами стадий процесса горения. Метод корреляции изображений лазерного монитора

может использоваться как самостоятельный инструмент анализа изображений, так и в сочетании с анализом средней яркости изображений для более точного определения временных параметров процесса горения. Совместно с визуальным анализом, использование цифровой обработки изображений позволяет не только качественно, но и количественно оценивать характеристики горения и сравнивать различные процессы между собой.

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

Схематично бистатический лазерный монитор показан на рисунке 10. На предложенное устройство получен патент на изобретение (№ 2746308 от 12.04.2021). Лазерный монитор построен на основе активных элементов на парах бромида меди с малой мощностью генерации, что делает перспективным применение подобной лазерной системы для исследования поверхности веществ, чувствительных к свету.

Освещение объекта исследования и усиление отраженного света синхронизуется за счет регулирования моментов включения тиратронов в схеме возбуждения. Максимальный контраст изображений и наибольшее снижение фонового излучения достигается при задержке излучения усилителя яркости по отношению к излучению лазера подсветки 5–10 нс. Увеличение яркости и контрастности изображений в разной степени наблюдается при задержке 5–0 нс и 15–20 нс.



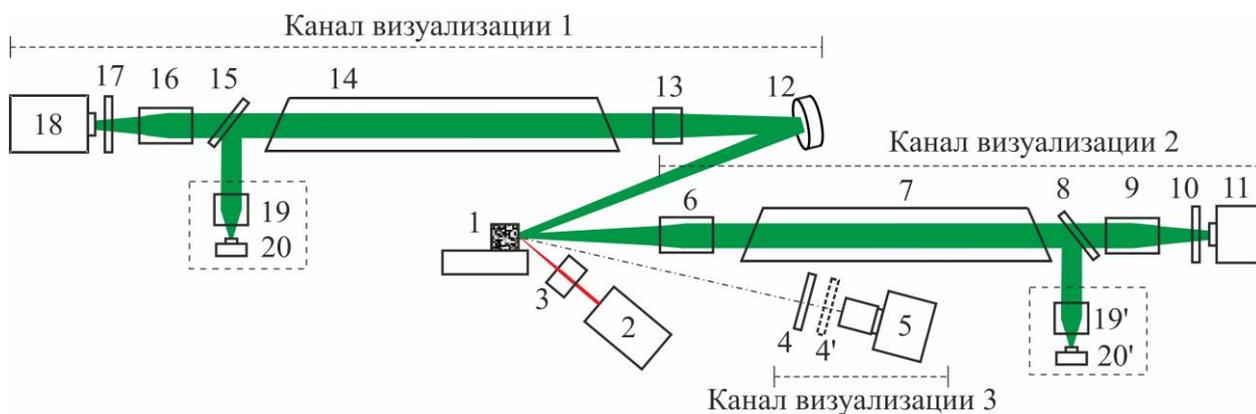
1 – образец; 2 – инициирующий лазер; 3, 13, 19, 19' – собирающие линзы; 4, 15 – нейтральные фильтры; 5, 18 – скоростные камеры (USB-камеры); 6 – расширитель пучка (линза); 7, 14 – ГРТ на парах бромида меди; 8 – кварцевая пластина (нейтральный фильтр); 9 – диафрагма; 10 – плоское зеркало; 12 – вогнутое зеркало; 4', 17 – полосовые фильтры; 16 – объектив; 20, 20' – фотодиоды

Рисунок 10 – Схема лазерного монитора с независимой подсветкой

Таким образом, основным техническим результатом предложенного устройства является повышение яркости и контрастности изображений поверхности, что принципиально важно при визуализации поверхности с малым

коэффициентом отражения, такой как поверхность нанопорошка металла или смеси нанопорошков металлов. Применение двухпроходowego излучения активной среды в качестве излучения подсветки позволяет существенно упростить оптическую схему бистатического лазерного монитора, снизить интенсивность подсветки и использовать один двухканальный источник питания для накачки двух ГРТ. Моноимпульсный режим регистрации изображений реализуется в бистатическом лазерном мониторе аналогично моностатическому.

7. Двухканальный лазерный монитор с возможностью наблюдения двух областей образца одновременно или одной области с различным увеличением и пространственным разрешением (рисунок 11).



1 – образец; 2 – иницирующий лазер; 3, 13, 19, 19' – собирающие линзы; 4, 8, 15 – нейтральные светофильтры; 4', 10, 17 – полосовые светофильтры; 5, 11, 18 – скоростные камеры (USB-камеры); 6 – линза (объектив); 7, 14 – ГРТ на парах бромида меди; 9, 16 – объективы; 12 – вогнутое зеркало; 20, 20' – фотодиоды

Рисунок 11 – Схема двухканального лазерного монитора

Подход в построении двухканального лазерного монитора, как и бистатического лазерного монитора, аналогичен схеме построения системы «задающий генератор – усилитель мощности». Отличие заключается в принципе синхронизации. В бистатическом лазерном мониторе излучение лазера подсветки, отраженного от поверхности объекта, усиливается усилителем яркости. Поэтому схема накачки усилителя должна создавать инверсию населенностей рабочих лазерных уровней во время прихода в активную среду отраженного излучения лазера подсветки. В двухканальном лазерном мониторе, наоборот, инверсия населенностей лазерных уровней в усилителях яркости должна существовать в разные моменты времени. Схема на рисунке 11 содержит два канала визуализации с усилением яркости. В качестве дополнительного канала визуализации применяется видеозапись с использованием третьей USB-камеры.

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

Одним из рассмотренных в диссертации вариантов визуализации сквозь яркосветящийся слой является использование лазерной подсветки с фильтрацией излучения узкополосным фильтром на длине волны лазера подсветки. Разработана лабораторная установка для исследования лазерного инициирования и горения с применением лазерной подсветки. Реализована работа системы с применением как непрерывного лазера с длиной волны 532 нм, так и импульсного лазера на парах меди в качестве лазера подсветки. Время начала воздействия синхронизовано с началом записи скоростной камеры.

В качестве нового варианта системы визуализации предложено совместное использование лазерного мониторинга и лазерной подсветки. В этом случае излучение лазерного монитора служит излучением подсветки. Для этого в схемах на рисунках 10, 11 устанавливается узкополосный фильтр 4' (510 ± 5 нм) на длину волны генерации активных сред на парах бромида меди. Наиболее эффективно применение лазерной подсветки в бистатическом лазерном мониторе, так как в этой схеме возможно реализовать освещение поверхности с регулируемой интенсивностью и размером области. Часть отраженного излучения, попадающая в область зрения лазерного монитора, усиливается и формирует проекционное изображение лазерного монитора. Излучение, отраженное от освещаемой поверхности, формирует изображение в свете лазерной подсветки (канал визуализации 2 на рисунке 10), которое фильтруется узкополосным фильтром.

