

## **ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГОРЕНИЯ**

### *Линь Ли*

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, аспирант, тел. (923)859-72-98, e-mail: wojiaolilin@mail.ru

### *Федор Александрович Губарев*

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, кандидат физико-математических наук, доцент, тел. (913)880-80-05, e-mail: gubarevfa@tpu.ru

### *Андрей Владимирович Мостовщиков*

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (906)956-88-47, e-mail: avmost@tpu.ru

### *Александр Петрович Ильин*

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, доктор химических наук, профессор, тел. (913)858-22-62, e-mail: ilyin@tpu.ru

Статья посвящена развитию методов исследования динамики высокотемпературного горения на примере нанопорошка алюминия. Сложность в исследовании горения нанопорошков заключается в высокой температуре и интенсивности свечения в процессе горения, что делает практически невозможным визуальное наблюдение. В работе рассмотрены различные аппаратно-программные комплексы с применением лазерного излучения для исследования процессов горения нанопорошков металлов. Особое внимание уделено применению лазерного монитора на основе активной среды на парах бромида меди для исследования процесса горения различных порошков и смесей. Лазерный монитор совмещает в себе функции узкополосного лазерного осветителя и усилителя яркости, тем самым осуществляет визуализацию на узкой длине волны усиления. С его помощью возможно наблюдение изменения поверхности горящего образца с высоким временным и пространственным разрешением.

**Ключевые слова:** лазер на парах бромида меди, лазерный монитор, нанопорошок алюминия, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

## **LASER SYSTEM FOR STUDYING THE DYNAMICS OF HIGH TEMPERATURE COMBUSTION**

### *Lin Li*

Tomsk Polytechnic University, 30, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D. Student, phone: (913)859-72-98, e-mail: wojiaolilin@mail.ru

### *Fedor A. Gubarev*

Tomsk Polytechnic University, 30, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (913)880-80-05, e-mail: gubarevfa@tpu.ru

### *Andrei V. Mostovshchikov*

Tomsk Polytechnic University, 30, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (906)956-88-47, e-mail: avmost@tpu.ru

*Alexander P. Ilyin*

Tomsk Polytechnic University, 30, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, D. Sc., Professor, phone: (913)858-22-62, e-mail: ilyin@tpu.ru

The paper is devoted to development of methods for studying the dynamics of high-temperature combustion of aluminum nanopowder. The difficulty in studying the combustion of nanopowders is the high temperature and intensity of light emission during the combustion process, which makes the visual observation virtually impossible. The paper discusses various schemes using laser radiation to study the combustion processes of metal nanopowders. Particular mentions the use of the laser monitor based on an active medium on copper bromide vapor to study the combustion process of various powders and mixtures. The laser monitor combines the functions of the narrow-band laser illuminator and the brightness amplifier, thereby achieving the visualization at a narrow gain wavelength. Therefore, the laser monitor can be used to observe the changes in the surface of a burning sample with high temporal and spatial resolution.

**Key words:** copper bromide laser, laser monitor, aluminium nanopowder, self-propagating high-temperature synthesis.

### *Введение*

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 [1–6]. Кроме того, замена нанопорошков на микронные порошки снижает себестоимость керамических порошков – продуктов сгорания смесей порошков металлов. Температура в процессе горения нанопорошков металлов достигает 2500°C и является источником интенсивной фоновой засветки. Из-за интенсивной фоновой засветки в процессе горения, непосредственное визуальное наблюдение поверхности образца существенно затруднено. Применение фильтров позволяет частично подавить засветку при регистрации скоростной видеокамерой. Тем не менее, вопрос разработки подходящего для наблюдения процесса горения оборудования остается актуальным.

