

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Ломаева Михаила Ивановича
на диссертационную работу Губарева Федора Александровича
«Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения
высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов в режиме
реального времени»
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по
специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа Губарева Федора Александровича посвящена разработке систем визуализации поверхности горения нанопорошков металлов, термитных смесей на их основе и модельных высокоэнергетических материалов во время лазерного инициирования и высокотемпературного горения и практическому использованию разработанных лабораторных установок для исследования поверхности данных материалов в режиме реального времени. Сжигание нанопорошков, обладающих высокой теплотой сгорания, широко применяется в научных исследованиях и практических применениях. Тема диссертации, несомненно, актуальна, как с научной, так и с практической точек зрения.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Автором на высоком научном уровне используются различные подходы и методы обоснования полученных экспериментальных данных, выводов и рекомендаций. В диссертационной работе анализируются конкретные технические решения и достижения других исследовательских групп при разработке методов визуализации процессов горения на основе лазерных мониторов. Список использованной литературы содержит 389 наименований. Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на результаты многочисленных экспериментов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые при использовании лазерного монитора на парах бромида меди:
 - осуществлена визуализация процессов инициирования и горения нанопорошков металлов, термитных смесей и модельной топливной смеси в воздухе;
 - продемонстрирована возможность исследования свойств поверхности горящих образцов в режиме реального времени;
 - установлено, что агломерированные продукты сгорания нанопорошка алюминия образуются на второй стадии горения.

2. Показана возможность работы усилителей яркости с малой мощностью сверхизлучения в трубках с диаметром 1,5–3 см с использованием газоразрядных трубок на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров, что необходимо для исследования легковоспламеняющихся высокоэнергетических материалов.
3. Установлено, что количественную оценку временных параметров процессов горения в режиме реального времени можно провести на основе измерений изменения яркости изображений лазерного монитора, вызванного изменением отражательной способности поверхности нанопорошка металла во время горения.
4. Продемонстрировано, 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.
5. 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.
6. Разработана экспериментальная методика для определения количества и продолжительности стадий горения, а также скорости горения нанопорошков металлов на основе метода лазерной спекл-корреляции.

Достоверность полученных результатов подтверждается их публикацией в рецензируемых журналах, представлением на многочисленных научных конференциях, а также воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных различными методами и средствами. Результаты диссертации опубликованы в 82 работах, из них 32 - статьи в журналах, индексируемых Scopus или Web of Science, 18 - статьи в рецензируемых российских журналах из списка ВАК, 19 - статьи в сборниках трудов конференций. Получены 9 патентов РФ и 2 свидетельства на регистрацию программы для ЭВМ. По теме работы опубликованы 2 монографии.

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 изменении поверхности образца во время горения до проведения постобработки изображений, что актуально для оптимизации эксперимента.
3. Визуализация поверхности тонких слоев нанопорошков металлов с использованием лазерного монитора позволяет наблюдать *in situ* неоднородность распространения горения по поверхности образца и образование продуктов горения и участков с частичным прогоранием.
4. Показана возможность реализации двухканального источника накачки усилителей яркости на парах бромидов меди на основе одного импульсного преобразователя и обеспечения импульсного заряда двух накопительных емкостей величиной до 1000 пФ до напряжения 6,2 кВ при стабильной работе двух газоразрядных трубок малого и среднего активного объема, как в составе двухканального, так и бистатического лазерных мониторов.
5. Совместное использование лазерного мониторинга и лазерной подсветки в составе одного диагностического комплекса позволяет исследовать неоднородности процесса горения нанопорошков металлов и ВЭМ на их основе.
6. Двухканальный лазерный монитор дает возможность наблюдения в двух областях образца одновременно или в одной области с различным увеличением и пространственным разрешением.
7. Продемонстрирована эффективность использования метода лазерной спекл-корреляции для дистанционного исследования изменений поверхности объекта, экранированной светящимся слоем.
8. Предложенная аппаратно-программная реализация метода лазерной спекл-корреляции применима для полевых исследований и технологического контроля высокотемпературных процессов.

Теоретическая значимость работы:

1. 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.

2. 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 °C) при расстояниях до объекта наблюдения до 4 м.
3. Установлена закономерная связь контраста изображений поверхности нанопорошков металлов в бистатическом лазерном мониторе с интенсивностью независимой подсветки до 9,6 мВт/мм².
4. Показано, что дальность наблюдения с использованием лазерного монитора определяется размерами агломератов, образующихся в процессе горения.
5. Установлены закономерности изменения коэффициента отражения поверхности на различных стадиях горения нанопорошка алюминия, смесей порошков наноAl+микроAl и наноAl+Fe₂O₃.
6. 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.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитированной литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 383 страницы, включает 222 рисунка, 18 таблиц, 389 библиографических наименований. Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследований.