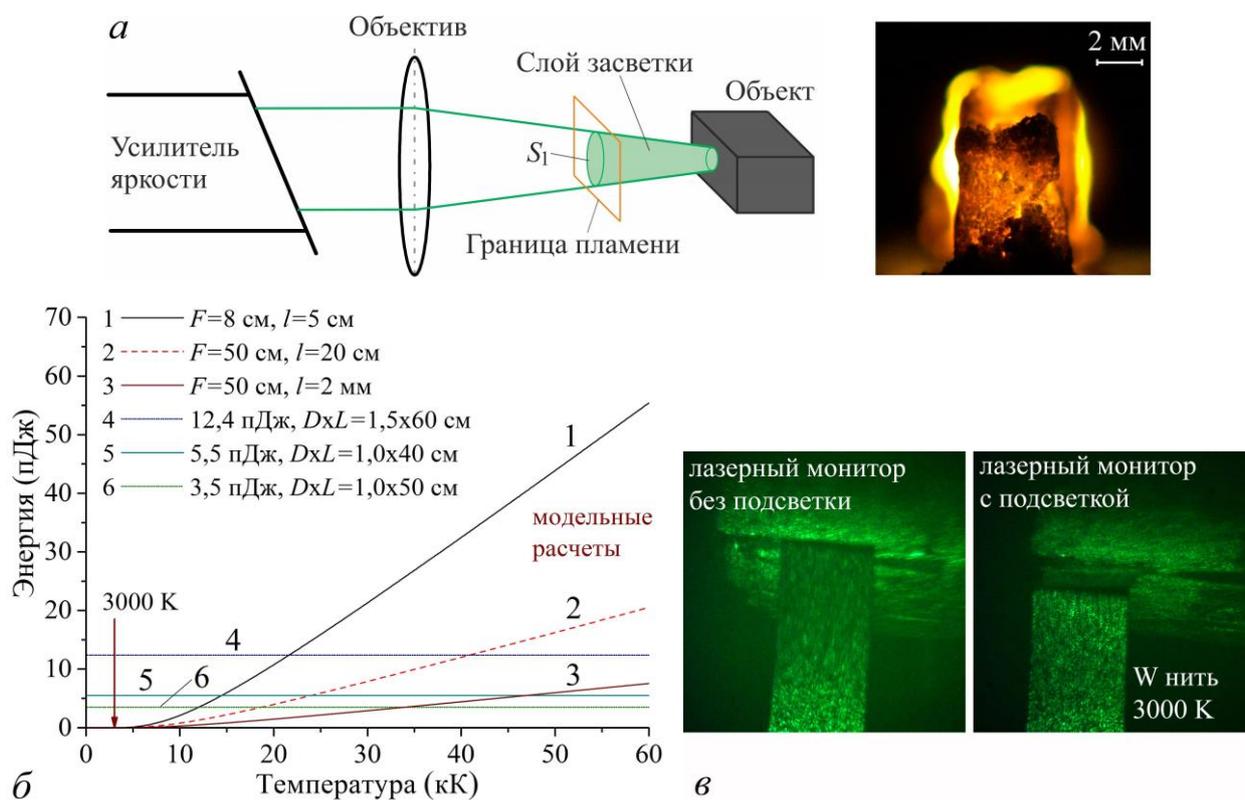
В **пятой главе** диссертации представлены результаты исследования горения ВЭМ на основе порошков металлов с использованием разработанных методов и аппаратуры визуализации. Скорость и время видеозаписи определялись объектами исследования для получения изображений с максимально возможным разрешением и составляли 250–1200 кадров/с.

Активные оптические системы на основе лазерной подсветки и усиления яркости регистрируют отраженное от поверхности зондирующее лазерное излучение, а не испускаемое излучение горящего образца. Фоновая засветка не будет оказывать влияние на изображение лазерного монитора, если выполняется неравенство:

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

где h – постоянная Планка, ν – основная частота спектральной линии, $\Delta\nu$ – полуширина спектральной линии, τ – время существования инверсии, D – диаметр, L – длина усиливающей среды, λ – длина волны усиления 510,6 нм, V – объем, S_1 – активная площадь, S_{total} – общая площадь слоя, создающего засветку.

На рисунке 12 приведены модельные расчеты энергии свечения источника засветки при различных температурах, в сравнении с уровнем собственных шумов усилителей яркости. Показано, что при температуре 3000 К, которая может достигаться при горении нанопорошков металлов, энергия свечения образца в 10^4 – 10^5 раз меньше энергии собственных шумов усилителей яркости.



1–3 – энергия засветки; 4–6 – собственные шумы усилителя; F – фокусное расстояние объектива; l – толщина слоя засветки; $D \times L$ – диаметр и длина усиливающей среды

Рисунок 12 – Фрагмент оптической схемы лазерного монитора (а), модельные расчеты энергии фоновой засветки (б) и результаты визуализации вольфрамовой нити накаливания, нагретой до температуры 3000 К (в)

Лазерный мониторинг и лазерная подсветка могут использоваться как отдельные методы исследования, так и в составе одного лабораторного прибора. Лазерная подсветка с применением полосовых фильтров формирует изображение, подобное традиционному фотографическому. Светофильтры подбираются в зависимости от цели эксперимента для большего или меньшего подавления широкополосного излучения. Полностью подавить широкополосную засветку с использованием лазерной подсветки практически невозможно, в то же время такая визуализация удобна для панорамного обзора горящего образца с целью определения общих закономерностей горения.

Визуализация горения смесей нано- и микропорошков металлов с использованием лазерного монитора выявила характерные особенности изменения поверхности во время горения, такие как ступенчатость процессов, наличие видимых индукционных периодов между стадиями, расширение продуктов горения, образование пустот и трещин. С помощью лазерного монитора подтверждено двухстадийное горение нанопорошка алюминия в воздухе. Метод лазерного мониторинга показал значительные флуктуации скорости горения (таблица 1) и выявил неравномерность процесса горения с образованием различных продуктов на определенных стадиях, тем самым подтвердив образование гетерогенных структур при многоступенчатом горении. При

наблюдении термитной смеси Al-Fe₂O₃ показано, что лазерный монитор позволяет наблюдать не только распространение волны горения, но и распространение волны нагрева (рисунок 13). Волну нагрева не удастся идентифицировать при прямой скоростной визуализации.

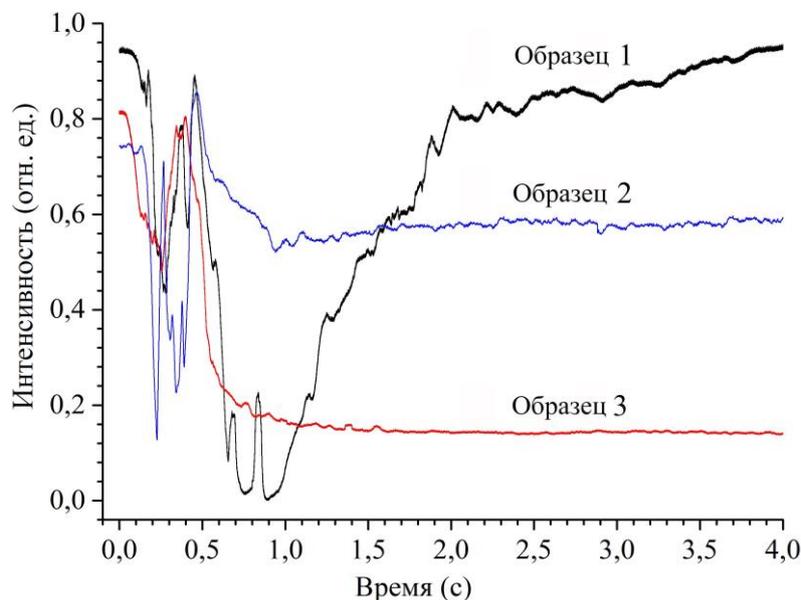


Рисунок 13 – Интенсивность изображений лазерного монитора в области лазерного иницирования смесей нанопорошков Al-Fe₂O₃, зарегистрированная фотодиодом

Таблица 1 – Временные параметры горения смесей nano- и микропорошков

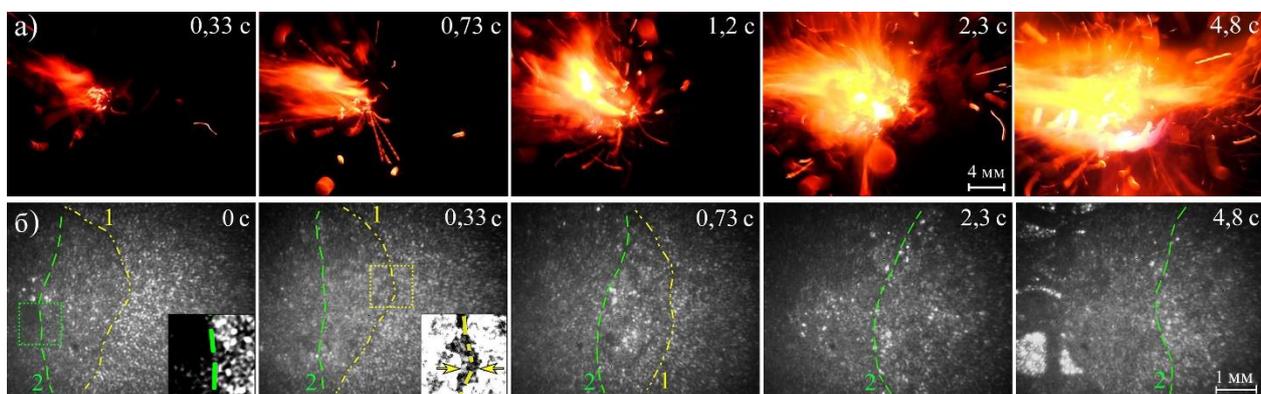
Смесь	Состав	Скорость первой волны горения, мм/с	Индукционный период, с	Скорость второй волны горения, мм/с
1	наноAl	3,4–7,2	1,68–4,67	0,6–0,8
2	наноAl+наноFe	3,8–5,4	3,20–3,50	1,6–3,3
3	наноAl+микроAl+наноFe	14,1–36,0	0,14–2,2	14,4–20,0
4	наноAl+микроAl+микроFe	17,2–21,8	0,052–0,068	9,2–11,8

Лазерный монитор позволяет исследовать изменение коэффициента отражения поверхности нанопорошка металла во время высокотемпературного горения (рисунок 13). Впервые идентифицированы стадии процесса горения и характерные изменения поверхности путем анализа коэффициента отражения поверхности. Коэффициент отражения анализировался после регистрации фотодиодом интенсивности излучения, отраженного от поверхности и усиленного усилителем яркости. Анализ изображений, полученных с помощью скоростной камеры, и осциллограмм выходного сигнала фотодиода показал, что интенсивность выходного сигнала усилителя яркости соответствует основным стадиям процесса горения. Исследование оптических свойств поверхности образцов во время горения в сочетании с анализом морфологии поверхности и характера горения помогут

установить закономерности горения, разработать методы управления процессом горения и получения материалов с требуемыми свойствами.