Лазер как источник монохроматического излучения имеет узкую полосу генерации и усиления [7]. Использование активных оптических систем с усилением яркости на основе активных сред на парах металлов (лазерных мониторов) в системах неразрушающего контроля позволяет эффективно подавить интенсивную фоновую засветку и исследовать характеристики высокотемпературных процессов [8–14]. В работе [10], лазерный монитор применялся для наблюдения угольной дуги с температурой выше 3000°C. В работе [11], авторы успешно сфотографировали электроды капиллярного разряда, температура плазмы в котором превышала 8000°C. Кроме этих работ, лазерный монитор имеет другие потенциальные применения. Авторами работы [12] теоретически показано, что характеристики активной среды на парах меди или бромида меди позволяют осуществлять наблюдение сквозь плазму с температурой до 40000 градусов.

## Методы и материалы

На рис. 1 представлена схема для исследования высокотемпературного горения с использованием лазерного монитора. В дополнение к традиционной схеме лазерного монитора [12-14], предложенная схема включала лазер для инициирования горения и быстродействующие фотодиоды для регистрации средней яркости усиленного отраженного света от поверхности объекта, а также момент начала инициирования. Изображение в данной схеме формировалось объективом с фокусным расстоянием 8 см. В качестве усилителя яркости применялся активный элемент на парах бромида меди с внутренним диаметром 2.5 см и длиной активной области 50 см. Применялась конструкция активного элемента с независимым нагревом активной области газоразрядной трубки и контейнеров с рабочим веществом [15] и тиратронная схема накачки.

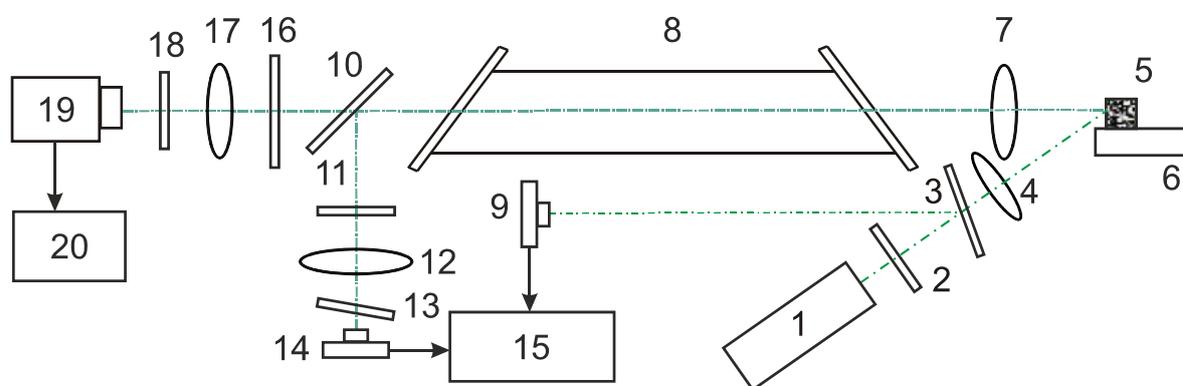


Рис. 1. Схема лазерного монитора:

1 – лазер для инициирования; 2 – затвор; 3, 10 – светоделительные пластины; 4, 12 – линзы; 5 – объект наблюдения; 6 – подложка; 7, 17 – объективы; 8 – усилитель яркости; 9, 14 – фотодиоды; 11, 16 – нейтральные фильтры; 13 – диффузор; 15 – осциллограф; 18 – узкополосный фильтр; 19 – скоростная камера; 20 – ПК

Запись изображений осуществлялась с помощью скоростной камеры PhotronFastcam SA1. Обзорный вид процесса в собственном свете записывался USB-камерой ELP-USBFHD01M-MFV. Использовался быстродействующий фотодиод Thorlabs DET10A/M с временем нарастания 1 нс и осциллограф АКПП-4122/10 со временем сканирования до 2 с/дел для регистрации средней яркости усиленного отраженного излучения.

Инициирование процесса горения нанопорошка алюминия осуществлялось непрерывным излучением твердотельного 532 нм лазера и контролировалось затвором Thorlabs SHB1. Лазерный луч со средней выходной мощностью 200 мВт фокусировался на образце в области, контролируемой лазерным монитором, или сбоку образца.

