

На правах рукописи



Ли Линь

**Аппаратно-программный лазерный комплекс
для исследования параметров
высокотемпературного горения**

Специальность:

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Губарев Федор Александрович

Официальные оппоненты: **Юдин Николай Александрович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», профессор кафедры управления инновациями

Кудряшова Ольга Борисовна
доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов

Защита состоится 28 ноября 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.01 в ФГАОУ ВО Национальном исследовательском Томском политехническом университете (634050, г. Томск, пр. Ленина, 43, ауд. 215).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО Национального исследовательского Томского политехнического университета и на сайте: dis.tpu.ru.

Автореферат разослан _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.В. Мостовщиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Визуализация является одним из основных способов в изучении физических процессов и закономерностей. Вещество, существующее в реальности, претерпевает изменения в ходе взаимодействия с другими веществами, и эти изменения приводят к изменениям физических или химических свойств вещества. Посредством наблюдения изменений физических и химических свойств вещества в ходе динамических процессов появляется возможность исследования причин, изменяющих вещество. Существует ряд динамических процессов, исследование которых обычными визуальными методами затруднено или невозможно. Кроме этого, некоторые динамические процессы сопровождаются высокотемпературными состояниями вещества, исследование которых может быть опасно для наблюдателя или оборудования. В связи с этим разработка методов для наблюдения динамики высокотемпературных процессов является актуальной задачей.

Интерес к изучению динамики высокотемпературных процессов привел к возникновению и развитию нескольких разновидностей методов исследования. Наиболее распространёнными из них являются калориметрия, пирометрия, спектрометрия, использование ряда термопар, расположенных вдоль образца для измерения скорости горения, применение синхротронного излучения, регистрация яркости собственного свечения с использованием фотодиода, скоростная видеорегистрация. Существующие методы позволяют достаточно точно измерять температуру горения и исследовать форму плазменного факела, но не позволяют исследовать поверхность образца в режиме реального времени, в частности исследовать форму фронта горения, морфологию поверхности, отражательную способность. При использовании ряда термопар термопары разрушаются в ходе измерений, имеют невысокую точность и большую инерционность определения скорости горения.

Среди объектов исследования с помощью скоростной видеорегистрации следует выделить горение нанопорошка алюминия в воздухе. Алюминий является одним из распространенных металлов в земной коре, и содержит большую потенциальную энергию. Поэтому нано- и микропорошки алюминия, а также смеси нано- и крупнодисперсных порошков алюминия часто используются в качестве добавок при производстве топлива. В связи с наличием интенсивной фоновой засветки в процессе горения нанопорошка металла непосредственное визуальное наблюдение поверхности порошка существенно затруднено. Лазер как источник монохроматического излучения имеет узкую полосу генерации и усиления. Использование лазера в качестве источника света в методах неразрушающего контроля и диагностики позволяет эффективно подавить интенсивную фоновую засветку и исследовать характер и параметры горения порошков металлов.

Одним из методов неразрушающего контроля является метод корреляции цифровых спекл-изображений. Оптические методы на основе интерференции

лазерного излучения позволяют определять характер рассеяния света объектом исследования. Изменение оптических свойств нанопорошков во время горения позволило полагать, что методы спекл-интерферометрии могут использоваться для определения характеристик процесса горения. В частности, изменение коэффициента корреляции цифровых спекл-изображений может являться количественной характеристикой процесса горения, с помощью которой возможно определение скорости продолжительности стадий горения.

Объектами исследования являются нано- и микропорошки металлов и их оптические характеристики.

Предметом исследования являются методы, алгоритмы и устройства для наблюдения динамики процессов горения нано- и микропорошков металлов.

Цель исследования: разработка аппаратно-программного комплекса для наблюдения и измерения параметров высокотемпературного горения нано- и микропорошков металлов и их смесей в режиме реального времени.

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

1. Разработать макет лазерного монитора для скоростной визуализации, позволяющий исследовать высокотемпературное горение нанопорошков металлов и их смесей. Провести исследование процесса горения нанопорошков металлов с использованием разработанного макета.
2. Разработать способ количественной оценки коэффициента отражения поверхности нанопорошка при наблюдении с помощью лазерного монитора.
3. Определить характер влияния параметров работы усилителя яркости на характеристики излучения.
4. Разработать метод мониторинга на основе анализа спекл-изображений для наблюдения изменения характеристик отражения порошковых (нано- и микропорошки металлов) объектов.
5. Провести оптимизацию параметров обработки лазерных спекл-изображений и оценить влияние источника излучения на точность измерений.
6. Разработать программное обеспечение, позволяющее проводить анализ спекл-изображений, а также изображений, полученных с помощью лазерного монитора.

Научная новизна

1. Впервые реализовано наблюдение процессов горения нанопорошков металлов в воздухе с использованием лазерного монитора. Показана возможность изучения морфологии поверхности горящего образца в режиме реального времени.
2. Предложен метод количественной оценки процессов горения по изменению отражательной способности поверхности порошка и устройство, реализующее этот метод.
3. Определен характер влияния параметров работы усилителя яркости на парах брома меди на радиальное распределение усиления и оптимальные

параметры работы для получения равномерного профиля усиления. Выявлено изменение радиального распределения усиления во время импульса генерации.

4. Предложена техника эксперимента на основе метода корреляции цифровых спекл-изображений для определения временных параметров процессов горения нанопорошков.

Практическая ценность результатов

1. Разработан макет лазерного монитора для исследования временных параметров и режима горения нанопорошков металлов и их смесей.
2. Разработан метод количественной оценки процесса горения нанопорошка металла и устройство на его основе, защищенные патентами РФ.
3. Разработан аппаратно-программный комплекс для исследования динамики горения нанопорошков металлов и других рассеивающих сред на основе метода корреляции цифровых спекл-изображений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Неоднородность усиления в центре пучка, характерная для лазеров на парах металлов, может выравниваться в первые 7–10 нс (18 нс для ГРТ большого активного объема) путем оптимизации концентрации паров рабочего вещества и введения активной добавки НВг. При этом не обеспечивается равномерный профиль на протяжении всего импульса генерации, который не влияет на качество изображения объекта, расположенного на расстоянии до 1 м от активного элемента.
2. Изменение яркости изображений, формируемых усилителем яркости, позволяет оценивать изменение коэффициента отражения поверхности горящего образца нанопорошка в диапазоне до 2,5 раз в режиме реального времени со скоростью нарастания до 180 %/с.
3. Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет проводить качественный и количественный анализ динамики процессов горения нанопорошков на расстоянии до 0,5 м, что превосходит возможности имеющихся лазерных мониторов.
4. Метод корреляции цифровых спекл-изображений позволяет определять скорость протекания и время стадий горения нанопорошков металлов в воздухе.

Достоверность результатов работы

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, 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.

Апробация результатов работы

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и симпозиумах:

1. VX Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2019», СГУГиТ, г. Новосибирск.
2. XX International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices – EDM'2019, НГТУ, ЗСОЛ «Эрлагол», п. Чемал.
3. VI International Symposium on Optics and Biophotonics, СГУ, г. Саратов, 2018 г.
4. Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) in Shanghai (Китай, 2016 г.), St. Petersburg (Россия, 2017 г.), Toyama (Япония, 2018 г.).
5. Международная научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии», ТГУ, г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.
6. Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи», ТПУ, г. Томск, 2017 г.
7. Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, ТПУ, г. Новосибирск, 2017 г.
8. NDE 2017 Conference & Exhibition of the society for NDT (ISNT), IIT Madras, Chennai (India).
9. XXI Международная научная конференция студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии», ТПУ, г. Томск, 2015 г.

Реализация результатов работы

Результаты работы использованы при выполнении работ по Государственному заданию «Наука», проект: 11.1928.2017/4.6.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 6 статей в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 12 статей в сборниках трудов конференций, индексируемых Scopus и Web of Science, 3 патента РФ на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора

состоит в

- построении оптических схем экспериментов;
- проведении экспериментальных исследований;
- разработке методики проведения исследований и обработке цифровых изображений;
- разработке прототипа прибора для измерения времени свертывания крови;
- обработке полученных экспериментальных данных, построении графиков и зависимостей, подготовке публикаций.

