

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НРиИ

Национального исследовательского

Томского политехнического университета

Игорь Борисович Степанов

«24» июня 2019 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Диссертация «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения» выполнена в Исследовательской школе химических и биомедицинских технологий (до 2018 года на кафедре промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля) Национального исследовательского Томского политехнического университета.

В период подготовки диссертации соискатель **Ли Линь** обучался в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете».

В 2013 г. соискатель окончил программу двойного диплома Томского политехнического университета и Цзилинского университета по направлению 11.03.04 - Электроника и наноэлектроника и продолжил обучение в магистратуре Томского политехнического университета по направлению 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника. В 2015 г. защитил магистерскую диссертацию по теме «Исследование усилителей яркости на парах бромида меди».

Диплом об окончании аспирантуры федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» выдан в 2019 году.

Научный руководитель – Губарев Федор Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Диссертационная работа рассмотрена на расширенном научном семинаре Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий в присутствии приглашённых сотрудников отделения электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля, отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки, отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета», а также Института оптики атмосферы СО РАН.

Присутствовали:

1. Трусова М.Е., д.х.н., зам. директора по развитию ИШХБМТ;
2. Шаманин И.В., д.ф.-м.н., зав. отделением естественных наук ШБИП;
3. Слепченко Г.Б., д.х.н., ведущий научный сотрудник ИШХБМТ;
4. Солдатов А.И., д.т.н., профессор отделения электронной инженерии ИШНКБ;
5. Ильин А.П., д.ф.-м.н., профессор отделением естественных наук ШБИП;
6. Губарев Ф.А., к.ф.-м.н., доцент ИШХБМТ;
7. Ляпков А.А., к.х.н., доцент ИШХБМТ;
8. Новиков В.Т., к.х.н., доцент ИШХБМТ;
9. Тихонов Д.В., к.т.н., доцент отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ.
10. Арышева Г.В., к.т.н., доцент отделения электронной инженерии ИШНКБ;
11. Мостовщиков А.В., к.т.н., с.н.с. научно-исследовательской лаборатории СВЧ-технологии ИЯШТ;
12. Тригуб М.В., к.т.н., с.н.с. лаборатории квантовой электроники ИОА СО РАН.
13. Ли Линь, аспирант ИШХБМТ, соискатель.

Были заданы вопросы:

1. В чем преимущества вашего метода определения характеристик горения?
2. Каковы размеры области наблюдения?
3. Какие параметры лазерного монитора вы улучшили по сравнению с имеющимися системами?

4. За счет каких механизмов в активной среде лазера на парах бромида меди происходит выравнивание профиля излучения?
5. В каком диапазоне температур объекта исследования может работать предлагаемый аппаратно-программный комплекс? Какова его разрешающая способность?
6. Возможно ли определить толщину фронта горения с использованием предлагаемого комплекса?
7. Каковы параметры лазер подсветки, и как они влияют на качество изображения?
8. В каком диапазоне измерялась скорость горения, и от чего зависит точность ее определения?
9. Как влияет плазменный факел и разлетающиеся продукты горения на качество изображения?

По итогам обсуждения принято следующее заключение: Диссертационная работа является самостоятельно выполненной законченной научно-исследовательской работой.

1. **Актуальность темы исследования** связана с развитием порошковых технологий и возрастающей потребностью в новых методиках диагностики и контроля процессов синтеза материалов на основе нанопорошков и микропорошков металлов, трудностью исследования динамики высокотемпературных процессов, сопровождающихся интенсивной фоновой засветкой и разлетом продуктов сгорания, высокой скоростью процессов горения и взрыва, визуализация которых затруднена или невозможна путем регистрации традиционными методами визуализации, потребностью в повышении информативности исследования горения порошковых материалов за счет разработки новых и усовершенствования существующих методов исследования. **Цель работы:** разработка аппаратно-программного комплекса для наблюдения и измерения параметров высокотемпературного горения нано- и микропорошков металлов и их смесей в режиме реального времени.

2. **Соответствие работы Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации** (Указ Президента РФ от 01.12.2016 г. № 642):

– переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта;

Соответствие работы приоритету развития науки и техники Российской Федерации (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899):

- перспективные виды вооружения, военной и специальной техники;
- индустрия наносистем.

Соответствие работы критическим технологиям (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899):

- базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники;
- технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов;
- технологии получения и обработки функциональных наноматериалов;
- технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику.

Значительная часть диссертации выполнена в рамках Государственного задания «Наука» («Апробация идей»), проект № 11.1928.2017/4.6 «Технология модифицирования микро- и нанопорошков металлов высокоэнергетичным СВЧ-излучением с импульсами наносекундной длительности».

3. Полнота изложения материалов диссертации. По результатам выполненных исследований 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.

