

УДК 621.373.8

Ф.А. Губарев

Многофункциональная система визуализации на основе лазера и усилителя яркости на парах бромида меди

Предлагается многофункциональная система визуализации поверхности высокоэнергетических материалов во время горения на основе активных сред на парах бромида меди, позволяющая оперативно реализовать различные методы активной визуализации. Система построена на основе скоростной видеокамеры, лазера подсветки и усилителя яркости на парах бромида меди. В зависимости от задач визуализации основные компоненты системы могут быть сконфигурированы в систему с лазерной подсветкой, одноканальный лазерный монитор или лазерный монитор с синхронной лазерной подсветкой. Высоковольтный импульсный источник накачки позволяет подключать как одну лазерную трубку, так и две одновременно, при этом переключение режимов работы может осуществляться «на лету». Источник формирует одну или две синхронизированные последовательности высоковольтных импульсов для накачки газоразрядных трубок с напряжением до 6 кВ и частотой 20 кГц. За счет применения газоразрядных трубок с независимым контролем температурных параметров могут быть реализованы режимы работы с мощностью накачки по каждому каналу 500–700 Вт. Для формирования импульсов накачки лазерных сред использована двухканальная тиратронная схема прямого разряда накопительных конденсаторов, заряд которых осуществляется общим источником стабилизированного напряжения, обеспечиваемого импульсным стабилизатором понижающего типа и формирователем импульсов заряда накопительных конденсаторов на основе мостового инвертора. Синхронизация лазерной подсветки и усилителя яркости в режиме с синхронной лазерной подсветкой осуществляется транзисторным модулятором с регулируемыми линиями задержки с точностью ± 1 нс. Представлены результаты визуализации поверхности смесей нанопорошков металлов во время горения, полученные при различных конфигурациях лазерной системы.

Ключевые слова: скоростная визуализация, лазерный монитор, импульсная лазерная подсветка, высокотемпературное горение, высоковольтный источник питания, синхронизация.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-21-27

Визуальное наблюдение процесса горения является одним из основных способов получения информации о характере протекания процесса. С развитием видеорегистрации на основе скоростных камер появились новые возможности в исследовании горения высокоэнергетических материалов и топливных композиций [1–7]. Получение визуальной информации в режиме реального времени позволяет верифицировать существующие модели горения и разрабатывать новые. Понимание динамики горения позволит разработать новые высокоэффективные технологии сжигания.

Горение, как правило, сопровождается выделением значительного количества энергии и ярким свечением [8]. Наиболее простым способом визуального исследования горения является прямая скоростная видеосъемка. Метод позволяет исследовать характер свечения факела. В случае твердого топлива факел образуется над поверхностью горящих материалов, при этом поверхность материалов закрыта от наблюдателя. На сегодня существуют две основные технологии визуализации поверхности горящих материалов «сквозь пламя» на основе лазерного излучения: лазерная подсветка и лазерный мониторинг с усилением яркости [1, 9–11].

Лазерная подсветка, синхронизованная с работой скоростной камеры, позволяет наблюдать значительную площадь поверхности, при этом не обеспечивает полное подавление свечения фоновой подсветки. Применение лазерного монитора на основе активной среды на парах меди (бромида меди) обеспечивает самоспряженную лазерную подсветку по-

верхности объекта наблюдения и усиление отраженного от поверхности лазерного излучения. Являясь проекционной оптической системой, лазерный монитор дает увеличенное изображение заданной области образца [12, 13]. Дополнительная синхронизованная лазерная подсветка (бистатистический лазерный монитор) позволяет изменять освещенность поверхности и повысить качество изображений [14, 15].

Применение лазерного монитора или лазерной подсветки определяется целями эксперимента и в ряде случаев выбор одного или другого метода не очевиден. В связи с этим целью настоящей работы являлась разработка универсальной системы визуализации поверхности материалов во время горения на основе квантовых генераторов (лазеров и усилителей яркости) на парах бромида меди, позволяющая оперативно реализовать различные методы активной визуализации (лазерный мониторинг или лазерная подсветка).