Постановка задач исследований и анализ полученных данных осуществлялись совместно с научным руководителем. Результаты, составившие основу

защищаемых положений, получены лично автором либо при его определяющем участии.

В работе, на разных её этапах, участвовали сотрудники Томского политехнического университета А.П. Ильин, М.С. Кленовский, Я.С. Пеккер и студенты Томского политехнического университета Ю.Д. Сытник, А.И. Блошкина, П.А. Антипов.

Структура и краткое содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 162 ссылки, и одного приложения. В работе 163 страницы, включая 95 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведено краткое содержание работы.

В **первой главе** проведен литературный обзор работ по теме исследования. Рассматриваются основные характеристики и свойства нанопорошков металлов, в частности нанопорошка алюминия и смесей нано- и крупнодисперсных порошков. Рассматриваются такие параметры, как температура и скорость горения, тепловыделение, яркость и другие. Рассматриваются вопросы активации нанопорошков, которая используется для модификации их свойств. Представлена существующая аппаратура и методы исследования динамики процессов горения нанопорошков металлов, а также аппаратура для исследования исходных продуктов и продуктов сгорания. Особое внимание уделяется оптическим методам исследования, в частности скоростной видеосъемке и лазерной визуализации.

Наряду с применением скоростного фотографирования рассматривается явление лазерных спеклов при освещении рассеивающих и отражающих сред когерентным монохроматичным светом. Обсуждаются различные применения лазерной спекл-визуализации в промышленном контроле и биомедицинской диагностике.

Во **второй главе** описываются аппаратура и методы, которые применялись для решения поставленных задач диссертационной работы, их принцип работы и используемые компоненты. Представлены различные оптические системы для наблюдения высокотемпературного горения порошков металлов с использованием скоростной видеорегистрации.

В первом разделе второй главы описывается существующее оборудование для регистрации изображений процесса горения нано- и микропорошков. Отмечается необходимость применения синхронизации скоростной камеры и активного элемента усилителя яркости для повышения качества визуализации.

Во втором разделе главы описываются конструкция активных элементов, используемых в качестве усилителей яркости, и особенности их работы. Конструкция активного элемента усилителя яркости на парах бромида меди представлена на рис. 1. Активный элемент включает в себя кварцевую газоразрядную трубку (ГРТ), три нагревателя для обеспечения температурных режимов ГРТ, рабочего вещества и адсорбента, насыщенного бромводородом.

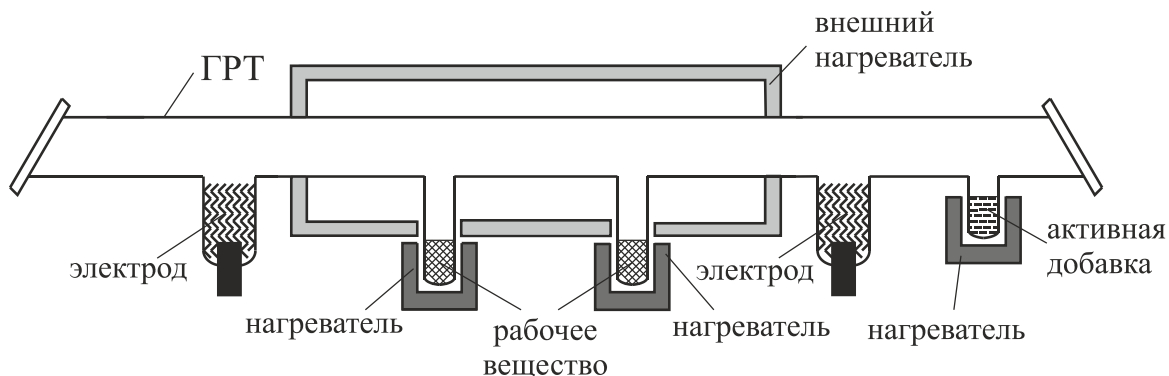


Рис. 1. Конструкция активного элемента усилителя яркости на парах бромида меди

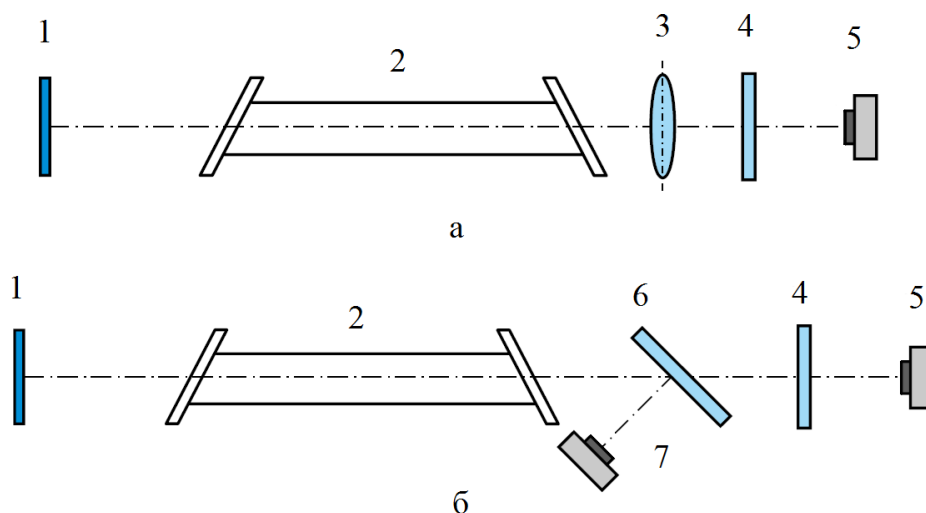


Рис. 2. Схемы для исследования профиля пучка излучения (а) и интегрального усиления о времени (б): 1 – зеркало; 2 – усилитель яркости; 3 – линза; 4 – нейтральный светофильтр; 5 – камера (фотодиод); 6 – светоделительная пластина; 7 – фотодиод

Оптические характеристики активной среды на парах бромида меди зависят от условий работы активного элемента, таких как концентрация паров рабочего вещества в активном объеме, присутствие активной добавки бромводорода и мощность накачки. Для исследования зависимости радиального распределения усиления в активной среде на парах бромида меди от условий работы использовались оптические схемы с двухпроходovým усилением, представленные на рис. 2. Исследования проводились при разных рабочих условиях, в частности при разной мощности накачки и разных температурах нагревателей контейнеров с бромидом меди (различной концентрации паров бромида меди) и генератора HBr (различной концентрации активной примеси HBr). Проведенное исследование

выявило оптимальные условия для получения равномерного профиля усиления активной среды, которые в последующем применялись при использовании усилителя яркости для наблюдения процессов горения.

В ходе использования лазерного монитора для исследования горения нанопорошка алюминия в воздухе было обнаружено, что изменение яркости изображений, регистрируемых лазерным монитором, соответствует изменению отражательной способности поверхности, что в свою очередь соответствует стадиям процесса горения. Это делает возможным применение фотодиодов для регистрации усиленного сигнала с целью контроля изменения отражения поверхности образца.