В работе исследовался нанопорошок алюминия с распределением частиц по размеру близким к логарифмическому с максимумом 80 нм. Распределение

частиц по размерам измерялось анализатором Shimadzu SALD-7101 в изопропанольной среде (99,99%). Содержание металлических примесей в нанопорошке не превышало 0,2 масс. %. Порошок в виде образца прямоугольной вытянутой формы помещался на алюминиевую подложку толщиной 4 мм. Образцы приготавливались с использованием пресс-формы и имели примерно одинаковые размеры 20\*7\*3 мм для обеспечения удобного для измерений времени горения.

Горение нанопорошка алюминия протекает при высокой температуре, а в случаях со смесями нанопорошка алюминия с другими порошками горение может сопровождаться разлетом продуктов сгорания. Это может привести к порче объектива, расположенного в непосредственной близости от объекта исследования. Чтобы повысить практичность и надежность аппаратуры лазерного мониторинга, предложена схема удаленного наблюдения, которая представлена на рис. 2. Схема позволила наблюдать процесс горения нанопорошков металлов на расстоянии 0,5 м.

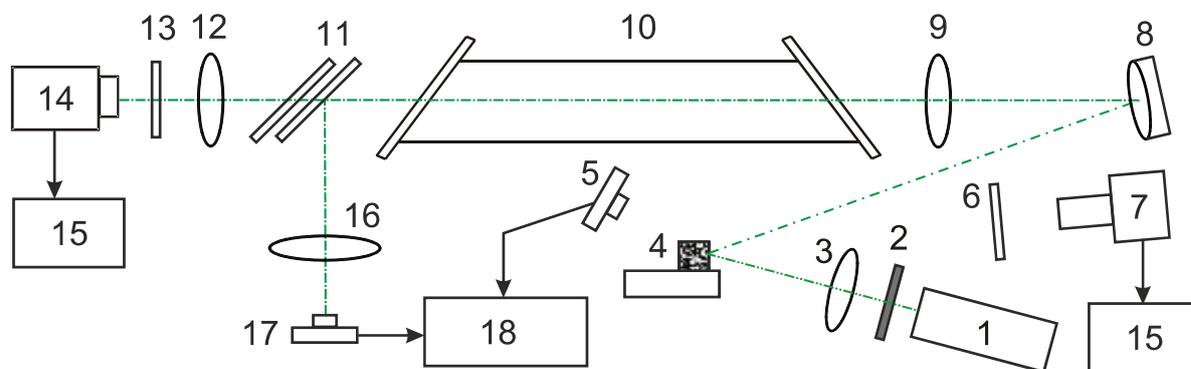


Рис. 2. Экспериментальная схема:

1 – лазер для иницирования; 2 – затвор; 3, 9, 16 – линзы; 4 – нанопорошок алюминия; 5, 17 – фотодиоды; 6, 11 – нейтральные фильтры; 7 – USB камера; 8 – вогнутоедлиннофокусное зеркало; 12 – объектив; 10 – усилитель яркости; 13 – узкополосный фильтр; 14 – скоростная камера; 15 – ПК; 18 – осциллограф

Когерентные оптические методы исследования, такие как лазерная спекл-интерферометрия, находят применение в материаловедении и медицине для исследования деформаций, механических напряжений, изучения биологических тканей и жидкостей [16-18]. Для исследования возможности применения метода корреляции цифровых спекл-изображений для исследования процесса горения порошков была реализована схема, комбинирующая спекл-визуализацию и регистрацию средней яркости усиленных изображений поверхности образца. На рис. 3 представлена схемавизуализации, которая включает в себя три различных метода визуализации, дополняющие друг друга: регистрацию в собственном свете USB камерой, скоростную лазерную спекл-визуализацию и регистрацию средней яркости изображений быстродействующими фотодиодами.

