

ОТЗЫВ

дополнительного члена диссертационного совета ДС.ТПУ.01 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессора ОЭИ ИШНКБ д.т.н. Солдатов А.И. на диссертационную работу Ли Линь «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 –
Приборы и методы экспериментальной физики

Высокотемпературное горения является быстропротекающим процессом, который сопровождается колебанием температуры в широких пределах и соответствующим колебанием яркости свечения. Эти особенности существенно затрудняют диагностику и контроль процесса горения, в частности, горения нано- и микropорошков алюминия в воздухе. Инструментарий, используемый в настоящее время для исследования нано- и микropорошков позволяет детально исследовать исходные и конечные продукты, а также проводить измерения скорости горения и наблюдать форму плазменного факела. Среди устройств, позволяющих осуществлять исследования горения в режиме реального времени наиболее распространёнными являются калориметрия, пирометрия, спектрометрия, использование термопар, применение синхротронного излучения, регистрация яркости свечения фотодиодами. При этом, перечисленные методы не позволяют наблюдать изменение поверхности объекта исследования. Наблюдение поверхности частично возможно с использованием скоростной видеорегистрации, однако высокие температуры горения и колебания температур во время горения накладывают серьезные ограничения на применимость метода скоростной видеосъемки.

Диссертационная работа Ли Линь посвящена решению **актуальной задачи** разработки оптических устройств визуализации поверхности нано- и микropорошков металлов и контроля изменения оптических свойств в процессе горения. Информация о характере протекания и изменения свойств является важной для оптимизации процесса горения и получения веществ с заданными свойствами. Оптические методы являются бесконтактными, могут обеспечить дистанционный контроль, и они не связаны с использованием ионизирующих воздействий.

Целью работы являлась разработка аппаратно-программного комплекса для наблюдения и измерения параметров высокотемпературного горения нано- и микropорошков металлов и их смесей в режиме реального времени.

В диссертационной работе разработан аппаратно-программный комплекс на

основе лазерного излучения и усиления яркости для экспериментальных исследований в области высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей, сочетающий в себе несколько методов визуализации и позволяющий модифицировать схемы визуализации в зависимости от объекта исследования и поставленных задач.

Научная новизна работы заключается в следующем:

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. Предложены 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 бромида 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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, и одного приложения, содержит 163 страниц текста, 95 рисунков, 4 таблицы и список литературы, включающий 162 источника.

Во **введении** дан анализ актуальности работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана научная новизна и практическая значимость результатов.

В **первой главе** описаны основные характеристики горения порошков металлов, в том числе, нанодисперсного порошка алюминия и смеси нано- и микродисперсного порошков. Рассматриваются основные методы и средства исследований динамики процессов горения порошков. Показано, что оптические методы неразрушающего контроля имеют ряд преимуществ перед другими методами исследования, в том числе контактными.

Следует отметить, что работа Ли Линь проводилась не с нулевыми начальными условиями. Ей предшествовал значительный задел в области лазерного мониторинга, накопленный сотрудниками кафедры промышленной и медицинской электроники Томского политехнического университета и лаборатории квантовой электроники Института оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН). В частности, в работе использовались активные элементы усилителей

яркости на парах бромида меди, разработанные в ИОА СО РАН и метод покадровой регистрации, разработанный в ТПУ. В работах научного руководителя ранее показана возможность наблюдения процессов горения крупнодисперсных порошков с использованием лазерного монитора. Результаты этих работ отмечены в первой главе диссертации.

Показано, что существующие методы исследования высокотемпературного горения, в том числе известные лазерные методы, требуют доработки и совершенствования для применения в задачах исследования высокотемпературного горения нанопорошков и смесей.

Описанию применяемых методов и аппаратуры посвящена **вторая глава**. Отмечается необходимость синхронизации работы усилителя яркости и цифровой камеры для получения достоверной количественной информации при использовании лазерного монитора. Предложен метод количественной оценки процесса горения, основанный на анализе яркости изображений лазерного монитора, на который получены патенты РФ на изобретения.