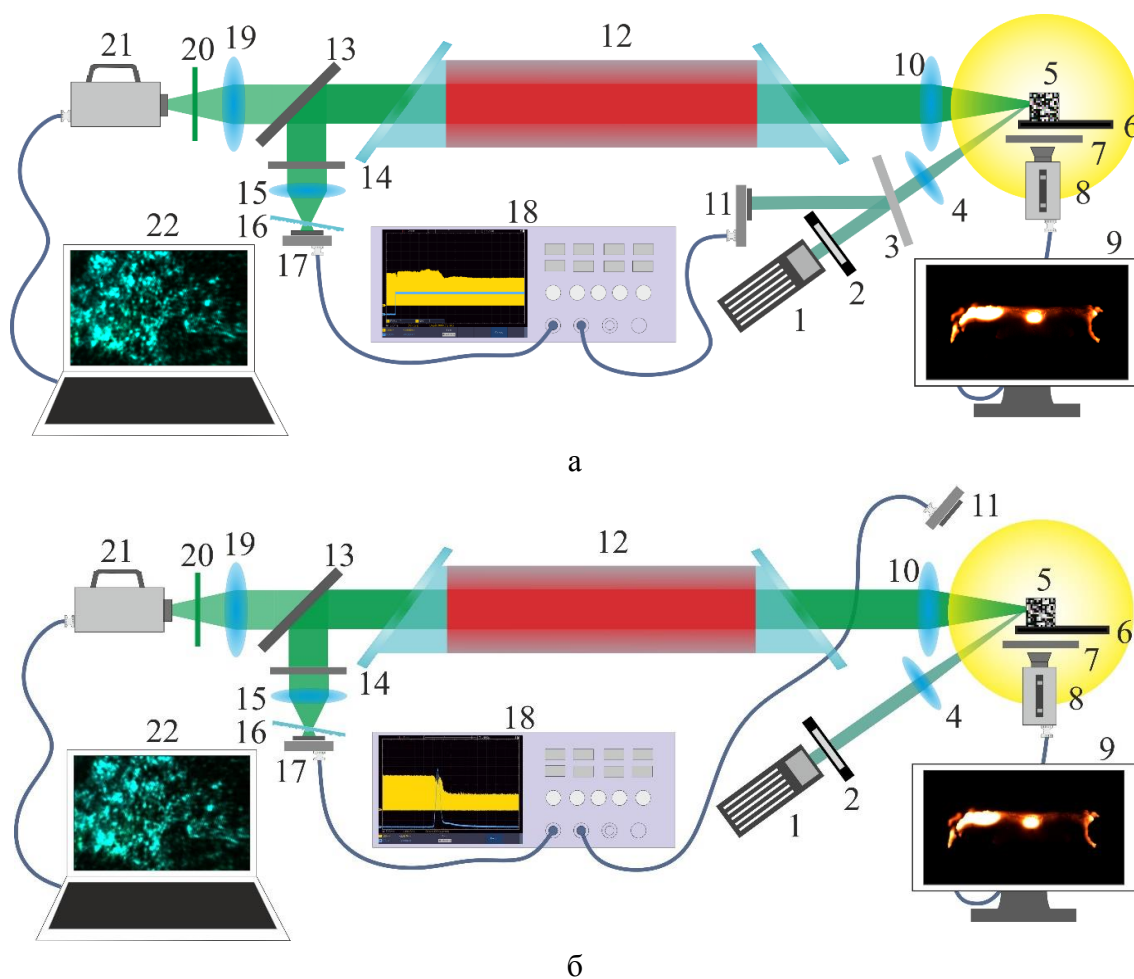


Рис. 3. Схемы лазерного монитора для визуализации поверхности образцов наноалюминия с регистрацией инициирующего излучения (а) и собственной яркости горящего образца (б):

- 1 – инициирующий лазер; 2 – затвор; 3, 13 – светоделительные пластины;
- 4, 10, 15, 19 – линзы или объективы; 5 – объект исследования; 6 – подложка;
- 7, 14 – нейтральные светофильтры; 8 – USB-камера; 9, 22 – ПК; 11, 17 – фотодиоды;
- 12 – усилитель яркости; 16 – диффузор; 18 – осциллограф; 20 – фильтр 510 ± 5 нм;
- 21 – скоростная камера

Инициирование процесса горения в ходе работы осуществлялось как традиционным применением открытого огня (спичка или газовая горелка), так и лазерным излучением твердотельного лазера. Мощности излучения 200 мВт с

длиной волны 532 нм, как правило, было достаточно для инициирования горения нанопорошка алюминия и его смесей с другими нано- и крупнодисперсными порошками. На рис. 3 приведены схемы для исследования процесса горения нанопорошков с применением лазерного инициирования, с одновременной регистрацией изображений поверхности скоростной камерой и средней яркости изображений быстродействующим фотодиодом. Предложенный способ исследования процесса горения и устройство для его реализации защищены патентами РФ.

Горение нанопорошков металлов и их смесей в ряде случаев сопровождается не только высокой температурой, но и разлетом продуктов сгорания. Чтобы повысить практичности и надежность аппаратуры лазерного мониторинга, предлагается схема удаленного наблюдения, в которой изображение формируется зеркалом или комбинацией зеркала и собирающей линзы. Предложенная схема позволила наблюдать процесс горения нанопорошков металлов на расстоянии 0,5 м (рис. 4).

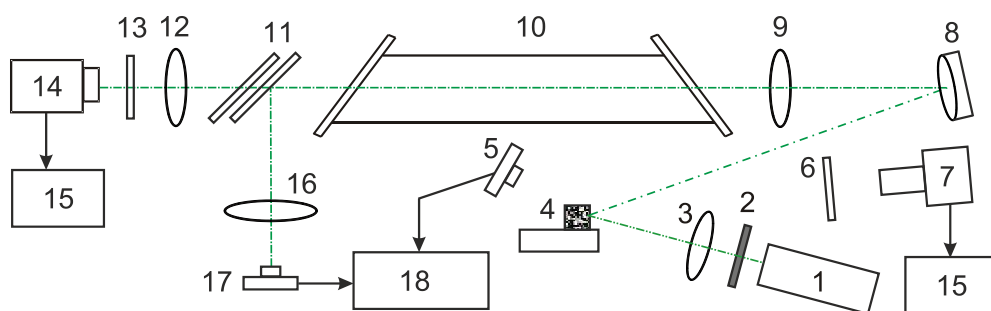


Рис. 4. Схема лазерного монитора для дистанционного наблюдения процессов высокотемпературного горения: 1 – твердотельный лазер; 2 – оптический затвор; 3, 16 – линзы; 4 – нанопорошок алюминия; 5, 17 – фотодиоды; 6, 11 – нейтральный фильтр; 7 – USB-камера; 8 – вогнутое длиннофокусное зеркало; 9, 12 – объективы; 10 – усилитель яркости; 13 – фильтр 510 ± 5 нм; 14 – скоростная камера; 15 – ПК; 18 – осциллограф

В третьем разделе второй главы описывается метод лазерной подсветки для наблюдения высокотемпературных процессов горения нанопорошков металлов. На рис. 5 представлена схема лазерной подсветки с использованием в качестве источника подсветки излучения с длиной волны 532 нм. Для блокирования широкополосной засветки от горящего образца применялся интерференционный фильтр на полосу пропускания 532 ± 5 нм. Мощность лазера подсветки регулировалась для получения удовлетворительной освещенности объекта.

При освещении шероховатой поверхности когерентным излучением возникают лазерные спеклы, которые являются источником информации о поверхности объекта наблюдения. Корреляция спекл-изображений по отношению друг к другу характеризует изменение объекта исследования. В четвертом разделе главы описывается техника эксперимента для регистрации и обработки лазерных

спеклов при освещении поверхности нанопорошков излучением твердотельного лазера с длиной волны 532 нм (рис. 6) На рис. 7 показаны спекл-изображения, полученные в экспериментальной схеме на рисунке 6.

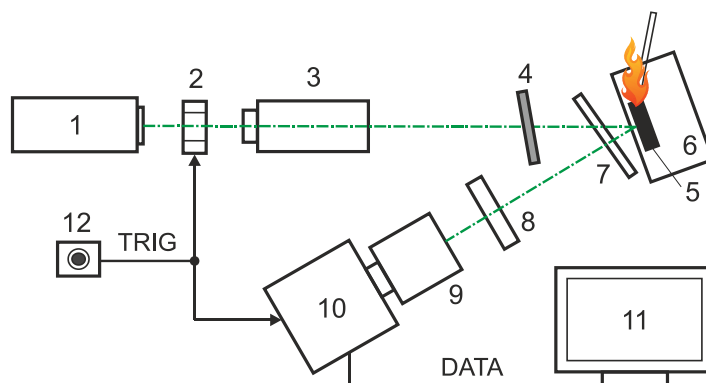


Рис. 5. Схема наблюдения процесса горения с использованием лазерной подсветки: 1 – твердотельный лазер 532 нм; 2 – оптический затвор; 3 – расширитель пучка; 4 – диффузор; 5 – объект исследования; 6 – подложка; 7 – нейтральный фильтр; 8 – фильтр 532 ± 5 нм; 9 – объектив; 10 – скоростная камера; 11 – ПК; 12 – кнопка запуска