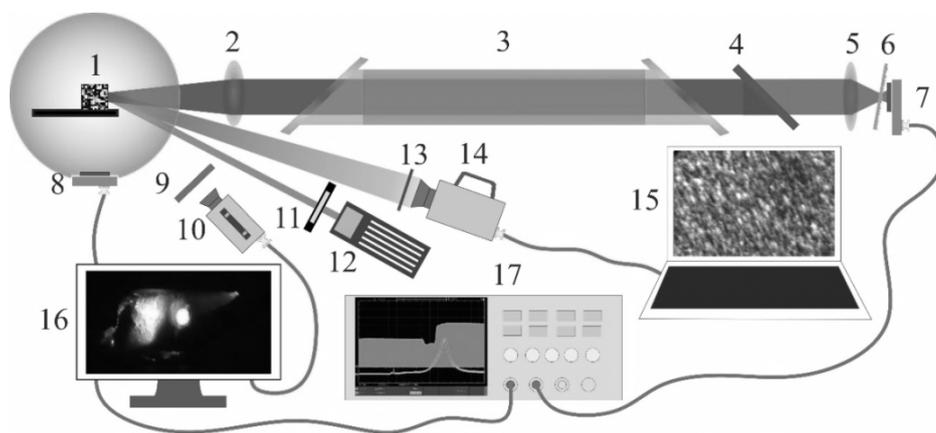


Рис. 3. Экспериментальная схема:

1 – нанопорошок алюминия; 2, 5 – линзы; 3 – усилитель яркости; 4, 9 – нейтральные фильтры; 6 – диффузор; 7, 8 – фотодиоды; 10 – USB камера; 11 – оптический затвор; 12 – лазер подсветки; 13 – фильтр 532 нм; 14 – скоростная камера; 15, 16 – ПК; 17 – осциллограф

### Результаты

Изображения образцов нанопорошков алюминия в собственном свете в процессе горения в воздухе представлены на рис. 4. На видеоряде, полученном путем скоростной видеозаписи, показано место инициирования лазерным излучением, возникновение низкотемпературной и высокотемпературной стадий горения, распространение горения по образцу.

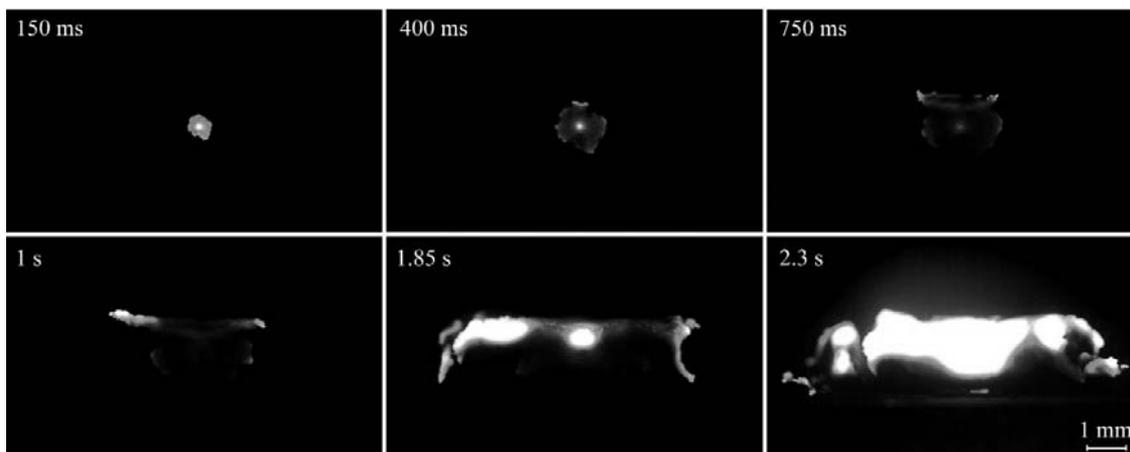


Рис. 4. Скоростная визуализация горения нанопорошка алюминия в собственном свете при лазерном инициировании

Полученные изображения поверхности образцов нанопорошка алюминия в месте наблюдения по схемам на рисунках 1 и 2 представлены на рис. 5. Результаты показали возможность наблюдения изменения поверхности образца

с разрешением около 5 мкм при использовании схемы на рис. 1 и 25 мкм при использовании схемы на рис. 2, что позволяет исследовать распространение фронта горения с разной детализацией. Вопрос применения той или другой схемы зависит от целей эксперимента. При использовании традиционной схемы возможно детально наблюдать процесс инициирования и распространение низкотемпературной волны горения в первую секунду процесса. Схема удаленного наблюдения позволяет исследовать распространение высокотемпературной волны горения и усадку порошка.