Лазерный монитор для визуализации горизонтальной поверхности тонких слоев нанопорошков металлов позволил наблюдать неоднородность распространения горения по поверхности образца, образование продуктов сгорания и участков с частичным прогоранием. Полученные результаты показывают перспективность создания лазерного монитора для изучения горения и лазерного нагрева более тонких слоев металлических нанопорошков и многослойных материалов. Перспективные применения таких устройств могут включать получение изображений *in situ* лазерной интеграции металлических нанопорошков в полимеры и другие приложения.

Система визуализации на основе зеркальной оптики позволила увеличить расстояние наблюдения до 50 см от оптических элементов лазерного монитора и исследовать процессы высокотемпературного горения, сопровождающиеся интенсивным свечением и разлетом продуктов сгорания. Результаты визуализации горения модельной топливной смеси представлены на рисунке 14. С помощью лазерного монитора возможно наблюдать фронт горения, распространяющийся по поверхности образца, оценить его скорость и характер распространения. На изображениях лазерного монитора наблюдается турбулентность из мерцающих пятен на поверхности, характеризующая наличие факела. Ориентировочное положение фронта горения и границы образца оценивалось по кадрам скоростной записи. Затем положение уточнялось путем цифровой обработки изображений.



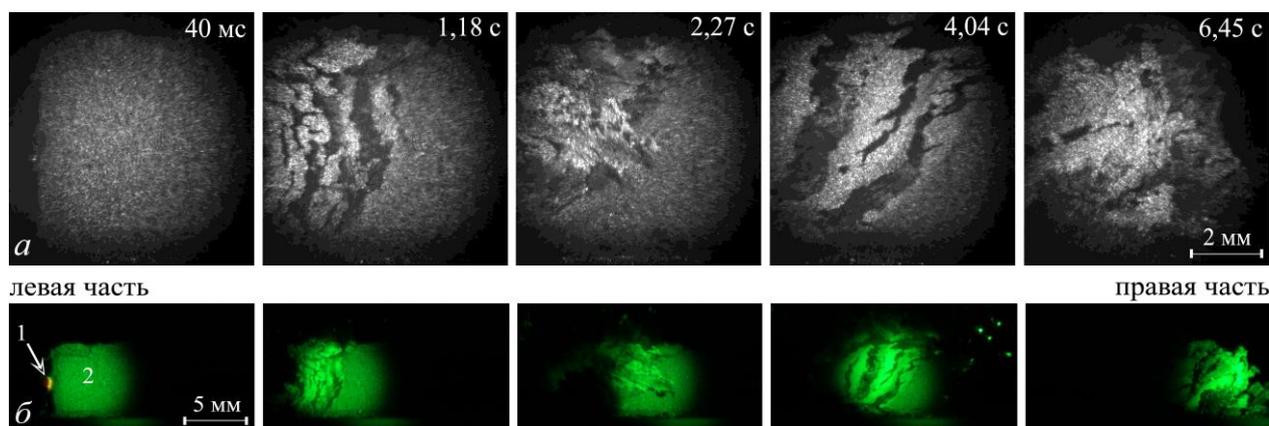
Желтая штрихпунктирная линия (1) – фронт горения; зеленая пунктирная линия (2) – граница сплошной части образца, вкладки – фронт и граница образца

Рисунок 14 – Кадры скоростной видеозаписи горения модельной топливной смеси, полученные путем прямой видеорегистрации (а) и с применением лазерного монитора (б)

Для дистанционного исследования термитных смесей $\text{TiO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$, $\text{ZrO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$, $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{наноAl} + \text{C}$ в воздухе применялась поворотная проекционная система с усилителем яркости (аналогичная схеме на рисунке 7, б, в которой зеркало б помещалось на поворотную платформу). По сравнению с лазерными мониторами с неподвижной оптической схемой, предлагаемый подход

позволяет исследовать изменение скорости и характера горения по всему образцу (рисунок 15). Преимуществом поворотной проекционной системы является неподвижность объекта исследования и возможность наблюдения поверхности рыхлых горящих материалов.

Визуализация поверхности термитных смесей TiO_2 +наноAl+C, ZrO_2 +наноAl+C и Nb_2O_5 +наноAl+C с использованием поворотной системы, а также лазерных мониторов с традиционной схемой и различным пространственным разрешением показала отсутствие жидкой фазы во время горения. На основании результатов визуализации мы полагаем, что данные реакции протекают по механизму «твердое тело \rightarrow газ», минуя жидкую фазу.



1 – место лазерного инициирования, 2 – область наблюдения

Рисунок 15 – Кадры скоростной видеозаписи горения смеси TiO_2 +наноAl+C при повороте платформы с использованием лазерного монитора (а) и узкополосной фильтрации (б)

В качестве перспективного усовершенствования лазерного монитора в диссертационной работе предлагается схема с независимой лазерной подсветкой поверхности объекта для исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения. Подобно моностатическому лазерному монитору, бистатический лазерный монитор позволяет изучать динамику изменений поверхности, анализируя соответствующие кадры скоростной видеозаписи. При использовании независимой лазерной подсветки достигнуто существенное (до 50 %) увеличение контраста изображений при исследовании металлических нанопорошков (рисунок 16).

Реализованный в работе двухканальный лазерный монитор позволил исследовать поверхность горящего нанопорошка одновременно в двух областях образца с различным увеличением. Взаимное влияние излучения усилителей яркости устранялось задержкой импульсов накачки на время, превышающее время существования инверсии в активной среде. Пример визуализации процесса горения представлен на рисунке 17.

В работе продемонстрирована возможность интегрирования лазерной подсветки в двухканальный или бистатический лазерный монитор. Предлагаемый

подход сочетает в себе два метода исследования поверхности и позволяет визуализировать различное поведение горения в области лазерного инициирования и при распространении волны горения по образцу. Пространственное разрешение каждого канала системы регулируется в соответствии с исследовательской задачей, изменяя параметры визуализирующей оптики. Перспективным применением такой системы является исследование неоднородности процесса горения нанопорошков металлов и ВЭМ. На рисунке 18, приведены результаты визуализации горения с применением импульсной лазерной подсветки.