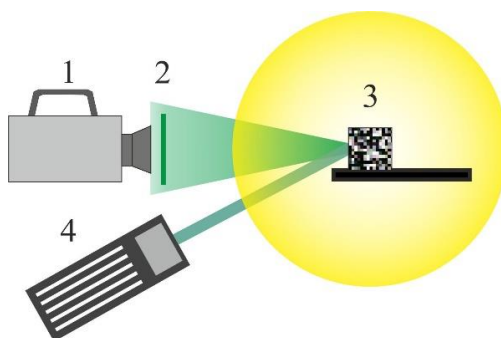


Рис. 6. Экспериментальная схема для получения спекл-изображений поверхности нанопорошка. 1 – скоростная камера с объективом; 2 – фильтр 532 ± 5 нм; 3 – образец нанопорошка; 4 – твердотельный лазер 532 нм

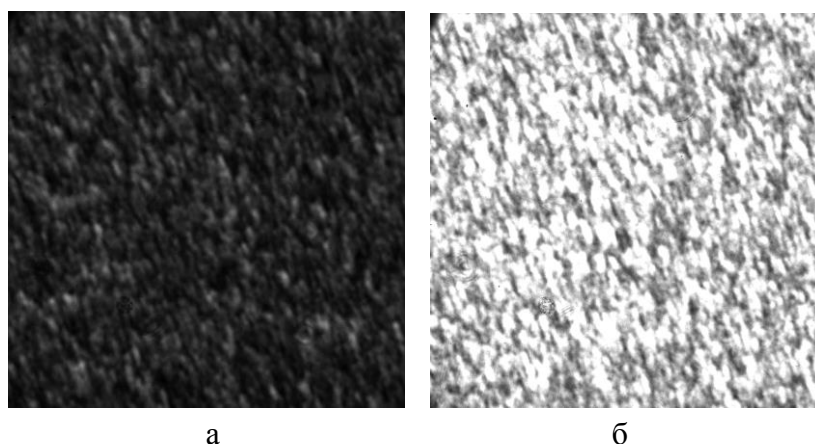


Рис. 7. Спекл-изображения поверхности нанопорошка алюминия до горения (а) и после окончания горения (б)

Для определения коэффициента корреляции цифровых спекл-изображений использовалось статистическое выражение для определения корреляции двумерных массивов:

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

где $\bar{f}$ – средняя интенсивность предшествующего спекл-изображения; $f(x_{ij}, y_{ij})$ – интенсивность пикселей предшествующего спекл-изображения на положении x_{ij}, y_{ij} ; $\bar{g}$ – средняя интенсивность текущего спекл-изображения; $g(x_{ij}, y_{ij})$ – интенсивность пикселей текущего спекл-изображения на положении x_{ij}, y_{ij} .

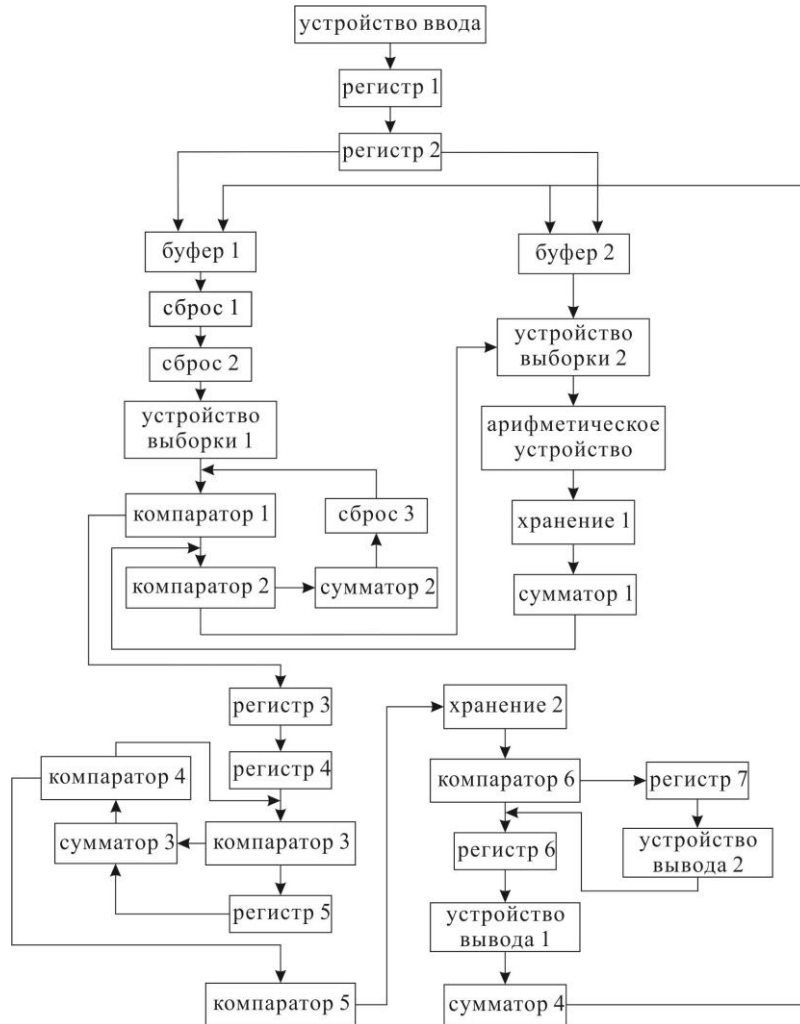


Рис. 8. Структурная схема обработки спекл-изображений

Выражение (1) позволяет определить сходство лазерных спекл-изображений по рассчитанным коэффициентам корреляции. Структурная схема обработки спекл-изображений показана на рис. 8 и реализована в среде программирования Matlab.

Полученные с помощью экспериментальной схемы спекл-изображения использовались для расчета коэффициента корреляции по определенному размеру области (окна) в изображении. В работе был определен оптимальный для расчета размер окна, который составил 300×300 пикселей.

Для верификации метода корреляции цифровых спекл-изображений применялась комплексная схема, комбинирующая три различных метода визуализации, которые дополняют друг друга. Такой подход позволяет одновременно проводить качественную и количественную оценку процесса горения, а также верифицировать используемые методы по отношению друг к другу. На рисунке 9 представлена комплексная схема лазерной визуализации, которая описывается в пятом разделе второй главы.

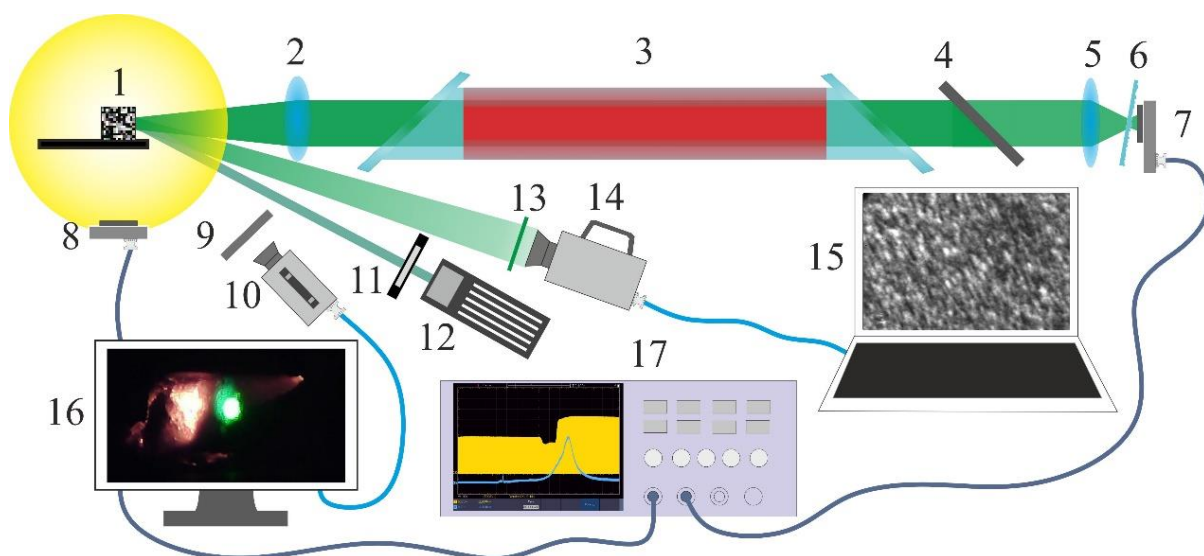


Рис. 9 . Экспериментальная схема: 1 – нанопорошок алюминия; 2, 5 – линзы; 3 – усилитель яркости; 4 – нейтральный фильтр; 6 – диффузор; 7, 8 – фотодиоды; 9 – нейтральный фильтр; 10 – USB-камера; 11 – оптический затвор; 12 – твердотельный лазер; 13 – узкополосный фильтр; 14 – скоростная камера с объективом; 15, 16 – ПК; 17 – осциллограф

В третьей главе приводятся результаты исследования характеристик усилителя яркости и результаты использования различных схем для наблюдения процесса горения нанопорошков металлов. Представлены полученные изображения, временные параметры для определения процессов горения нанопорошков и выводы по результатам наблюдения процессов горения.