Схемы визуализации

В работе предлагается строить систему визуализации из набора компонентов в зависимости от задач эксперимента. За прототип системы взят двухканальный лазерный монитор, представленный ранее в [15]. Компонентами системы служат две лазерные трубки, двухканальный источник питания со схемой синхронизации, скоростная камера, средство инициирования (лазер, нагретая спираль или источник открытого огня), оптические компоненты (объектив, расширитель пучка, светофильтры, зеркала). Варианты построения схем визуализации на основе набора компонентов приведены на рис. 1.

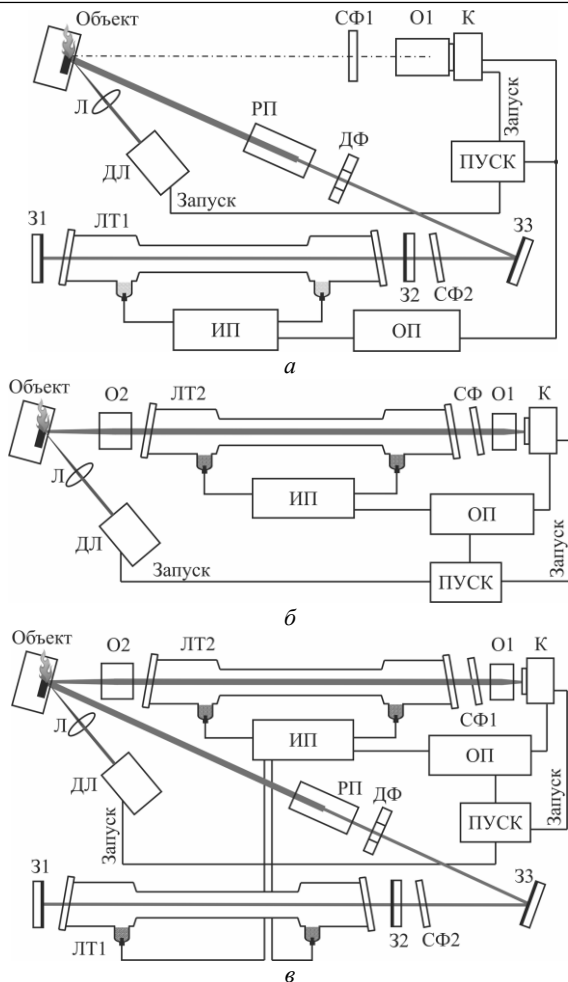


Рис. 1. Схемы визуализации: скоростной с импульсной лазерной подсветкой – *а*; на основе усилителя яркости – *б*; на основе усилителя яркости с синхронной лазерной подсветкой – *в*: СФ1, СФ2 – светофильтры; О1, О2 – объективы; К – скоростная камера; Л – линза; ДЛ – диодный лазер; РП – расширитель пучка; ДФ – диафрагма; ЛТ1, ЛТ2 – лазерные трубки; 31, 32, 33 – зеркала; ИП – источник накачки; ОП – оптический преобразователь; ПУСК – пульт запуска иницирования и видеозаписи

В качестве скоростной камеры во всех экспериментах использовалась камера Phantom MiGo C110. Скорость съемки составляла 500 кадров/с. Изображение в схемах с лазерной подсветкой и прямой съемки формировалось макрообъективом Canon Macro Lens EF 180 мм с переменным фокусом.

Система скоростной лазерной визуализации с применением импульсной лазерной подсветки от лазера на парах бромиды меди приведена на рис. 1, *а*. Система содержит скоростную видеокамеру, синхронизованную с источником накачки усилителя яркости. Используется один из каналов источника накачки. Синхронизация осуществляется через оптический преобразователь для обеспечения гальванической развязки. В данной схеме горение инициируется диодным лазером, начало воздействия которого синхронизовано с моментом начала записи скоростной камеры. Для лазерной подсветки объекта используется оптическая схема, состоящая из поворотного

зеркала, диафрагмы и расширителя пучка. Лазерная трубка оснащается плоскопараллельным резонатором и выходным фильтром.