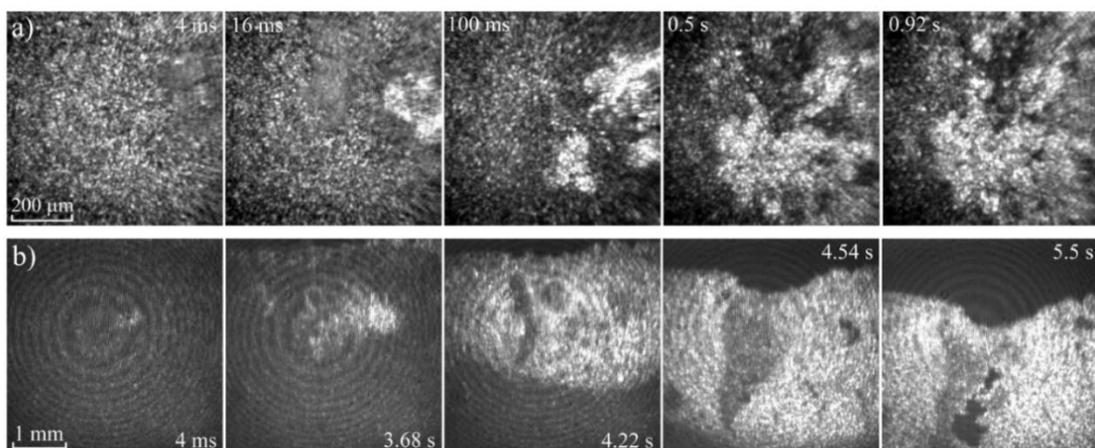


Рис. 5. Скоростная визуализация горения нанопорошка алюминия при лазерном инициировании при использовании традиционной схемы лазерного монитора (a) и схемы с удаленным наблюдением (b)

Применение быстродействующего фотодиода для измерения средней интенсивности сигнала усилителя яркости дает возможность количественно оценить изменение отражения поверхности горящего образца. На рис. 6 показаны изменение интенсивности отраженного света от объекта в процессе горения нанопорошка алюминия и сигнал инициирования. На кривой можно выделить основные стадии горения: инициирование, низкотемпературную и высокотемпературные стадии, а также остывание образца.

На рис. 7 показаны типичные спекл-изображения поверхности нанопорошка до, в процессе горения и после окончания горения. Обработка записанных спекл-изображений проводилась с целью вычисления коэффициента корреляции спекл-изображений во времени. На рис. 8 представлена кривая коэффициента корреляции для одного из образцов, на которой отчетливо различаются два временных интервала – фаза 1 и фаза 2. Сопоставив эти значения с результатами наблюдения с применением лазерного монитора, можно сделать вывод об их соответствии низкотемпературной и высокотемпературной стадиям горения, а также оценить динамику горения. Чем меньше значение коэффициента корреляции, тем выше скорость протекания процесса. Коэффициент корреляции, равный 1, соответствует отсутствию изменений поверхности в области наблюдения, в которую направлен лазер подсветки.