Исследование радиального распределения усиления активной среды усилителя яркости проводилось с целью выявления влияния условий работы усилителя яркости и мощности накачки на профиль усиления и интенсивность пучка излучения и поиска оптимальных режимов визуализации. Результаты исследования представлены в первом разделе главы. Влияние температуры контейнеров с бромидом меди (концентрации паров рабочего вещества) на профиль двухпроходowego излучения ГРТ диаметром 5 см и длиной активной

области 90 см представлено на рис. 10, а. На рис. 10, б показаны результаты исследования влияния мощности накачки на профиль двухпроходowego излучения. Результаты демонстрируют, что с повышением температуры контейнеров интенсивность излучения увеличивается, в то время как диаметр пучка уменьшается. При увеличении мощности накачки яркость в центре пучка уменьшается, при этом пучок расширяется.

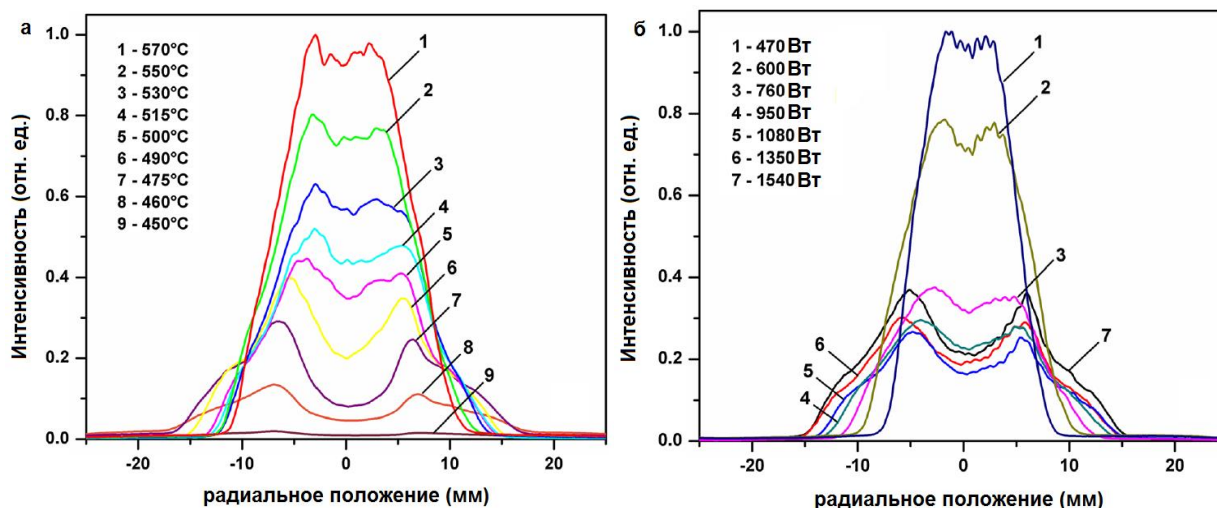


Рис. 10. Профиль излучения при различной температуре контейнеров с бромидом меди (а) и мощности накачки (б) без добавки НВг. ГРТ диаметром 5 см, длиной активной области 90 см

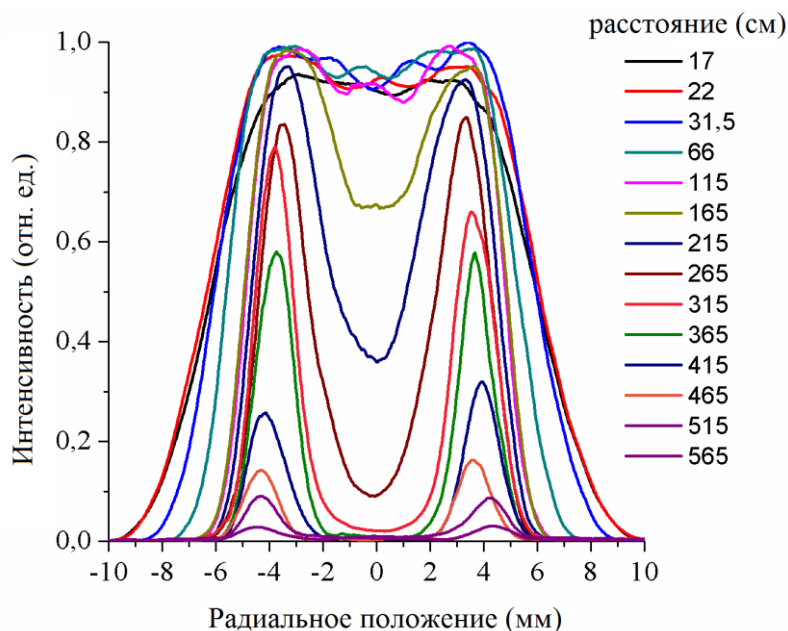


Рис. 11. Зависимость профиля двухпроходowego излучения от расстояния между зеркалом и ГРТ. ГРТ диаметром 2,5 см, длиной активной области 40 см

Исследование пространственно-временного распределения усиления проводилось с использованием зеркала, расположенного на оси излучения, при изменении расстояния между зеркалом и ГРТ. Соответствующее изменение профиля двухпроходowego усиления показано на рис. 11 для ГРТ диаметром 2,5 см

и длиной активной области 40 см. Результаты демонстрируют, что профиль имеет плоскую вершину в первые 7–10 нс импульса генерации, затем профиль становится кольцеобразным.

Во втором разделе третьей главы представлены результаты скоростной визуализации в собственном свете процессов горения различных нанопорошков в воздухе. Исследовались следующие нанопорошки металлов и смесей: нанопорошок алюминия, нанопорошок железа, смеси нанопорошка алюминия с микропорошком алюминия и нанопорошком железа, термитные смеси. Впервые оптическими методами исследовался нанопорошок алюминия, облученный СВЧ и рентгеновским излучением.

Инициирование горения нанопорошков осуществлялось с использованием фокусированного лазерного излучения или открытого огня (газовая горелка, спичка). На рис. 12 показаны результаты скоростной визуализации в собственном свете процессов горения нанопорошков алюминия при инициировании лазерным излучением в центре и на краю образца. При наблюдении в собственном свете визуально по интенсивности свечения могут быть различены возникновение горения, распространение фронта горения, остывание образца. Скоростная визуализация в собственном свете дает возможность качественно оценить характер горения и протекание различных стадий процесса.