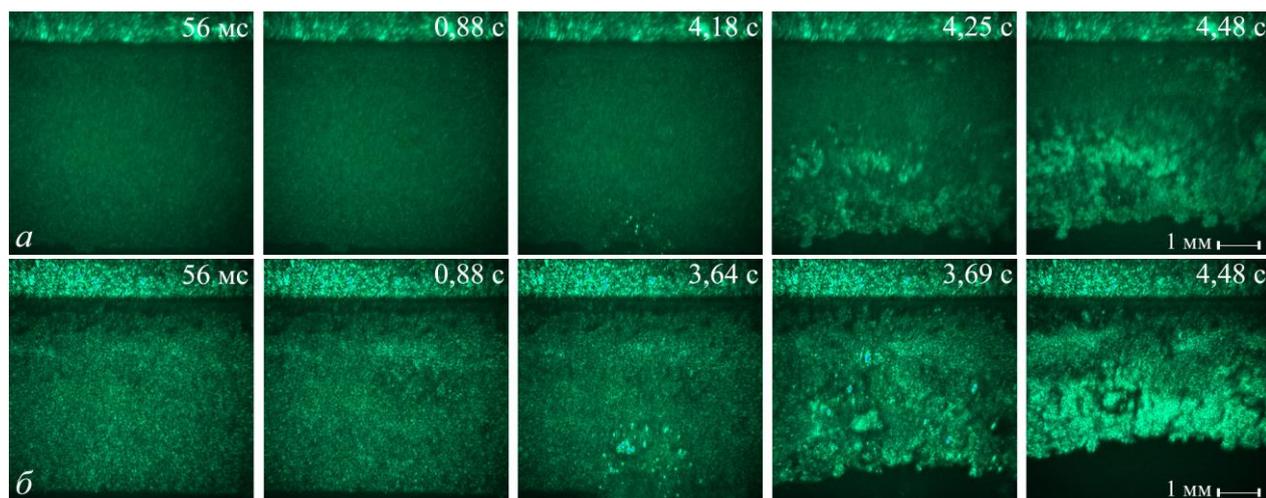
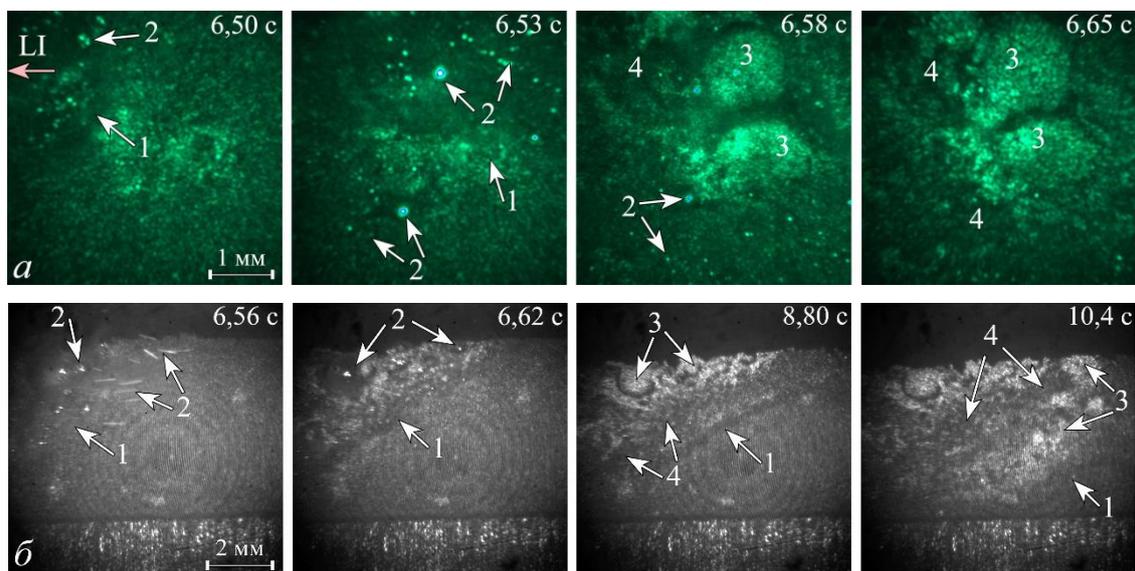
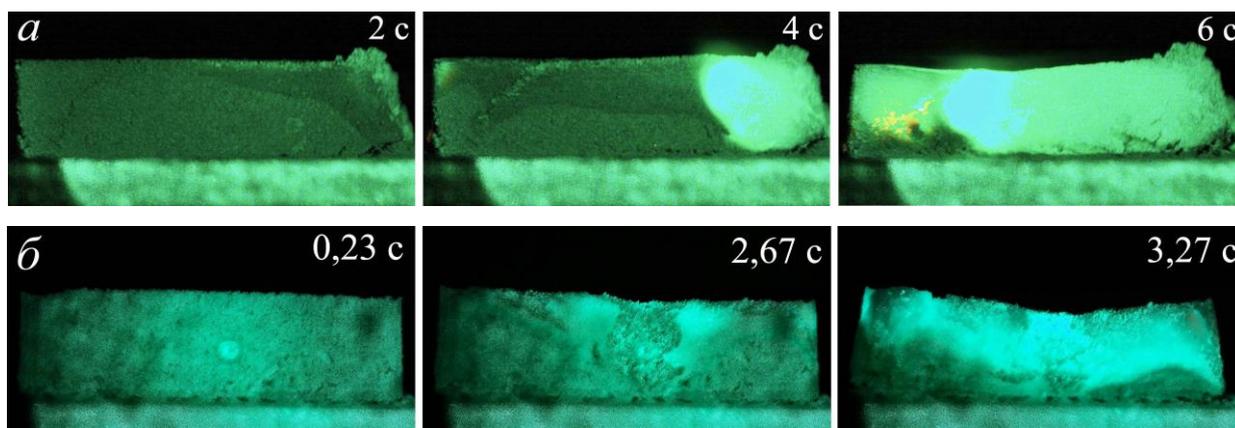


Рисунок 16 – Кадры скоростной видеозаписи лазерного инициирования и горения смеси $\text{nanoAl}+\text{nanoFe}$, полученные с использованием моностатического (*a*) и бистатического (*б*) лазерных мониторов в различные моменты времени от начала инициирования



a – канал визуализации 2 (рисунок 11); *б* – канал визуализации 1; 1 – фронт горения, 2 – жидкая фаза / разлетающиеся продукты, 3 – алюминий содержащие продукты (белые), 4 – железо содержащие продукты (темные), LI – положение области лазерного воздействия

Рисунок 17 – Кадры скоростной видеозаписи горения смеси $\text{nanoAl}+\text{ACD-6M}+\text{nanoFe}$, полученные двухканальным лазерным монитором (отображенные)



a – кадры, полученные с импульсной лазерной подсветкой от CuVг-лазера; *б* – кадры, записанные USB-камерой 5 в схеме бистатического лазерного монитора на рисунке 10

Рисунок 18 – Кадры горения образцов nanoAl (*a*) и смеси nanoAl+nanoFe (*б*)

В **шестой главе** диссертации описывается применение метода лазерной спекл-корреляции для дистанционного исследования изменений поверхности нанопорошка алюминия во время горения в воздухе. Изменение лазерных спеклов происходит вследствие изменения отражения поверхности нанопорошка металла, поэтому анализ лазерных спекл-изображений позволяет изучать процессы горения и характеризовать временные параметры распространения волн горения. Рассмотрены различные корреляционные формулы для работы с изображениями, оптимизированы параметры расчета коэффициента корреляции и разработана методика цифровой обработки лазерных спекл-изображений.

На рисунке 19 показаны изображения для различных моментов времени при горении нанопорошка алюминия в воздухе. Использование лазера подсветки мощностью 50 мВт с длиной волны 532 нм и полосовой фильтрации 532 ± 5 нм позволило избавиться от нежелательной фоновой засветки спекл-изображений. Разработана экспериментальная установка (рисунок 20), сочетающая в себе четыре метода мониторинга, позволившая верифицировать методику исследования горения нанопорошков металлов на основе лазерной спекл-корреляции.

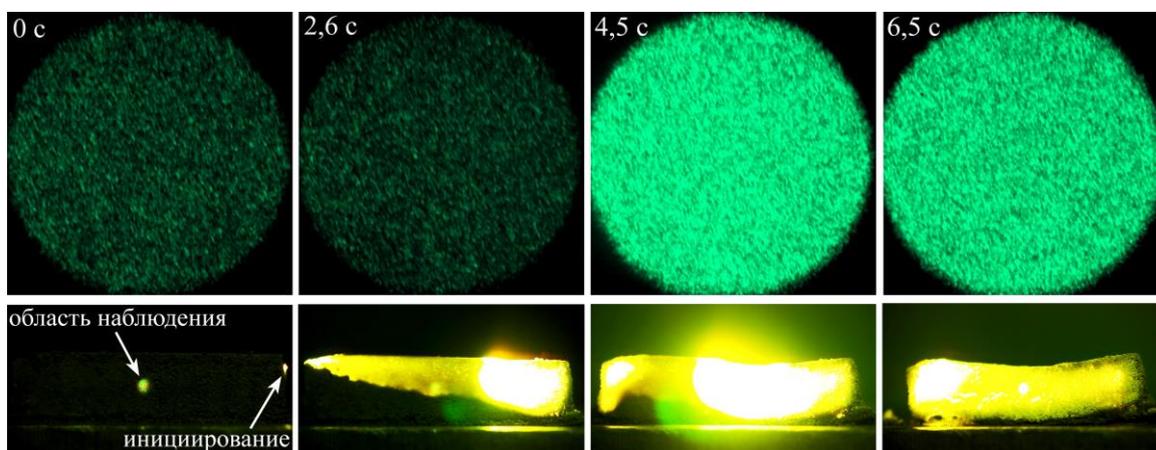
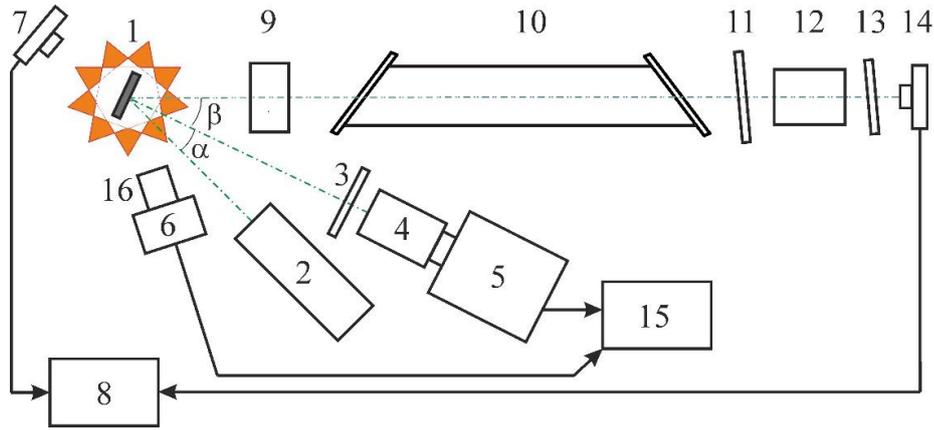