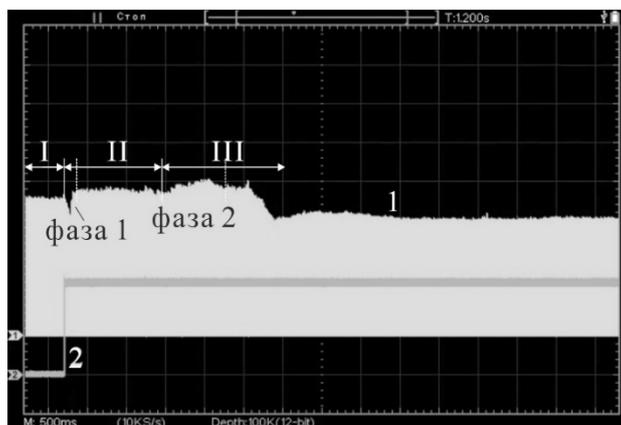


Рис. 6. Осциллограммы сигналов фотодиодов, зарегистрированные в схеме на рис. 1:  
1 – усиленноеотраженноеизлучение; 2 – излучение инициирования

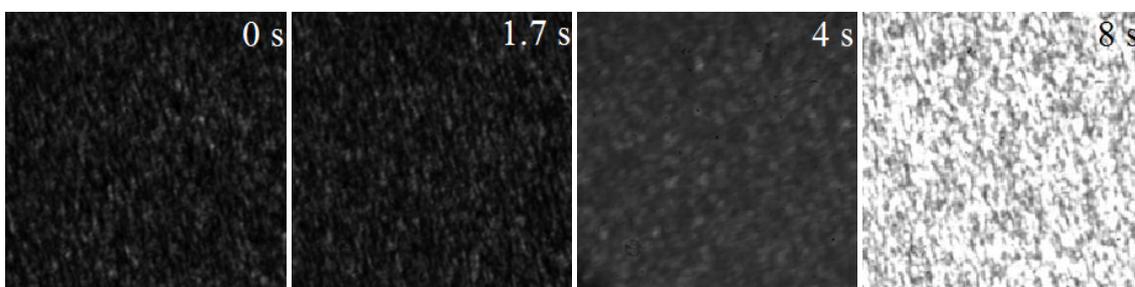


Рис. 7. Спекл-изображения, полученные с использованием схемы на рис. 3 с нанопорошком алюминия в качестве объекта исследования

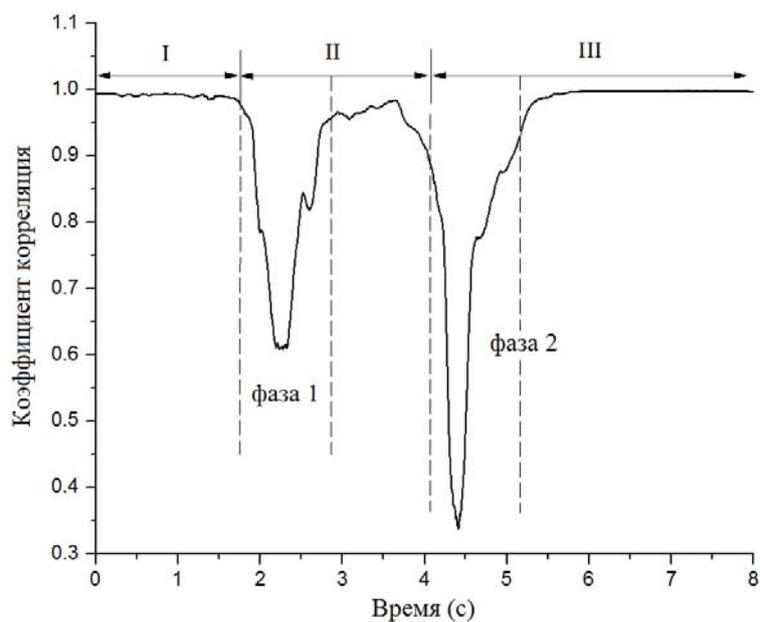


Рис. 8. Зависимость коэффициента корреляция от времени в процессе горения

## Заключение

Оптические методы исследования процесса горения являются эффективным инструментом для изучения нанопорошков металлов. Используя представленные в работе схемы, возможно успешно наблюдать процесс горения нанопорошков с разным разрешением, несмотря на интенсивную фоновую засветку, сопровождающую горение. При этом, использование фотодиодов для регистрации усиленного отраженного от поверхности образца излучения позволяет эффективно и просто определять временные характеристики процесса горения.