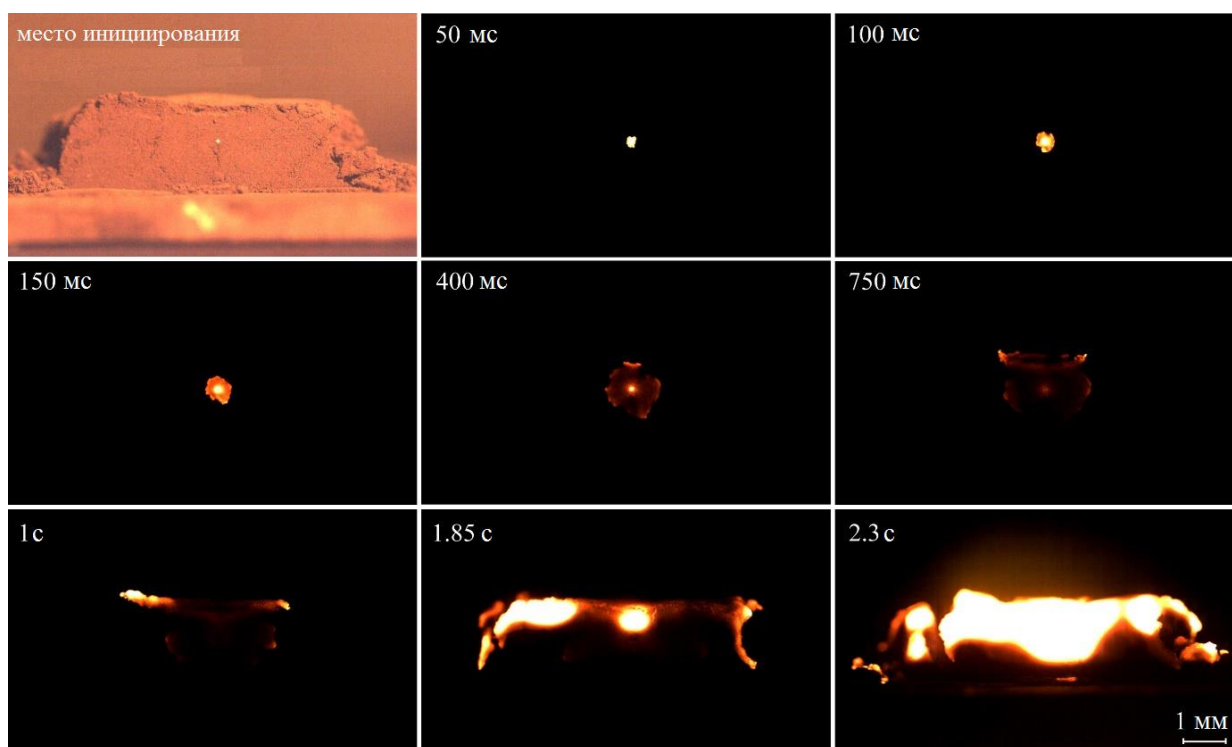


Рис. 12. Скоростная визуализация горения нанопорошка алюминия в собственном свете при лазерном инициировании с использованием цветной камеры Fastec HiSpec 1

В третьей части главы приведены результаты наблюдения процесса горения различных нанопорошков с лазерной подсветкой. На рис. 13 представлены результаты визуализации смеси порошков $\text{наноAl} + \text{наноFe}$. Инициирование

осуществлялось открытым огнем, для подсветки использовался твердотельный лазер с длиной волны 532 нм. Применение интерференционного фильтра 532 ± 5 нм позволило существенно подавить фоновую засветку. Полное ее подавление не представляется возможным с применением лазерной подсветки, т. к. требует применения мощного лазера, что оказывает влияние на процесс горения, вплоть до неконтролируемого воспламенения.

В четвертой части третьей главы представлены результаты исследования процесса горения нанопорошков металлов и смесей с использованием лазерного монитора. Для проведения исследования использовались две схемы лазерного монитора: традиционная схема с короткофокусным объективом (рис. 3) для получения максимального увеличения и зеркальная схема формирования изображения с длинным фокусным расстоянием – 50 см (рис. 4). В дополнение к скоростной видеорегистрации процесса горения, регистрировались интенсивность усиленного отраженного от образца света и интенсивность собственного свечения горящего образца с использованием фотодиодов.

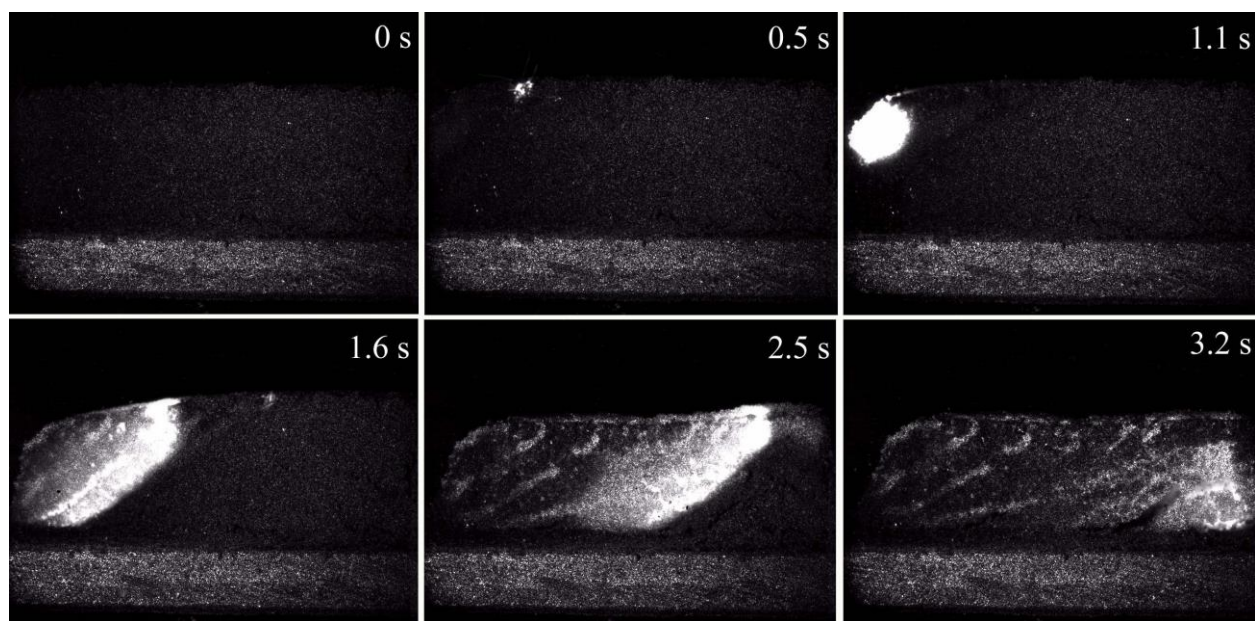


Рис. 13. Скоростная визуализация горения смеси порошков $\text{nanoAl} + \text{ACD-6M} + \text{nanoFe}$ в воздухе с использованием 532-нм лазерной подсветки и камеры Photron Fastcam SA1

Обнаружено, что изменение поверхности горящего порошка сопровождается изменением яркости усиленного изображения. На рис. 14 представлены изображения смеси порошков $\text{nanoAl} + \text{ACD-6M} + \text{nanoFe}$, полученные в лазерный монитор в процессе горения. Применение лазерного монитора позволило полностью отстроиться от фоновой засветки и наблюдать изменение поверхности на длине волны усиления усилителя яркости. На изображениях хорошо видны изменения поверхности при возникновении первой и второй волн горения, возможно определить направление и скорость распространения волн горения.

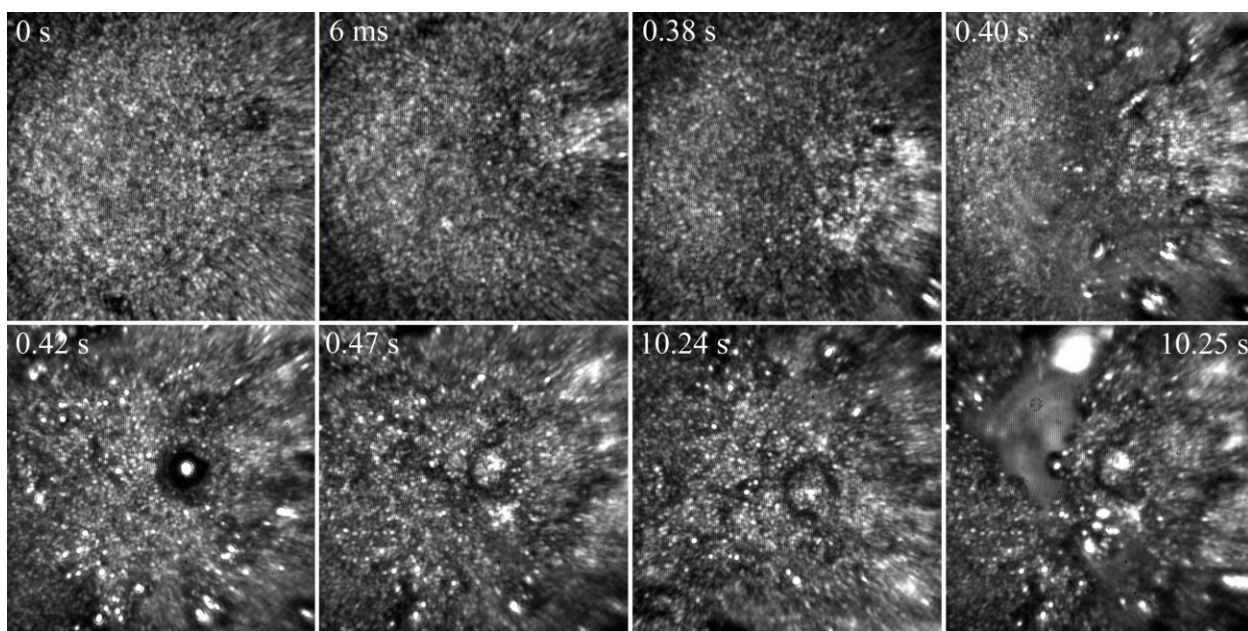


Рис. 14. Скоростная визуализация горения смеси порошков $\text{nanoAl} + \text{ACD-6M} + \text{nanoFe}$ с использованием лазерного монитора и монохромной камеры Photron Fastcam SA1.