Рисунок 19 – Лазерные спекл-изображения процесса горения (верхний ряд) и изображения горящего образца нанопорошка алюминия в собственном свечении (нижний ряд)



1 – образец нанопорошка; 2 – лазер подсветки 532 нм; 3 – полосовой фильтр 532±5 нм; 4, 12, 16 – объективы; 5 – скоростная камера; 6 – USB-камера; 7, 14 – фотодиоды; 8 – осциллограф; 9 – линза; 10 – усилитель яркости; 11 – нейтральный светофильтр; 13 – диффузор; 15 – ПК

Рисунок 20 – Экспериментальная установка для комплексного исследования горения

Результаты мониторинга с использованием метода лазерной спекл-корреляции согласуются с результатами лазерного мониторинга и прямой визуализации процесса горения. В отличие от лазерного мониторинга и анализа интенсивности спекл-изображений, метод лазерной спекл-корреляции регистрирует время, когда поверхность только начинает двигаться вследствие нагрева, и позволяет более точно определить начало первой и второй волн горения. Комбинируя корреляционный анализ лазерных спеклов с анализом интенсивности тех же спекл-структур, обеспечивается более детальное исследование временных параметров горения нанопорошка металла.

На рисунке 21 представлены экспериментальные данные, полученные для образца нанопорошка алюминия. Коэффициент корреляции рассчитывался по формуле:

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

где \bar{f} – средняя интенсивность предыдущего спекл-изображения; $f(x_i, y_j)$ – интенсивность пикселей предыдущего спекл-изображения в точке $x_i y_j$; \bar{g} – средняя интенсивность текущего спекл-изображения; $g(x_i, y_j)$ – интенсивность пикселей текущего спекл-изображения в точке $x_i y_j$. На кривых коэффициента корреляции отмечается несколько характерных особенностей распространения волн горения: предварительный прогрев, прохождение первой волны в области наблюдения, индукционный период между первой низкотемпературной и второй высокотемпературной волнами горения, прохождение второй волны в области наблюдения, остывание.

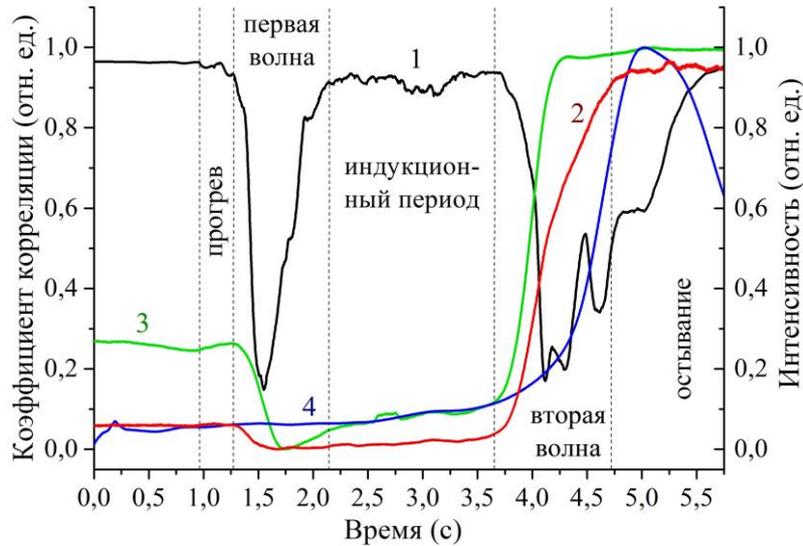
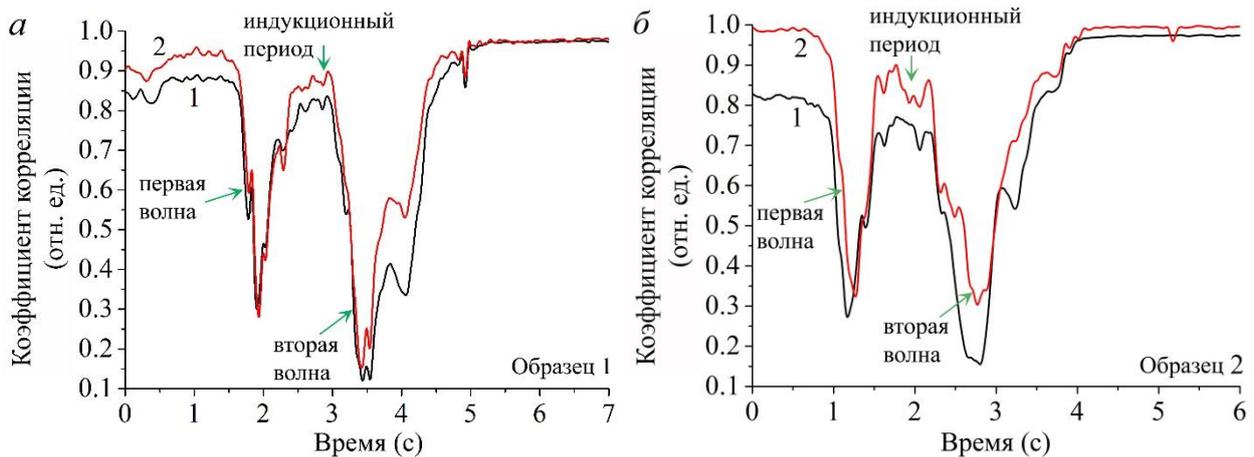


Рисунок 21 – Временные зависимости коэффициента корреляции спекл-изображений (1), средней интенсивности спекл-изображений (2), средней интенсивности изображений лазерного монитора (3), общей интенсивности пламени (4) образца порошка nanoAl



1 – расстояние 0,4 м (а) или 5 м (б) от образца до скоростной камеры и лазера подсветки; 2 – референтный канал, одинаковое расстояние 0,4 м от камеры и лазера до образца

Рисунок 22 – Результаты дистанционного мониторинга процесса горения

Поскольку спекл-изображения регистрируются не на поверхности образца, а в пространстве между объектом и объективом скоростной камеры, предложенный метод позволяет устанавливать объектив и камеру на значительном удалении от высокотемпературного объекта. При дистанционном исследовании процесса горения нанопорошков металлов методом лазерной спекл-корреляции увеличение области наблюдения и уменьшение яркости спекл-изображений приводят к расхождению результатов измерений. Использование двух камер и двух лазеров подсветки для записи лазерных спекл-изображений позволило исследовать влияние расстояния, на котором расположены лазер подсветки и камера, на значение коэффициента корреляции. Полученные результаты позволят минимизировать влияние расстояния на качество мониторинга при разработке оборудования на основе предложенного метода для конкретных практических применений.

На рисунке 22 приведены примеры мониторинга горящего нанопорошка алюминия на различных расстояниях, которые демонстрируют возможность дистанционного оптического контроля поверхности, экранированной светящимся слоем, с использованием метода лазерной спекл-корреляции, в частности оценки временных параметров горения нанопорошков металлов на расстоянии до 5 м.

Заключение

В результате выполнения диссертационной работы разработаны методики и оборудование для исследования высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей на основе методов скоростной видеосъемки с применением лазерного монитора и лазерной подсветки. С использованием разработанной техники проведено исследование горения нанопорошков металлов, термитных смесей на основе нанопорошков металлов, смесей нано- и микропорошков металлов, модельной алюминизированной топливной смеси. Выявлены морфологические особенности изменения поверхности в процессе горения различных ВЭМ, установлена стадийность горения, определены временные параметры стадий горения и скорость протекания, установлены зависимости между процессами и наблюдаемыми изменениями поверхности.

