

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Губарева Федора Александровича
«Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения
высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков», представленную на
соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 –
Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность исследования

Значимой, но в настоящее время малорешённой проблемой является визуализация процессов горения *in situ*. Поскольку при этом все составляющие реагирования могут быть очень быстрыми, высокотемпературными и, соответственно, сильно «засвеченными», в обычных условиях съёмки в большинстве своём не удаётся провести исследование физических явлений, происходящих в материалах. В свою очередь, определение закономерностей горения, визуализация поверхности реагирующего вещества даёт возможность изучения механизмов протекания различных взаимодействий, обуславливающих каждую определённую составляющую процесса.

В частности, исследование и использование высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов, термитных смесей для различных сфер применения весьма затруднительно без тщательного изучения их физико-химических свойств и механизмов взаимодействия. На процессах горения наноразмерных систем основан ряд методов синтеза материалов и взрывного получения энергии. С использованием горения возможна реализация нагрева поверхности в локальной области, а также создание различных оптических и акустических эффектов.

Понятно, что для достижения высокой эффективности исследований и применения данных материалов необходимо использование высокоточного, прецизионного оборудования, основанного на современных принципах и передовых методиках. В особой степени это относится к изучению высокотемпературных быстропротекающих процессов, поскольку последовательность превращений, их механизмы, формирование морфологии и структуры материала обуславливают конечные свойства продукта. Данные знания позволяют решить вопросы выбора той или иной технологии, параметров синтеза, качества и уровня различных воздействий на вещество, а также возможности получения материала с заранее заданными свойствами.

Большим препятствием к осуществлению исследования горения материалов различной природы является интенсивная фоновая засветка, которая не позволяет визуально фиксировать изменения вещества, в частности, его поверхности, в ходе процесса. На сегодняшний день данная проблема является нерешённой.

Решение задачи исследования превращений в конденсированном веществе требует разработки и практической реализации методов, в которых возможно *in situ* получение с высокой точностью информации о форме и скорости распространения фронта горения, морфологии поверхности, отражательной способности изучаемого объекта. В этой связи основным становится вопрос о регистрации короткоживущих состояний вещества. Другими словами, необходима разработка лабораторного метода и соответствующего аппаратного оформления для исследования поверхности горящих материалов в режиме реального времени.

Таким образом, выбранная Губаревым Ф.А. тема диссертационного исследования, посвященная вопросам визуализации поверхности горения нанопорошков металлов, термитных смесей на их основе и модельных высокоэнергетических материалов во время лазерного инициирования и высокотемпературного горения, является весьма актуальной.

Характеристика работы

В представленной диссертационной работе впервые показана возможность визуализации процесса инициирования и горения нанопорошков металлов, термитных и топливных смесей в воздухе лазерным монитором на парах бромида меди. Это позволяет исследовать изменение морфологии поверхности материалов в ходе горения *in situ* с временным разрешением до 0,8 мс.

В результате проведенных исследований с использованием лазерного монитора установлено, что в ходе горения наноразмерного порошка алюминия в атмосфере воздуха при прохождении первой волны процесса морфология поверхности образца практически не изменяется. На второй стадии горения фиксируется образование агломерированных продуктов реакции.

Для оптимизации изучения легковоспламеняющихся высокоэнергетических материалов предложены режимы функционирования усилителей яркости с малой мощностью сверхизлучения. С этой целью использованы газоразрядные трубки на парах бромида меди с диаметром 1,5 – 3 см, реализован независимый контроль температуры.

Показана возможность количественного определения временных характеристик процессов горения *in situ* путём фиксирования изменений отражательной способности поверхности изучаемого материала, которые, в свою очередь, обуславливают варьирование яркости изображений лазерного монитора в интервале $\pm 37\%$ от средней величины.

В ходе проведённых экспериментальных исследований установлено, что одного объектива достаточно для обеспечения фокусировки луча иницирующего лазера и пучка излучения лазерного монитора с одновременным высоким уровнем пространственного разрешения в ходе процесса визуализации лазерного инициирования тонких слоев наноразмерных порошков металлов.