Первое изображение соответствует моменту начала инициирования

На рис. 15 представлены осциллограммы сигналов, зарегистрированных фотодиодами на схеме на рис. 3. В частности, сигнал 1 соответствует средней яркости изображений, а сигнал 3 – средней яркости широкополосного излучения образца. В данной диссертационной работе предлагается сигналы средней яркости сигнала усилителя яркости использовать для контроля в режиме реального времени отраженного от поверхности горящего образца сигнала, который отслеживает изменение поверхности образца.

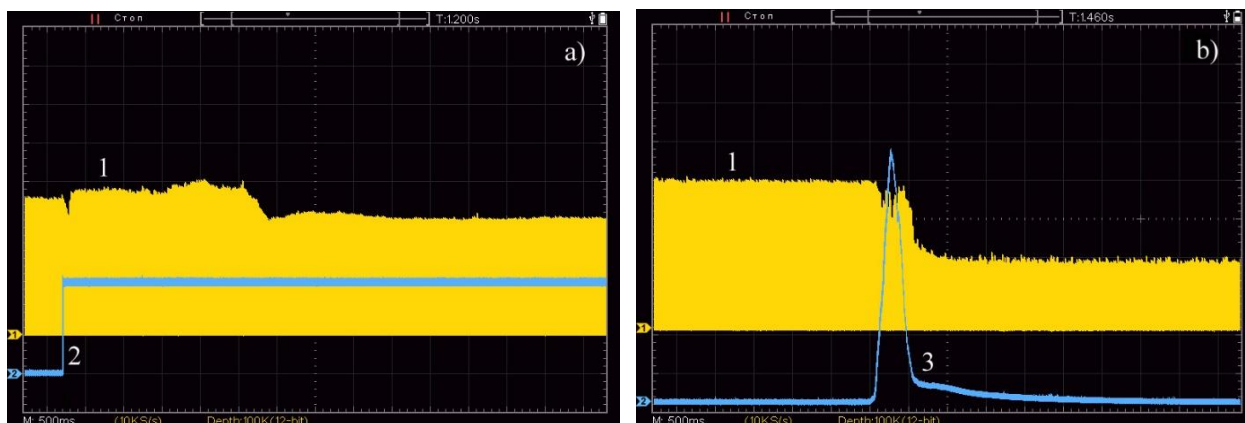


Рис. 15. Осциллограммы средней яркости, зарегистрированные фотодиодами (Thorlabs DET10A/M): 1 – интенсивность выходного сигнала усилителя яркости; 2 – излучение инициирования; 3 – интенсивность собственного свечения нанопорошка в процессе горения для nanoAl (а) и смеси $\text{Al-Fe}_2\text{O}_3$ (б)

С использованием лазерного монитора на рис. 4 наблюдалось горение различных порошковых смесей. Горение смеси $\text{nanoAl} + \text{nanoFe}$ происходит

практически так же равномерно, как и горение наноAl , за исключением начальной стадии. В начале происходит вспышка. Смеси нанопорошков с крупнодисперсными порошками $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{наноFe}$ и $\text{наноAl} + \text{АСД-6М} + \text{микроFe}$ горят неравномерно, меняется локализация, в некоторых случаях наблюдается незначительный разлет продуктов сгорания. Применение дистанционного лазерного монитора позволило оценить скорость распространения волны горения и исследовать макроскопические изменения поверхности образца, такие как появление трещин или впадин, а также однородность изменений поверхности.

Примером объекта, горение которого сопровождается факелом и интенсивным разлетом продуктов сгорания, является твердое топливо на основе микронного порошка алюминия АСД-6М. С использованием дистанционного лазерного монитора наблюдался образец, приготовленный в форме цилиндра диаметром 8 мм и высотой 12 мм. Образец размещался горизонтально и закреплялся с помощью сеточного каркаса, в центральной части которого был оставлен зазор для наблюдения. Горение инициировалось газовой горелкой и сопровождалось интенсивной фоновой засветкой, факелом и разлетом продуктов сгорания, который достигал 20 см. На рис. 16, а показан процесс горения в собственном свете.

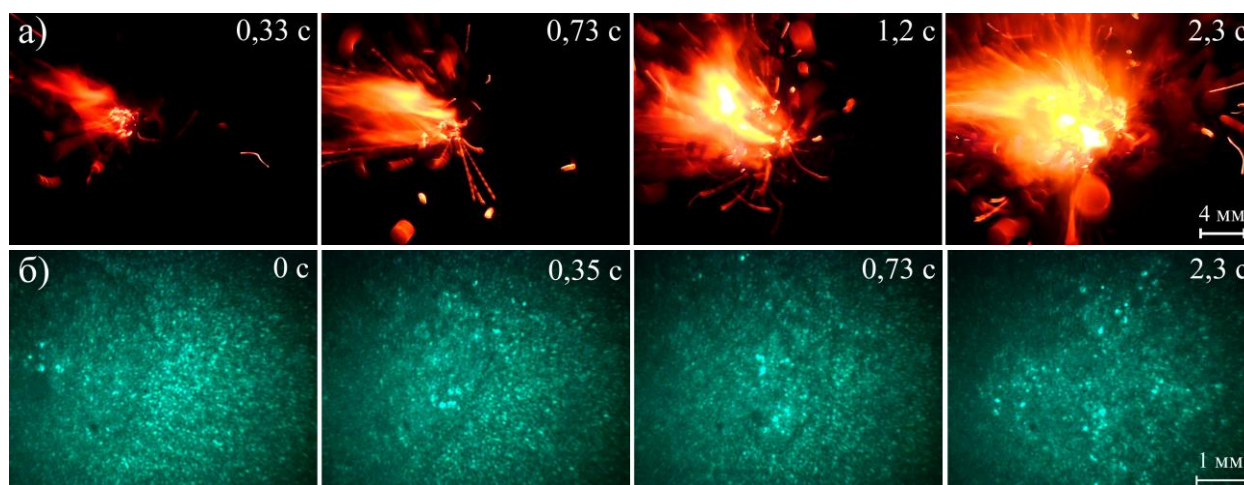


Рис. 16. Скоростная визуализация горения твердого топлива на основе микropорошка алюминия АСД-6М в собственном свечении (а) и с использованием лазерного монитора для дистанционного наблюдения (б) и цветной камеры Phantom Miro C100

Очевидно, что наблюдать поверхность горения, используя традиционный лазерный монитор с коротким фокусным расстоянием, без риска повреждения объектива невозможно. Применение дистанционного лазерного монитора позволяет оценить скорость и характер процесса горения. В частности, фронт горения для образца АСД-6М движется равномерно со средней скоростью 1,4 мм/с. За фронтом образуется факел. В собственном свете поверхность образца не видна. Посредством лазерного монитора на поверхности видны турбулентность из

мерцающих пятен (продуктов сгорания) и граница раздела факела и основной части образца.

В четвертой главе представлены результаты исследования динамики процессов с применением метода корреляции цифровых спекл-изображений.

В первом разделе главы рассмотрены вопросы оптимизации параметров обработки лазерных спекл-изображений и влияние источника излучения на точность измерений.

Во втором разделе главы приводятся результаты исследования динамики лазерных спеклов при горении нанопорошков металлов в воздухе. Для анализа динамики лазерных спеклов использовался коэффициент корреляции цифровых спекл-изображений. На рис. 17 представлены временные зависимости коэффициента корреляции в процессе горения нанопорошка алюминия в воздухе, а также показаны средняя яркость спекл-изображений и средняя яркость изображений лазерного монитора, полученные с использованием схемы, отображенной на рис. 9.