Предлагается использовать анализ спекл-изображений как метод дистанционного неразрушающего контроля. По результатам исследования делаются выводы о возможностях и преимуществах использования рассмотренных методов и оборудования для исследования и контроля процессов горения нанопорошков. В отличие от метода контроля поверхности на основе анализа средней яркости изображений, метод корреляции цифровых спекл-изображений позволяет оценивать не только изменение коэффициента отражения поверхности, но и механические колебания.

Для получения комплексной информации об объекте исследования, практических во всех экспериментах визуализация и контроль осуществляются несколькими способами, например, видеозапись в собственном свете, лазерный мониторинг и регистрация яркости свечения, или регистрация лазерных спеклов и средней яркости изображений

В **третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований дистанционного контроля горения нанопорошков металлов с использованием разработанных методов и средств на основе лазерного мониторинга, скоростной визуализации процессов горения в собственном свете и с использованием лазерной подсветки. Отмечается необходимость в разработке и использовании средств дистанционного мониторинга, в том числе с применением механических сканирующих устройств для обеспечения контроля поверхности образцов в разных частях в процессе распространения фронта горения.

В ходе работы показана возможность измерения скорости движения фронта

горения по поверхности образца, изучения морфологии поверхности, оптических свойств в процессе горения

В четвертой главе представлены результаты исследования динамики процессов горения с применением метода корреляции цифровых спекл-изображений. Данный метод интересен благодаря своей простоте реализации и возможности контроля временных параметров быстро протекающих процессов. Этот метод впервые применен диссертантом для исследования процесса высокотемпературного горения.

В заключении приведены основные результаты работы.

В целом, основные выводы по работе Ли Линь, сформулированные в автореферате и диссертации в разделах научная новизна, практическая ценность результатов работы и заключения достаточно хорошо подтверждены проведенными в работе исследованиями и полученными результатами.

Вместе с тем по диссертационной работе Ли Линь имеются следующие **замечания и вопросы:**

1. В разделе 2.2.4 автор указывает, что «Импульс SYNC IN формировался путем деления частоты работы усилителя яркости на 20. Для деления использовали цифровой счетчик с изменяемым коэффициентом счета». Следовало бы указать, на каких элементах выполнен делитель частоты? Каким образом осуществлялась защита цифровой схемы от помех, которые могут влиять на коэффициент счета?

2. В первом защищаем положении автор указывает, что «Неоднородность усиления в центре пучка, характерная для лазеров на парах металлов, может выравниваться в первые 7–10 нс ...». Однако как влияет неоднородность профиля коэффициента усиления на яркость изображений лазерного монитора, автор не исследовал

3. В работе были использованы три цифровые камеры с разным размером пикселя. Имеет ли размер пикселя цифровой камеры принципиальное значение при разработке лазерного монитора?

4. В работе приведены спекл-изображений (рис. 4.4), зарегистрированные при разном расстоянии между линзой и объектом. Следовало бы пояснить какой параметр лазерного пучка влияет на размер формируемых спеклов?

Изложенные выше замечания не снижают научной и практической значимости полученных в работе результатов. Работа хорошо апробирована в публикациях и докладах на конференциях. Опубликованы 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 6 статей в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 3 патента на изобретения, 1 свидетельство о регистрации программ для

ЭВМ, 12 статей в материалах конференций, индексируемых Scopus и Web of Science.

Считаю, что диссертационная работа «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в соответствии с требованиями Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (dis.tpu.ru).

Автор работы Ли Линь заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Профессор отделения электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета,
доктор технических наук,
г.Томск, пр.Ленина, 30,
учебный корпус №5, офис 202,
тел. +7(3822)606297, e-mail: asoldatof@tpu.ru

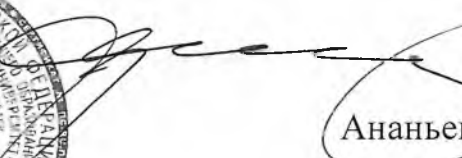
Солдатов Алексей Иванович

 Солдатов А.И.

«05» ноября 2019 г.

Подпись А.И.Солдатова удостоверяю.
Ученый секретарь НИ ТПУ




Ананьева О.А.