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.

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. Рассматривается диапазон режимов, в которых могут работать данные активные среды, в том числе режимы с пониженным энерговкладом в разряд, режим цугов, режимы управления энергией в импульсе генерации, режим длинного импульса.

В третьей главе диссертации рассмотрено распределение усиления в активном элементе на парах бромида меди и влияние 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.

В четвертой главе приведены описание 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.

В пятой главе диссертации представлены результаты исследования горения высоко энергетических материалов 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.

В шестой главе диссертации описывается применение метода лазерной спекл-корреляции для дистанционного исследования изменений поверхности нанопорошка алюминия во время горения в воздухе.

В заключении перечислены основные результаты работы.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. При анализе использовавшихся в работе схем накачки (стр. 70) схема с удвоением напряжения на основе сосредоточенных параметров названа схемой Блюмляйна вместо правильного названия «схема Фитча».
2. При описании протекания тока в газоразрядной трубке (стр. 78) используется выражение «фантомный ток» вместо общепринятых выражений «ток смещения» или «емкостный ток».
3. На рис. 2.5 приведены схемы накачки газоразрядной трубки емкостным разрядом и их эквивалентные электрические схемы, на которых не указана емкость межэлектродного промежутка, принципиально необходимая на начальном этапе протекания тока в трубке.

4. На рис. 4.50а, 4.50б приведены без необходимого на мой взгляд комментария принципиально отличающиеся по своему характеру зависимости средней яркости изображений лазерного монитора от плотности мощности лазерной засветки для медной сетки и нанопорошка алюминия.
5. На стр. 207 при описании формулы (5.1) вместо выражения «Величина интенсивности равновесного поля излучения» следует использовать выражение «Спектральное распределение объемной плотности равновесного излучения». При описании формулы (5.2) вместо выражения «Выражение (5.2) описывает спектральную плотность мощности излучения с единицы объема» следует использовать «Выражение (5.2) описывает энергию излучения в спектральном диапазоне от ν до $\nu + \Delta\nu$ в объеме V ».
6. При расчете энергии фоновой засветки по формуле (5.2) необходимо доказать, что излучение плазмы, образующейся при сгорании высокоэнергетического материала, является тепловым, поскольку в спектре пламени может присутствовать, например, широкополосное рекомбинационное излучение.
7. Автору следует пояснить, почему для анализа влияния фоновой засветки не выбрана энергия излучения с площадки S_1 , соответствующая телесному углу, под которым виден круг диаметром d на поверхности линзы (рис. 5.2).
8. В тексте диссертации встречаются опiski, например, стр. 139 «интерференционный светофильтр производства с максимумом пропускания»; стр. 152 «Угловое разрешение линзы с фокусным расстоянием F » вместо правильного «Угловое разрешение линзы с апертурой D ».

Указанные замечания не затрагивают основных выводов работы и положений, выносимых на защиту, не снижают общей положительной оценки диссертации. Диссертационная работа Губарева Федора Александровича выполнена на высоком научном уровне. Содержание диссертации правильно отражено в автореферате. Особенно следует отметить достижения в области разработки методик и оборудования для исследования высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей на основе методов скоростной видеосъемки с применением лазерного монитора и лазерной подсветки. Диссертация представляет собой систематическое законченное научное исследование в области создания приборов и разработки методов экспериментальной физики. Совокупность результатов и положений, содержащихся в диссертации, позволяют квалифицировать ее как значительное достижение в указанной области.

Диссертационная работа Губарева Федора Александровича полностью соответствует Паспорту специальности и требованиям Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, п. 8, п. 9, п. 10. Ее автор Губарев Ф.А. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Даю согласие на обработку персональных данных.

Официальный оппонент,

Ломаев Михаил Иванович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика, ведущий научный сотрудник лаборатории оптических излучений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Тел.: +7(3822) 49-16-85

E-mail: Lomaev@loi.hcei.tsc.ru

М.И. Ломаев

634055, Россия, г. Томск, проспект Академический, 2/3, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

Тел. (3822) 491-544

E-mail: contact@hcei.tsc.ru

<http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/address/address.html>

Подпись д.ф.-м.н. М.И. Ломаева заверяю

Ученый секретарь ИСЭ СО РАН,

Кандидат технических наук

14 декабря 2021

О.В. Крысина