Продемонстрирована возможность использования метода корреляции цифровых спекл-изображений для исследования поверхности нанопорошков алюминия в процессе горения. Показана возможность применения данного метода для определения временных характеристик процесса.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 11.1928.2017/4.6.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gromov A. A., Teipel U. Metal Nanopowders: Production, Characterization, and Energetic Applications. – М.:Weinheim: Wiley-VCH; 2014.
2. Sundaram D. S., Yang V., Zarko E. Combustion of nano aluminum particles (Review) // Combust. Explo. Shock, – 2015. – V. 51. – P. 173–196.
3. Sundaram D. S., Puri P., Yang V. A general theory of ignition and combustion of nano- and micron-sized aluminum particles // Combust. Flame. – 2016. – V. 169. – P. 94–109.
4. Сычев А. Е., Мержанов А. Г., Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноматериалов // Успехи химии – 2004. – Т. 73. – № 2. – С. 157–170.
5. Kharatyan S. L., Merzhanov A. G. Coupled SHS Reactions as a useful tool for synthesis of materials: An overview // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. – 2012. – Т. 21, № 1. С. 59–73.
6. Il'in A. P., Mostovshchikov A. V., Root L. O. Growth of aluminum nitride single crystals under thermal explosion conditions // Tech. Phys. Lett. – 2011. – Т. 37. № 10. С. 965–966.
7. Евтушенко Г.С. Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. 2-е издание. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 276 с.
8. Batenin V. M., Klimovskii I. I., Selezneva L. A. Research of surfaces of electrodes of a carbon arc during its burning // Doklady Akademii Nauk, – 1988. – Т. 303. № 4. С. 857– 860.
9. Abramov D. V., Arakelian S. M., Galkin A. F., Klimovskii I. I., Kucherik A. O., Prokoshev V. G. On the possibility of studying the temporal evolution of a surface relief directly during exposure to high-power radiation // Quantum Electron. – 2006. – Т. 36, № 6. – С. 569–575.
10. Buzhinsky R. O., Savransky V. V., Zemskov K. I., Isaev A. A., Buzhinsky O. I. Observation of objects under intense plasma background illumination // Plasma Phys. Rep. – 2010. – Т. 36. № 13. – С. 1269–1271.
11. Kuznetsov A.P., Gubskii K.L., Savjолоv A.S., Sarantsev S.A., Terekhin A.N., Buzhinskij R.O. Visualization of plasma-induced processes by a projection system with a Cu-laser-based brightness amplifier // Plasma Physics Reports. – 2010. Т. 36. № 5. С. 428–437.
12. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyarov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Rev. Sci. Instrum. – 2014. – V. 85. – P. 033111-1–033111-5.

13. Li L., Mostovshchikov A. V., Il'in A. P., Gubarev F. A. Monitoring of aluminum nanopowder combustion ignited by laser radiation // Prog. Electromagn. Res. Lett. – 2018. – V. 75. – P. 125–130.
14. Li L., Ilyin A.P., Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Klenovski i M.S. Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor // Ceram. Int. – 2018. – V. 44. – N 16. – P. 19800-19808.
15. Андриенко О.С., Губарев Ф.А., Димаки В.А., Иванов А.И., Левицкий М.Е., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Федоров В.Ф., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Лазеры на парах бромида меди нового поколения // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – № 10. – С. 999–1009.
16. Hild F., Roux S. Digital image correlation: From displacement measurement to identification of elastic properties – a review // Strain. – 2006. – V. 42. – P. 69-80.
17. Tuchin V. V. Coherent optical techniques for the analysis of tissue structure and dynamics // J. Biomed. Opt. – 1999. – V. 4. – С. 106-124.
18. Ли Л., Сытник Ю.Д., Губарев Ф.А., Пеккер Я.С. Оценка свертываемости крови по корреляционным характеристикам лазерных спекл-изображений // Медицинская техника. – 2018. – № 3. – С. 23-25.

© Л. Ли, Ф. А. Губарев, А. В. Мостовщиков, А. П. Ильин, 2019