Основное содержание результатов диссертационной работы и ее результаты отражены в работах:

В изданиях, индексируемых Web of Science или Scopus:

1. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Smirnov A., Gubarev F.A. Optical System with Brightness Amplification for Monitoring the Combustion of Aluminium-Based

- Nanopowders // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019 (early access).
2. Gubarev F., Mostovshchikov A., Ilyin A., **Li L.** High-speed visualization of aluminum nanopowder combustion in air // Proceedings of SPIE, 2019, Vol. 11066, 1106610.
 3. Gubarev F.A., Klenovskii M.S., **Li L.**, Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P. High-speed visualization of nanopowder combustion in air // Optica Pura y Aplicada, Vol. 51, No 4, 2018, P. 1-7.
 4. **Li L.**, Mostovshchikov A.V., Il'in A.P., Gubarev F.A., Monitoring of aluminum nanopowder combustion ignited by laser radiation // Progress in Electromagnetics Research Letters, Vol. 75, 2018, P. 125-130.
 5. **Li L.**, Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Smirnov A., Gubarev F.A. Monitoring of Nanopowder Combustion Ignited by Laser Radiation // Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2018, P. 311-316.
 6. **Li L.**, Sytnik I.D., Pekker Y.S., Gubarev F.A. Application of Laser-Speckle Correlation Method for Blood Coagulation Estimation // Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2018, P. 320-323.
 7. **Li L.**, Ilyin A.P., Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., M.S. Klenovskii, Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor // Ceramics International, Vol.44, No 16, 2018, P. 19800-19808.
 8. **Li L.**, Bloshkina A.I., Gubarev F.A. Liquid Transparency Changing Dynamics Estimation by Means of Digital Speckle Correlation // 2017 Progress in electromagnetics research symposium – spring (PIERS), 2017, P. 3172-3175.
 9. Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Il'in A.P., **Li L.** Aluminum Nanopowder Combustion Monitoring Using an Optical System with Brightness Amplification // 2017 Progress in electromagnetics research symposium - spring (PIERS), 2017, P. 2694-2698.
 10. **Li L.**, Gubarev, F.A., Klenovskii, M.S., Bloshkina, A.I. Vibration measurement by means of digital speckle correlation // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications. (SIBCON), No 7491753, 2016.
 11. Gubarev F., **Li L.**, Klenovskii M., Glotov A. Speckle pattern processing by digital image correlation // MATEC Web of Conferences, Vol. 48, 2016.

12. Gubarev F.A., Trigub M.V., Klenovskii M.S., Li L., Evtushenko G.S. Radial distribution of radiation in a CuBr vapor brightness amplifier used in laser monitors // Applied Physics B: Lasers and Optics, Vol. 122, No 2, 2016.
13. Bloshkina A.I., Li L., Gubarev F.A., Klenovskii M.S. Investigation of extracting information from vibrating objects by digital speckle correlation // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2016, P. 637-641.
14. Gubarev F.A., Li L., Klenovskii M.S. A mirror based scheme of a laser projection microscope // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 124, No 1, 2016.
15. Li L., Gubarev F. The Influence of the Radiation Source Parameters on the Accuracy of Digital Speckle Correlation Method // MATEC Web of Conferences, Vol. 79, 2016.
16. Gubarev F.A., Li L., Klenovskii M.S., Shiyanov D.V. Spatial-temporal gain distribution of a CuBr vapor brightness amplifier // Applied Physics B: Lasers and Optics, Vol. 122, No 11, 2016.
17. Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Klenovskii M.S., Il'in A.P., Li L. Copper bromide laser monitor for combustion processes visualization // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Shanghai, No 7735091, 2016, P. 2666-2670.

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С., Ли Л. Радиальное распределение однопроходового излучения в активном элементе лазерного монитора // Контроль. Диагностика, №. 13, 2014. С. 160-162.
2. Ли Л., Сытник Ю.Д., Губарев Ф.А., Пеккер Я.С. Оценка свертываемости плазмы крови методом корреляции лазерных спекл-изображений // Медицинская техника, № 3, 2018, С. 23-25.

Патенты:

1. Патент на изобретение RU 2685072 С1 «Способ исследования процесса горения порошков металлов или их смесей», опубл. 16.04.2019 / Губарев Ф.А., Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П.

2. Патент на изобретение RU 2685040 С1 «Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей» опубл. 16.04.2019 / Губарев Ф.А., Ли Линь, Мостовщиков А.В., Ильин А.П.
3. Патент на изобретение RU 2687308 С1 «Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей», опубл. 13.05.2019 / Губарев Ф.А., Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных семинарах Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», а также на конференциях в период 2015-2019 гг.: VX Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2019 (СГУТиТ, г. Новосибирск); VI International Symposium on Optics and Biophotonics (СГУ, г. Саратов, 2018 г.); Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) in Shanghai (Китай, 2016 г.), St Petersburg (Россия, 2017 г.), Toyama (Япония, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (ТГУ, г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи» (ТПУ, г. Томск, 2017 г.); Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (ТПУ, г. Новосибирск, 2017 г.); NDE 2017 Conference & Exhibition of the society for NDT (ИТ Madras, г. Ченнай, Индия); XXI Международная научная конференция студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (ТПУ, г. Томск, 2015 г.) и др.

4. Личный вклад соискателя заключается 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.

5. 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 предложено 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.

6. Практическая значимость

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.

7. Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечена:

- непротиворечивостью основным законам физики и химии, а также опубликованным ранее результатам других авторов;
- корректным использованием базовой общенаучной методологии;
- корректностью постановки цели и задач при проведении исследований;
- использованием современного оборудования и методов физико-химических исследований;

— многократным проведением измерений и статистической обработкой полученных экспериментальных данных.

8. Выполненная диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, содержит полезный в научном и производственном отношении материал. В работе изложены новые научно обоснованные технические решения, направленные на усовершенствование техники и методики исследования процессов высокотемпературного горения нанопорошков и смесей. Диссертационная работа соответствует требованиям Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также требованиям, приведенным во втором разделе Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «Положение о присуждении ученых степеней».

Диссертация «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения» Ли Линя рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Заключение принято на расширенном научном семинаре Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании 13 чел. С правом решающего голоса 12 чел. Результаты голосования: «за» – 12 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 5 от «19» июня 2019 г.

Трусова Марина Евгеньевна, д.х.н., зам. директора
по развитию ИШХБМТ