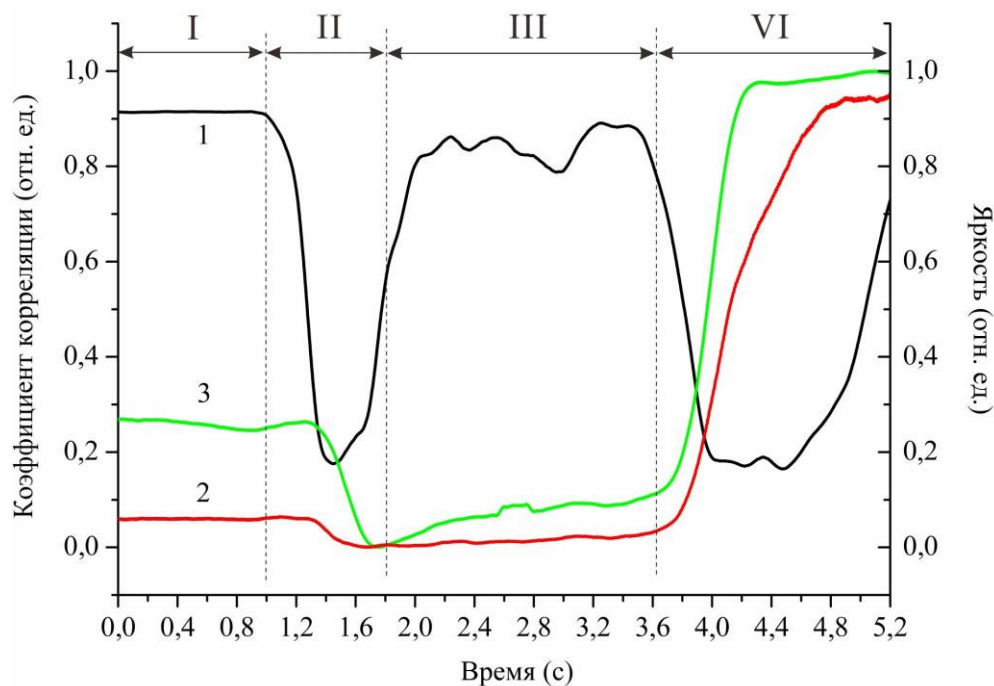


Рис. 17. Изменение коэффициента корреляции (1), средней яркости спекл-изображений (2) и средней яркости изображений лазерного монитора (3) в процессе горения нанопорошка алюминия в воздухе

Кривые средней яркости спекл-изображений и средней яркости изображений лазерного монитора дают нам одинаковую информацию о временной эволюции поверхности, поскольку оба параметра связаны с изменением отражательной способности поверхности образца. При этом средняя яркость изображений лазерного монитора изменяется значительно по сравнению со средней яркостью спекл-изображений.

Метод корреляции цифровых спекл-изображений, в отличие от лазерного мониторинга и анализа яркости спекл-изображений, регистрирует время, когда поверхность только начинает двигаться под воздействием температуры. Сочетание данного метода с анализом яркости спекл-изображений обеспечивает более точную оценку временных характеристик горения нанопорошка или смеси.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Разработан аппаратно-программный комплекс на основе различных лазерных методов, который позволяет оценивать объективные параметры процессов, на основе которых может быть разработана оптико-физическая модель динамических процессов для сжигания высокоэнергетических материалов.
2. Использование лазерного монитора на парах бромида меди позволило регистрировать изменения и определять характеристики поверхности образцов нанопорошков металлов во время горения с высоким временным (1 мс) и пространственным (5 мкм) разрешением, несмотря на интенсивную фоновую засветку.
3. Применение фотодиодов для регистрации интенсивности выходного сигнала усилителя яркости позволило отслеживать изменение отражения поверхности и количественно характеризовать процесс горения.
4. Разработана схема формирования изображения на основе зеркальной оптики, которая позволила реализовать мониторинг высокотемпературного горения на расстоянии 50 см от оптической схемы.
5. Использование двух схем лазерного монитора с коротким и длинным фокусным расстоянием позволило наблюдать динамику процесса горения как с микрометровым, так и с субмиллиметровым пространственным разрешением.
6. Впервые применен метод корреляции цифровых спекл-изображений для исследования временных параметров горения нанопорошков металлов.
7. Применена внешняя лазерная подсветка для визуализации горения смесей на основе нанопорошка алюминия, которая в совокупности со скоростной видеорегистрацией позволила оценить поведение и характеристики горения нанопорошков и смесей.
8. Для ГРТ большого (диаметр 5 см, длина 90 см) и малого (диаметр 2,5 см, длина 50 см) активного объема наиболее равномерное распределение усиления получено при средней мощности излучения 40–60 % от максимального значения. Для этого режима работы температура контейнеров с бромидом меди составила 515–530 °С без добавки HBr (для обеих ГРТ) и 475–500 °С с добавкой HBr (для ГРТ диаметром 5 см).
9. Увеличение концентрации паров бромида меди приводило к сужению профиля усиления активной среды и увеличению усиления в осевой области ГРТ. Этот эффект имел место как с добавкой HBr, так и без нее.
10. Усиление активной среды на парах бромида меди изменялось во время импульса генерации. Для ГРТ диаметром 5 см и длиной 90 см в течение

первых 7–12 нс без HBr и до 18 нс с добавкой HBr излучение имело распределение, близкое к гауссовскому. К концу импульса генерации профиль становился кольцевым. Аналогичное изменение профиля усиления наблюдалось в ГРТ диаметром 2,5 см.

В приложении 1 представлен акт использования результатов работы.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Gubarev F. 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.
5. 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, № 2. – Art no. 2.
6. Investigation of extracting information from vibrating objects by digital speckle correlation / A.I. Bloshkina, **L. Li**, F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk, 2016. – P. 637–641.
7. Gubarev F.A. A mirror based scheme of a laser projection microscope / F.A. Gubarev, **L. Li**, M.S. Klenovskii // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124, № 1. – Art no. 012016.
8. **Ли Линь**, Губарев Ф.А., Кленовский М.С. Исследование профиля излучения лазерного монитора на парах бромида меди / **Линь Ли**, Ф.А. Губарев, М.С. Кленовский // Труды XXI Международной научной конференции «Современные техника и технологии». Секция 2: Электронные устройства контроля и диагностики. – Томск, 2016. – С. 264–266.
9. **Ли Л.** Исследование влияния характеристик источника излучения на точность метода цифровой корреляции спекл-изображений / **Л. Ли**, Ф.А. Губарев // Труды VII Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск, 2016. – С. 238.
10. **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.

11. 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. 122, № 11. – Art no. 284.
12. Copper bromide laser monitor for combustion processes visualization / F.A. Gubarev, A.V. Mostovshchikov, M.S. Klenovskii, A.P. Il'in, **L. Li** // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Shanghai. – 2016. – № 7735091. – P. 2666–2670.
13. **Ли Л.** Анализ динамики прозрачности жидкой среды методом цифровой корреляции спекл-изображений / **Л. Ли**, А.И. Блошкина, Ф.А. Губарев // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2017. – Т. 5, № 2. – С. 1–5.
14. **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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Оценка свертываемости плазмы крови методом корреляции лазерных спекл-изображений / **Л. Ли**, Ю.Д. Сытник, Ф.А. Губарев, Я.С. Пеккер // *Медицинская техника*. – 2018. – № 3. – С. 23–25.
19. Monitoring of Nanopowder Combustion Ignited by Laser Radiation / **L. Li**, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A. Smirnov, F.A. Gubarev // *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. – Toyama, 2018. – P. 311–316.
20. Application of Laser-Speckle Correlation Method for Blood Coagulation Estimation / **L. Li**, I.D. Sytnik, Y.S. Pekker, F.A. Gubarev // *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. – Toyama, 2018. – P. 320–323.
21. 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.
22. Optical System with Brightness Amplification for Monitoring the Combustion of Aluminium-Based Nanopowders / **L. Li**, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A. Smirnov, F.A. Gubarev // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, – 2019 (early access).

23. 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.
24. 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. – № 2018124600 ; заявил. 06.07.18 ; опубл. 16.04.19, Бюл. № 11 . – 2 с.
25. 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 . – 2 с.
26. 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 . – 2 с.
27. 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.