В работе также определено, что за счет применения специальных формирующих оптических элементов, без изменения условий функционирования всей системы, происходит существенное выравнивание кольцевого профиля параллельного пучка усилителя яркости.

В результате проведённых исследований на основе метода лазерной спекл-корреляции разработан способ определения скорости горения наноразмерных порошков металлов, установлено количество и продолжительность стадий горения.

Значимость для науки

Все защищаемые автором диссертации положения являются новыми и имеют важное теоретическое значение, а именно:

- определено, что до 3000 К температура металла не влияет на качество изображения, получаемого с помощью лазерного монитора с активной средой на атомах меди, поскольку расчетный шум фоновой засветки в $10^4 - 10^5$ раз меньше энергии усилителя яркости;

- установлено, что для численного определения продолжительности стадий горения, их количестве, интервале между стадиями, а также динамике изменения поверхности можно использовать такие показатели, как усредненная яркость пикселей и коэффициент корреляции изображений лазерного монитора;

- показано, что при двухпроходном излучении усилителя яркости на газообразном CuBr параллельный пучок и излучение, сформированное лазерным монитором, в диапазоне температур паров бромида меди от 455 до 560 °С и расстояниях до объекта исследования в пределах 4 м имеют существенные отличия в радиальном распределении;

- для бистатического лазерного монитора проанализирована взаимосвязь и установлена закономерность зависимости контраста изображений поверхности наноразмерных порошков металлов с интенсивностью независимой подсветки мощностью до 9,6 мВт/мм²;

- экспериментально обнаружено, что размеры образующихся в процессе горения агломератов определяют расстояние, на котором можно проводить наблюдение объекта с помощью лазерного монитора;

- изучены и выявлены зависимости изменения коэффициента отражения поверхности на различных стадиях горения нанопорошка алюминия, смесей различных по размерам порошко: $\text{наноAl} + \text{микроAl}$ и $\text{наноAl} + \text{Fe}_2\text{O}_3$.

- с помощью достигнутого с помощью лазерного монитора уровня визуализации поверхности при горении термитных смесей составов $\text{TiO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$, $\text{ZrO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$ и $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{наноAl} + \text{C}$ обнаружено, что процесс протекает без образования жидкой фазы по механизму «твердое тело – газ».

Практическая значимость

Несомненным достоинством представленной диссертационной работы является большая практическая составляющая:

- на основе лазерных мониторов разработаны методики и лабораторные установки, на которых возможно изучение режимов и временных параметров горения смесей на основе наноразмерных порошков металлов с разрешением по времени до 0,8 мс и пространственным разрешением до 5 мкм, что защищено патентами РФ;

- реализована аппаратная обработка яркости изображений лазерного монитора с помощью быстродействующих фотодиодов, что позволяет проводить количественную оценку эволюции поверхности материала непосредственно во время горения; защищено патентом РФ на изобретение;

- с помощью разработанного лазерного монитора реализована возможность наблюдения в режиме реального времени особенностей распространения горения по поверхности тонких слоев нанопорошков металлов, образования и анализа продуктов горения, определения участков с частичным прогоранием;

- создан двухканальный источник накачки усилителей яркости на парах бромидам меди с использованием одного импульсного преобразователя, показавший высокую эффективность при исследовании высокотемпературных быстропротекающих процессов;

- экспериментально доказана возможность импульсного заряда двух накопительных ёмкостей менее 1000 пФ до значений напряжения 6,2 кВ в случае стабильной работы двух газоразрядных трубок малого и среднего активного объёма, находящихся в составе двухканального или бистатического лазерных мониторов;

- реализовано и опробовано совместное использование лазерного мониторинга и лазерной подсветки в едином диагностическом комплексе, что обеспечивает возможность изучения особенностей протекания процесса горения высокоэнергетичных материалов и на основе наноразмерных порошков металлов;

- на основе использования двухканального лазерного монитора создана методика наблюдения процесса горения одновременно в двух областях образца или в одной области с различными увеличением и пространственным разрешением;

- экспериментально реализована и доказана информативность метода лазерной спекл-корреляции для дистанционного изучения динамики изменения поверхности горящего материала в случае её экранирования фоновым излучением;

- разработаны аппаратура и программное обеспечение для использования метода лазерной спекл-корреляции в полевых условиях и с целью технологического контроля высокотемпературных процессов.