На рис. 1, *б* приведена схема визуализации с усилением яркости (лазерный монитор). Используется лазерная трубка ЛТ2 или та же ЛТ1. Как и в схеме на рис. 1, *а*, используется один из каналов источника накачки. Камера регистрирует изображение лазерного монитора, которое формируется объективами и нейтральными фильтрами для настройки яркости изображений. В работе использовались линза с фокусным расстоянием 50 см для формирования изображения (О2) и объектив с $F = 50$ мм для сопряжения изображения лазерного монитора с матрицей скоростной камеры.

Наиболее сложной схемой является схема лазерного монитора с лазерной подсветкой, представленная на рис. 1, *в*. В этой схеме на основе лазерной трубки 1 реализован лазер подсветки аналогично лазеру на рис. 1, *а* и лазерный монитор, аналогичный представленному на рис. 1, *б*. Луч лазера подсветки через поворотное зеркало, диафрагму и расширитель пучка освещает поверхность образца. Источник накачки имеет плавную подстройку взаимной синхронизации каналов с точностью ± 1 нс, что достаточно для усиления импульсной лазерной подсветки усилителем яркости.

Простейшим вариантом иницирования является использование открытого огня (спичка, газовая горелка). В этом случае запуск записи камеры осуществляется программно или дистанционно пультом. Этот способ не позволяет синхронизовать момент иницирования и начало записи, но в полной мере позволяет исследовать распространение горения по образцу. Использование лазера для иницирования горения позволяет не только синхронизовать начало горения и начало записи, но и открывает возможности исследования самого процесса лазерного иницирования. В данной работе включение иницирующего лазера осуществляется синхронно с началом записи скоростной камеры. При этом нажатие кнопки пульта стробировано по импульсам синхронизации, синхронным с импульсами накачки.

Газоразрядные трубки

В работе используются две газоразрядные трубки (ГРТ) с размерами активной области: диаметр 1,5 см, длина 40 см – ЛТ1; диаметр 3 см, длина 50 см – ЛТ2. Лазерной средой служат пары бромиды меди в буферном газе неоне. ГРТ имеют внешний нагрев активной области и рабочего вещества, что обеспечивает температурный режим, практически не зависящий от вводимой мощности накачки. Работа таких лазеров и усилителей на парах бромиды меди рассмотрена в [16, 17].

В качестве лазера подсветки в данной работе использовалась ЛТ1. Пучок излучения проходил через диафрагму диаметром 6 мм, которая отсекала боковые части диаграммы радиального распределения. Максимальная средняя мощность излучения после диафрагмы 380 мВт на длине волны 510,6 нм могла

изменяться путем установки нейтрального светофильтра СФ2 (см. рис. 1). Режим работы активной среды подбирался таким образом, чтобы излучение на длине волны 578,2 нм отсутствовало [17]. При использовании ЛТ2 в качестве лазера подсветки средняя мощность излучения могла варьироваться до 1 Вт. В качестве усилителя яркости в большинстве экспериментов использовалась ЛТ2.

Высоковольтный источник накачки

Схема источника питания показана на рис. 2. Вся система питается от стандартной сети 220 В, 50 Гц. Входное сетевое напряжение поступает на стабилизированный источник постоянного напряжения, состоящий из входной коммутационной и защитной аппаратуры, входного фильтра, выпрямителя и импульсного стабилизатора напряжения. Стабилизатор напряжения выполнен по схеме понижающего преобразователя постоянного напряжения. Источник обеспечивает стабилизацию и регулировку напряжения на входе мостового инвертора (транзисторы VT1–VT4) и, как следствие, напряжения на выходе трансформаторно-выпрямительного узла TV1-DM, поступающего на высоковольтную схему накачки лазерных трубок ЛТ1 и ЛТ2. Питание системы управления и других низковольтных вспомогательных систем осуществляется вспомогательным источником питания.