Основные выводы по работе:

1. Методика визуализации с усилением яркости изображений позволяет оценить ряд объективных параметров при изучении закономерностей горения ВЭМ, в том числе проводить сравнительный анализ различных процессов с временным разрешением до 0,8 мс и экспозицией 20–35 нс. При известных характерных изменениях интенсивности во время горения, возможно идентифицировать нанопорошок или смесь, а также определять соответствующие стадии горения и их параметры.

2. Применение быстродействующих фотодиодов дает возможность отображения и анализа интенсивности изображений лазерного монитора в режиме реального времени без компьютерной обработки. Полученные временные зависимости упрощают на практике анализ видеозаписей лазерных мониторов за счет выявления изменений оптических свойств наблюдаемых объектов непосредственно в процессе эксперимента.

3. Исследование изменения коэффициента отражения поверхности в сочетании с видеозаписями эволюции поверхности образцов во время горения нанопорошка дают более полную информацию о закономерностях горения.

4. Активные системы визуализации на основе лазерной подсветки и усиления яркости изображений регистрируют не испускаемое излучение горящего образца, а отраженное от поверхности зондирующее лазерное излучение. При этом уровень засветки, создаваемой горящим нанопорошком, в 10^4 – 10^5 раз меньше собственных шумов усилителя яркости и её влиянием на изображение лазерного монитора можно пренебречь.

5. Узкая спектральная линия атома меди ($\sim 0,2 \text{ см}^{-1}$), на которой происходит формирование изображения усилителя яркости на парах бромида меди, позволяет не только исключить влияние широкополосного излучения горящего образца, но и влияние излучения иницирующего лазера, обладающего высокой спектральной яркостью. Указанная особенность лазерного монитора дает возможность исследовать процесс лазерного иницирования в широком диапазоне длин волн иницирующего лазера (кроме линий усиления 510,6 и 578,2 нм).

6. Контрастность изображений поверхности нанопорошков металлов повышается при освещении поверхности материала в области наблюдения лазерного монитора излучением на длине волны 510,6 нм. Независимое освещение с помощью второго лазера на парах бромида меди позволяет увеличить экспозицию исследуемого объекта, что дает возможность изучения поверхности нанопорошков металлов, которые поглощают практически весь падающий свет и легко воспламеняются.

7. Неоднородность горения ВЭМ возможно исследовать, используя два основных подхода на основе лазерного мониторинга. Первый подход заключается в одновременной визуализации поверхности в двух областях с использованием двух синхронизированных усилителей яркости и двух цифровых камер. Второй подход заключается в перемещении области наблюдения одного канала визуализации.

8. Использование лазерного мониторинга и лазерной подсветки в составе одной лабораторной установки позволяет более детально изучать процесс горения нанопорошков металлов. Лазерный мониторинг дает возможность подавления широкополосной засветки и позволяет получить увеличенное изображение заданной области наблюдения с разрешением 5–25 мкм, в том числе перемещаемой. Лазерная подсветка дает обзорной визуализации горения всего образца.

9. Лазерные спекл-изображения коррелируют с изменением поверхности нанопорошков металлов в процессе горения, что позволяет не только определять начало первой и второй волн горения, но и идентифицировать волну прогрева за счет высокой чувствительности к движению поверхности, в том числе под влиянием температуры. Сочетание корреляционного анализа лазерных спеклов с анализом интенсивности тех же спекл-структур дает более точную оценку временных характеристик горения нанопорошков металлов.

Перспективы использования разработанных методик и лабораторного оборудования: процессы высокотемпературного горения различных ВЭМ на основе микро- и нанопорошков металлов, процессы лазерного интегрирования нанопорошков металлов в другие материалы, горение тонких слоев нанопорошков и термитных смесей, лазерная модификация поверхности, спекание порошков в аддитивных технологиях, лазерное иницирование ВЭМ, дистанционный контроль горящих поверхностей, сжигание элементов, образующих металлоконструкции.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых международными базами данных
Scopus или Web of Science

1. Two-channel system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders / **F.A. Gubarev**, E.Yu. Burkin, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, L. Li // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – Art. No 9371760.
2. In situ nanopowder combustion visualization using laser systems with brightness amplification / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, P.A. Antipov, D.V. Shiyarov, **F.A. Gubarev** // Proceedings of the Combustion Institute. – 2021. – Vol. 38. – P. 1695–1702.
3. Two-brightness-amplifier imaging system for energetic-materials-combustion study / **F.A. Gubarev**, A.S. Moldabekov, A.V. Mostovshchikov, L. Li // Review of Scientific Instruments. – 2021. – Vol. 92. – Art. No 053702.
4. Laser speckle correlation technique application for remote characterization of metal nanopowders combustion / L. Li, **F.A. Gubarev**, Y. Cao, I.D. Liushnevskaya, A.V. Mostovshchikov // Applied Optics. – 2021. – Vol. 60, No 22. – P. 6585–6592.
5. Laser monitor for studying the combustion of thin layers of metal nanopowders / **F.A. Gubarev**, A.V. Mostovshchikov, A.I. Fedorov, L. Li // Progress in Electromagnetics Research M. – 2021. – Vol. 101. – P. 37–45.
6. An optical system with brightness amplification for studying the surface of metal nanopowders during combustion / **F.A. Gubarev**, S. Kim, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Vol. 63, No. 3. – P. 379–386 [пер. Оптическая система с усилением яркости для исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения / **Ф.А. Губарев**, С. Ким, Л. Ли, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 96–103].
7. Spatial-temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme / L. Li, D.V. Shiyarov, **F.A. Gubarev** // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2020. – Vol. 126, No 10. – Art no. 155.
8. Optical system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A. Smirnov, **F.A. Gubarev** // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69, No 2. – P. 457–468.
9. Imaging system with brightness amplification for a metal-nanopowder combustion study / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, P.A. Antipov, D.V. Shiyarov, **F.A. Gubarev** // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127, Art. No 194503. – P. 194503-1–194503-11.
10. Analysis of surface changes of burning nanopowders using digital processing of laser monitor images / **F.A. Gubarev**, S. Kim, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59, No 18. – P. 5487–5496.

11. Laser speckle correlation technique application for study of aluminium nanopowder combustion / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, I.D. Sytnik, **F.A. Gubarev** // *Applied Optics*. – 2020. – Vol. 59, No 5. – P. 1263–1270.
12. Laser systems for distant monitoring of nanopowder combustion / L. Li, P.A Antipov, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, **F.A. Gubarev** // *Progress in Electromagnetics Research M*. – 2019. – Vol. 84. – P. 85–93.
13. Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor / L. Li, A.P. Ilyin, **F.A. Gubarev**, A.V. Mostovshchikov, M.S. Klenovskii // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44, № 16. – P. 19800–19808.
14. High-speed visualization of nanopowder combustion in air / **F.A. Gubarev**, M.S. Klenovskii, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // *Optica Pura y Aplicada*. – 2018. – Vol. 51, № 4. – P. 1–7.
15. Monitoring of aluminum nanopowder combustion ignited by laser radiation / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Il'in, **F.A. Gubarev** // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. – 2018. – Vol. 75. – P. 125–130.
16. Influence of peaking capacitance on the output power of capacitive-discharge-pumped metal halide vapor lasers / D.V. Shiyanov, V.B. Sukhanov, **F.A. Gubarev** // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 54, No 2. – Art. No 1500107.
17. Evaluation of blood plasma coagulability by laser speckle correlation / L. Li, I.D. Sytnik, **F.A. Gubarev**, Y.S. Pekker // *Biomedical Engineering*. – 2018. – Vol. 52, No 3. – С. 177–180 [пер. Оценка свертываемости плазмы крови методом корреляции лазерных спекл-изображений / Л. Ли, Ю.Д. Сытник, **Ф.А. Губарев**, Я.С. Пеккер // *Медицинская техника*. – 2018. – Т. 52, № 3. – С. 23–25].
18. Spatial-temporal gain distribution of a CuBr vapor brightness amplifier / **F.A. Gubarev**, L. Li, M.S. Klenovskii, D.V. Shiyanov // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2016. – Vol. 123, № 11. – Art no. 284.
19. Radial distribution of radiation in a CuBr vapor brightness amplifier used in laser monitors / **F.A. Gubarev**, M.V. Trigub, M.S. Klenovskii, L. Li, G.S. Evtushenko // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2016. – Vol. 122, № 1. – Art no. 2.
20. Copper bromide vapour laser with an output pulse duration of up to 320 ns / **F.A. Gubarev**, V.F. Fedorov, K.V. Fedorov, G.S. Evtushenko // *Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 46, No 1. – P. 57–60. [пер. Лазер на парах брома меди с длительностью импульса генерации до 320 нс / **Ф.А. Губарев**, В.Ф. Федоров, К.В. Федоров, Д.В. Шиянов, Г.С. Евтушенко // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46, № 1. – С. 57–60].
21. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting / G.S. Evtushenko, M.V. Trigub, **F.A. Gubarev**, T.G. Evtushenko, S.N. Torgaev, D.V. Shiyanov // *Review of Scientific Instruments*. – 2014. – Vol. 85. – Art. No 033111.
22. Influence of the discharge circuit inductance on output characteristics of a CuBr laser / **F.A. Gubarev**, M.V. Trigub, G.S. Evtushenko, K.V. Fedorov // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2013. – V. 26, No 6. – P. 559–564. [пер. Влияние индуктивности