Рекомендации по использованию результатов работы

В результате проведённой работы предложенный метод скоростной видеосъемки с применением лазерного монитора и лазерной подсветки позволяет визуализировать и изучать быстротекущие высокотемпературные процессы, в частности, процессы горения термитных смесей на основе наноразмерных порошков металлов, изменения морфологии поверхности во время горения высокоэнергетических материалов, что позволяет рекомендовать его для использования в исследованиях в области физики горения и взрыва, для технологического контроля высокотемпературных процессов, а также для экспресс-диагностики в полевых условиях.

Замечания по диссертации

Основное замечание по существу проведенной научной работы: было бы полезно и весьма интересно обсудить в диссертации физические причины ряда наблюдаемых явлений. В частности:

- почему введение добавки НВг в активную среду CuVr-лазеров обеспечивает наиболее равномерный профиль излучения (с. 107, 114);

- почему «при исследовании динамических объектов, таких как горящие нанопорошки металлов, максимальная четкость изображений будет в моноимпульсном режиме» (с. 150);

- почему экспериментальные кривые яркости изображения от плотности мощности лазерной подсветки у медной сетки и наноразмерного алюминия описываются разными зависимостями (рисунок 4.50, с. 184);

- почему коэффициент отражения материалов больше после сгорания; почему у нанопорошков коэффициент отражения больше, чем у микронных материалов (таблица 4.3, с. 202)

- почему высокотемпературная стадия возникает в разных частях образцов различной крупности (с. 251);

- почему в результате сгорания материалы приобретают полосчатую расцветку;

- почему микронные порошки горят быстрее (с. 258).

Кроме того, требует физического обоснования выбор логарифмической функции в предложенной аналитической зависимости между контрастом изображения поверхности в бистатистическом лазерном мониторе с интенсивностью независимой подсветки в диапазоне малых значений мощности подсветки (с. 185, формула (4.6)).

Необходимо отметить отсутствие в тексте диссертации чётких рекомендаций по ограничениям и применению каждого из разработанных методов.

Перечисленные выше замечания носят скорее характер пожеланий для дальнейшей работы и не меняют высокой оценки диссертации Губарева Ф.А.

Заключение

Считаю, что работа Губарева Ф.А. выполнена на высоком теоретическом и экспериментальном уровне и представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение важной научной и практической задачи: визуализации поверхности горения нанопорошков металлов, термитных смесей на их основе и модельных высокоэнергетических материалов во время лазерного инициирования и высокотемпературного горения и создание лабораторных установок для исследования поверхности указанных материалов в режиме реального времени.

Автореферат полностью отражает содержание работы.

Работа многократно апробирована на научных конференциях, основные результаты исследований опубликованы в отечественных и зарубежных научных изданиях, защищены патентами. Печатные работы полно и адекватно отражают содержание диссертации.

Диссертация Губарева Ф.А. соответствует критериям, установленным в п. 8, п. 9 и п. 10 Порядка присуждения учёных степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а её автор, Губарев Федор Александрович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Согласна на обработку персональных данных.

Доцент кафедры Функциональных наносистем и
высокотемпературных материалов
НИТУ «МИСиС», д.т.н
119049 Москва, Ленинский пр-т, д.4.,
НИТУ «МИСиС», каф. ФНСиВТМ;
тел. (499) 237-22-26;
avrore@gmail.com

Дзидзигури Элла Леонтьевна

23.12.21

Подпись Дзидзигури Э.Л. заверяю

ПОДПИСЬ _____ ЗАВЕРЯЮ _____
Проректор по безопасности
и общим вопросам
НИТУ «МИСиС» _____ И.М. Исаев