- разрядного контура на энергетические характеристики CuBr-лазера / **Ф.А. Губарев**, М.В. Тригуб, К.В. Федоров, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 7. – С. 604–609].
23. Capacitive-discharge-pumped CuBr laser with 12 w average output power / **F.A. Gubarev**, D.V. Shiyanov, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2013. – Vol. 49, No 1. – P. 89–94.
24. Study of scalability of capacitive excited CuBr lasers / **F.A. Gubarev**, D.V. Shiyanov, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2013. – Vol. 26, No 3. – P. 241–244. [пер. Исследование возможности масштабирования CuBr-лазеров с емкостной накачкой / **Ф.А. Губарев**, Д.В. Шиянов, В.Б. Суханов, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 11. – С. 1003–1006].
25. A computational algorithm for designing an active optical system with an image intensifier / M.V. Trigub, N.A. Agapov, **F.A. Gubarev**, G.S. Evtushenko // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 56, No 5. – P. 588–591. [пер. Алгоритм расчета схемы активной оптической системы с усилителем яркости / М.В. Тригуб, Н.А. Агапов, **Ф.А. Губарев**, Г.С. Евтушенко // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 55, № 5. – С. 92–95].
26. Modeling technique of capacitive discharge pumping of metal vapor lasers for electrode capacitance optimization / **F.A. Gubarev**, G.S. Evtushenko, N.K. Vuchkov, V.B. Sukhanov, D.V. Shiyanov // Review of Scientific Instruments. – 2012. – Vol. 83. – P. 055111–055115.
27. Reduction of copper bromide molecules in the plasma of a CuBr laser during the interpulse period / S.N. Torgaev, **F.A. Gubarev**, A.M. Boichenko, G.S. Evtushenko, O.V. Zhdaneev // Russian Physics Journal. – 2011. – Vol. 54, No 2. – P. 221–225 [пер. Восстановление молекул бромида меди в плазме CuBr-лазера в межимпульсный период / С.Н. Торгаев, **Ф.А. Губарев**, А.М. Бойченко, Г.С. Евтушенко, О.В. Жданеев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2011. – Т. 201, №2. – С. 81–84].
28. Gain characteristics of large volume CuBr laser active media / **F.A. Gubarev**, V.O. Troitskiy, M.V. Trigub, V.B. Sukhanov // Optics Communications. – 2011. – Vol. 284, № 10–11. – P. 2565–2568.
29. Operation features of a longitudinal-capacitive-discharge-pumped CuBr laser / **F.A. Gubarev**, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko, D.V. Shiyanov // Quantum Electronics. – 2010. – Vol. 40, No 1. – P. 19–24. [пер. Особенности работы CuBr-лазера с накачкой продольным емкостным разрядом / **Ф.А. Губарев**, В.Б. Суханов, Г.С. Евтушенко, Д.В. Шиянов // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 1. – С. 19–24].
30. CuBr laser excited by a capacitively coupled longitudinal discharge / **F.A. Gubarev**, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko, V.F. Fedorov, D.V. Shiyanov // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2009. – Vol. 45, No 2. – P. 171–177.

31. On the nature of phantom currents in the active medium of self-contained metal atom transition lasers / N.A. Yudin, V.B. Sukhanov, **F.A. Gubarev**, G.S. Evtushenko // Quantum Electronics. – 2008. – Vol. 38, No 1. – P. 23–28. [пер. О природе фантомных токов в активной среде лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов / Н.А. Юдин, В.Б. Суханов, **Ф.А. Губарев**, Г.С. Евтушенко // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 1. – С. 23–28].
32. Capacitive-discharge-pumped copper bromide vapour laser / V.B. Sukhanov, V.F. Fedorov, **F.A. Gubarev**, V.O. Troitskiy, G.S. Evtushenko // Quantum Electronics. – 2007. – Vol. 37, No 7. – P. 603–604. [пер. Лазер на парах бромида меди, возбуждаемый емкостным разрядом / В.Б. Суханов, В.Ф. Федоров, **Ф.А. Губарев**, В.О. Троицкий, Г.С. Евтушенко // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 7. – С. 603–604].

Статьи в российских журналах из перечня ВАК РФ

33. Лазерный монитор с независимой подсветкой для наблюдения процессов высокотемпературного горения нанопорошков металлов / **Ф.А. Губарев**, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, Л. Ли, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – Вып. 8. – С. 20–24.
34. Двухканальный лазерный монитор для наблюдения процессов высокотемпературного горения нанопорошков металлов / **Ф.А. Губарев**, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, Л. Ли, А.И. Федоров, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – Вып. 7. – С. 38–41.
35. **Губарев Ф.А.** Радиальное распределение однопроходowego излучения в активном элементе лазерного монитора / **Ф.А. Губарев**, Г.С. Евтушенко, Ли Линь // Контроль. Диагностика. – 2014. – №. 13. – С. 160–162.
36. Губарев Ф.А. Частотно-импульсное кодирование генерации CuBr-лазера / **Ф.А. Губарев**, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 12. – С. 1107–1111.
37. Макет лазерного монитора на основе активной среды CuBr-лазера для контроля и диагностики // Г.С. Евтушенко, М.В. Тригуб, **Ф.А. Губарев**, С.Н. Торгаев, Д.В. Шиянов // Контроль. Диагностика. – 2013 – №. 13. – С. 42–45.
38. Визуализация процесса СВС с использованием активных сред CuBr-лазеров / М.В. Тригуб, Г.С. Евтушенко, А.И. Кирдяшкин, В.Д. Китлер, Р.А. Юсупов, **Ф.А. Губарев**, С.Н. Торгаев, Д.В. Шиянов // Ползуновский Вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 181–184.
39. Режим одиночных импульсов генерации CuBr-лазера / **Ф.А. Губарев**, В.Ф. Федоров, К.В. Федоров, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 12. – С. 1107–1111.
40. Управление энергией генерации CuBr-лазера / **Ф.А. Губарев**, В.Ф. Федоров, К.В. Федоров, Г.С. Евтушенко // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 106–110.

41. Лазерный проекционный микроскоп с покадровой регистрацией изображения / Г.С. Евтушенко, М.В. Тригуб, **Ф.А. Губарев**, С.Н. Торгаев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 4. – С. 154–158.
42. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображения / М.В. Тригуб, Г.С. Евтушенко, **Ф.А. Губарев**, С.Н. Торгаев // Контроль. Диагностика, специальный выпуск. – 2011. – С. 140–143.
43. Юдин Н.А. Развитие разряда в активных средах лазеров на парах металлов с малым рабочим объемом / Н.А. Юдин, **Ф.А. Губарев**, В.Б. Суханов // Известия ВУЗов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 5/2. – С. 41–46.
44. Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах металлов в условиях засветки / Г.С. Евтушенко, **Ф.А. Губарев**, В.Б. Суханов, Д.В. Шиянов, С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, №4. – С. 141–146.
45. Лазеры на парах бромида меди нового поколения / О.С. Андриенко, **Ф.А. Губарев**, В.А. Димаки, А.И. Иванов, М.Е. Левицкий, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий, В.Ф. Федоров, А.Г. Филонов, Д.В. Шиянов // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 10. – С. 999–1009.
46. Влияние добавки метана на характеристики лазера на парах бромида меди / Д.В. Шиянов, **Ф.А. Губарев**, Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов, О.С. Андриенко // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 11. – С. 1047–1050.
47. Энергетические характеристики CuBr-лазера с емкостной накачкой при использовании схемы на основе лампового коммутатора / **Ф.А. Губарев**, В.Ф. Федоров, Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 106–110.
48. Управление генерацией CuBr-лазера / **Ф.А. Губарев**, В.Ф. Федоров, Г.С. Евтушенко, М.В. Тригуб // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, № 4. – С. 147–151.
49. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромида меди с пониженным энергозатратом в разряд / **Ф.А. Губарев**, В.Б. Суханов, Д.В. Шиянов, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 1. – С. 85–93.
50. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц / **Ф.А. Губарев**, В.Ф. Федоров, Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов, С.С. Заикин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 2. – С. 106–107.

Монографии

51. **Губарев Ф.А.** Лазеры на парах галогенидов металлов с накачкой емкостным разрядом / Ф.А. Губарев, Г.С. Евтушенко. – Saarbrücken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 180 с.
52. Евтушенко Г.С. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов / Г.С. Евтушенко, Д.В. Шиянов, **Ф.А. Губарев**. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 276 с.

Патенты и свидетельства

53. Пат. 2685072 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Способ исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / **Губарев Ф.А.**, Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2018124660 ; заявил. 06.07.18 ; опубл. 16.04.19, Бюл. № 11 . – 11 с.
54. Пат. 2746308 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / **Губарев Ф.А.**, Мостовщиков А.В., Буркин Е.Ю., Свиридов В.В., Ильин А.П. ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2020133002 ; заявил. 07.10.20 ; опубл. 12.04.2021 ; Бюл. № 11. – 15 с.
55. Пат. 2712756 Российская Федерация, МПК G 02 B21/0004. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / **Губарев Ф.А.**, Ли Л., Антипов П.А., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2019117585 ; заявил. 06.06.19 ; опубл. 31.01.2020 ; Бюл. № 4. – 14 с.
56. Пат. 2685040 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / **Губарев Ф.А.**, Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2018124662 ; заявил. 06.07.18 ; опубл. 16.04.19, Бюл. № 11 . – 11 с.
57. Пат. 2687308 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / **Губарев Ф.А.**, Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2018124663 ; заявил. 06.07.18 ; опубл. 13.05.19, Бюл. № 14 . – 10 с.
58. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021618999 Российская Федерация, Программа расчета коэффициента корреляции спекл-изображений / Люшневская Ю.Д., **Губарев Ф.А.** – № 2021618120 ; заявил. 28.05.21 ; опубл. 03.06.21.
59. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018610433 Российская Федерация, Оценка времени свертывания крови методом анализа цифровых спекл-изображений / Ли Л., **Губарев Ф.А.** – № 2017661573; заявил. 13.11.17 ; опубл. 11.01.18.
60. Пат. на полезную модель 126852 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Лазерный проекционный микроскоп / Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., **Губарев Ф.А.**, Торгаев С.Н. ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2012145585/28 ; заявил. 25.10.12 ; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10. – 2 с.
61. Пат. 2463634 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Лазерный проекционный микроскоп (варианты) / Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., **Губарев Ф.А.**, Торгаев С.Н. ; заявитель и патентообладатель Томский

политехнический университет. – № 2011120852/28 ; заявил. 24.05.11 опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28. – 9 с.

62. Пат. 2363080 Российская Федерация, МПК Н 01 S3/08. Способ возбуждения лазеров на парах галогенидов металлов и активный элемент лазера на парах галогенидов металлов / Суханов В.Б., Троицкий В.О., **Губарев Ф.А.**, Фёдоров В.Ф.; заявитель и патентообладатель Институт оптики атмосферы СО РАН. – № 2007137328/28; заявил. 08.10.07; опубл. 27.07.09, Бюл. № 21. – 12 с.
63. Пат. на полезную модель 62742 Российская Федерация, МПК Н 01 S3/08. Активный элемент лазера на парах галогенида металла / Суханов В.Б., Троицкий В.О., **Губарев Ф.А.**, Иванов А.И.; заявитель и патентообладатель Институт оптики атмосферы СО РАН. – № 2005130448/28 ; заявил. 30.09.05 ; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12. – 2 с.

Публикации в сборниках трудов конференций

64. Laser monitor application for study of aluminum nanopowder ignition and combustion / **F.A. Gubarev**, I.D. Liushnevskaya, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // *Proceedings of SPIE*. – 2021. – Vol. 11846. – Art. No 1184604.
65. Study of aluminium nanopowder combustion by method of laser-speckle correlation / L. Li, A. Mostovshchikov, A. Ilyin, **F. Gubarev** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1019. – Art. No 012061.
66. High-speed visualization of aluminum nanopowder combustion in air / **F. Gubarev**, A. Mostovshchikov, A. Ilyin, L. Li // *Proceedings of SPIE*. – 2019. – Vol. 11066. – Art. No 1106610.
67. Antipov P.A. Rotational projection optical system for nanopowder combustion monitoring / P.A. Antipov, L. Li, **F.A. Gubarev** // 20th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk, 2019. – P. 373–378.
68. Sytnik I.D. A prototype of optical blood coagulometer / I.D. Sytnik, L. Li, **F.A. Gubarev** // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk, 2019. – P. 593–596.
69. Monitoring of nanopowder combustion ignited by laser radiation / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A. Smirnov, **F.A. Gubarev** // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Toyama, 2018. – P. 311–316.
70. Capacitive-discharge-pumped copper bromide vapor laser with output power up to 15 W / **F.A. Gubarev**, D.V. Shiyonov, V.B. Sukhanov // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Toyama, 2018. – P. 1909–1914.
71. Aluminum nanopowder combustion monitoring using an optical system with brightness amplification / **F.A. Gubarev**, A.V. Mostovshchikov, A.P. Il'in, L. Li // 2017 Progress in electromagnetics research symposium – spring (PIERS). – St Petersburg, 2017. – P. 2694–2698.

72. Li L. Liquid transparency changing dynamics estimation by means of digital speckle correlation / L. Li, A.I. Bloshkina, **F.A. Gubarev** // 2017 Progress in electromagnetics research symposium – spring (PIERS). – St Petersburg, 2017. – P. 3172–3175.
73. **Gubarev F.A.** Copper bromide laser monitor for combustion processes visualization / F.A. Gubarev, A.V. Mostovshchikov, M.S. Klenovskii // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Shanghai, 2016. – P. 2666–2670.
74. **Gubarev F.A.** A mirror based scheme of a laser projection microscope / F.A. Gubarev, L. Li, M.S. Klenovskii // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 81. – Art. No. 012016.
75. **Gubarev F.A.** A long pulse CuBr vapor oscillator for laser monitor applications / F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii // Journal of Physics: Conf. Series. – 2016. – Vol. 671. – Art. No 012019.
76. Speckle pattern processing by digital image correlation / **F. Gubarev**, L. Li, M. Klenovskii, A. Glotov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 48. – Art. No 04003.
77. Li L. The influence of the radiation source parameters on the accuracy of digital speckle correlation method / L. Li, **F. Gubarev** // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – Art. No 01053.
78. Vibration measurement by means of digital speckle correlation / L. Li, **F.A. Gubarev**, M.S. Klenovskii, A.I. Bloshkina // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Omsk, 2016. – Art. No 7491753.
79. Investigation of extracting information from vibrating objects by digital speckle correlation / A.I. Bloshkina, L. Li, **F.A. Gubarev**, M.S. Klenovskii // XVII International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk, 2016. – P. 637–641.
80. **Gubarev F.A.** Radial distribution of a single-pass amplified radiation in the active elements of CuBr lasers / F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii, L. Li // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81, № 1. – P. 1–8.
81. High-speed process visualization using metal vapor brightness amplifiers / **F.A. Gubarev**, G.S. Evtushenko, M.V. Trigub, D.V. Shiyanov, S.N. Torgaev // 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014). – Prague, 2014. – P. 1–8.
82. Сухарников К.В. Бистатическая схема лазерного монитора / К.В. Сухарников, **Ф.А. Губарев** // Сборник научных трудов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электронные приборы, системы и технологии». – Томск, 2013. – С. 200–206.

Подписано в печать
07.10.2021 г. Тираж 100 экз.
Кол-во стр. 42. Заказ 268
Бумага офсетная. Формат А5. Печать RISO.
Отпечатано в типографии ООО «СПБ Графикс»
634034, г. Томск, ул. Советская, 80
тел. 8 903 954 7362