Применяется традиционный способ накачки ГРТ на парах бромида меди – прямой разряд накопительной емкости на ГРТ посредством тиратрона [18, 19]. Используется тиратрон ТГИ1-1000/25. Частота коммутации составляет 20 ± 2 кГц, что находится в диапазоне оптимальных частот следования импуль-

сов активной среды на парах бромида меди и обеспечивает надежную работу источника питания. Применяется одноканальный резонансный заряд накопительной емкости с выхода инвертора через балластный дроссель и высоковольтный вентиль. В данном случае от инвертора могут одновременно заряжаться два накопительных конденсатора C1 и C3 емкостью 0,68 и 1,0 нФ через дроссели L1, L2 и вентили D1, D2, соответственно. Мощность накачки по каналам в номинальном режиме работы составляет ~500 Вт (C1 = 0,68 нФ) и ~700 Вт (C3=1,0 нФ) при напряжении каждого канала 6,0 кВ. Соответственно, максимальная мощность накачки составляет ~1200 Вт при работе обеих лазерных трубок.

В случае двухканального выхода при питании от одного источника ГРТ с неидентичными, но близкими параметрами (диаметр, длина, геометрия электродов, газовый состав) возникает проблема энергетической балансировки рабочей точки ГРТ. Эта проблема решается для частного случая подбором накопительной емкости и не обеспечивает долговременную стабильность при условии изменения характеристик ГРТ. В отличие от нашей предшествующей работы [15] в предлагаемом источнике выравнивание рабочей точки ГРТ в двухканальном режиме осуществляется за счет применения двухобмоточного индуктора, в котором обмотки индуктивностей L1 и L2 размещены на одном магнитопроводе. Использование одного магнитопровода позволяет переключать «на лету» режимы работы источника накачки без дополнительной настройки инвертора или стабилизированного источника постоянного напряжения.

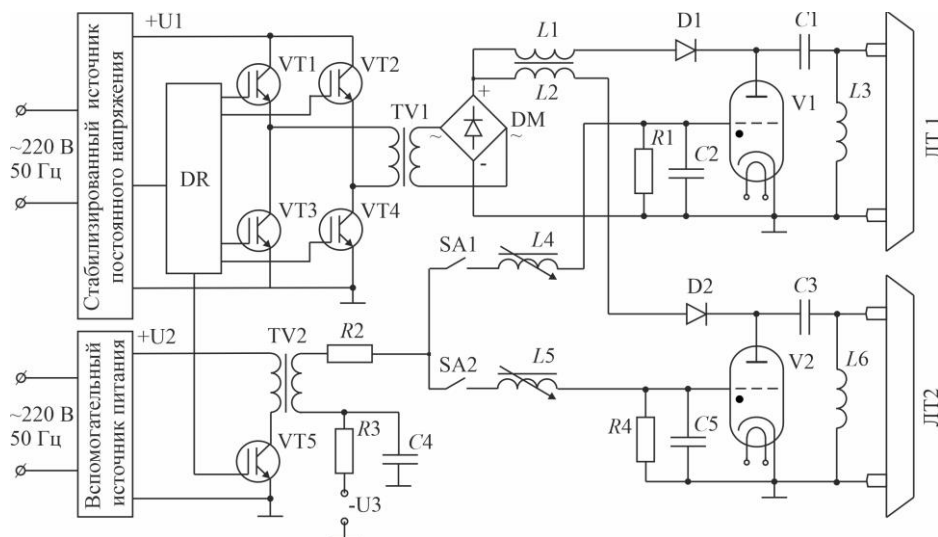


Рис. 2. Схема источника накачки двух лазерных трубок

Для переключения режимов в схеме установлены механические ключи SA1 и SA2 по цепи импульсов запуска тиратронов. Основными режимами работы лазерной системы являются: лазерная подсветка от ЛТ1, лазерный мониторинг на основе усилителя ЛТ2 и лазерный мониторинг на основе ЛТ2 с синхронной лазерной подсветкой от ЛТ1. Последний режим также известен как бистатический лазерный монитор [14, 15].

Для реализации лазерного монитора с синхронной лазерной подсветкой необходимо формировать импульсы накачки с задержкой 10–20 нс с точностью формирования временных интервалов 1–2 нс, что обусловлено малой длительностью импульса излучения (10–20 нс по полувысоте). Предложенная нами в [15] схема синхронизации на основе феррвариометров L4, L5 с общим импульсным трансформатором TV2 и транзисторным ключом VT5 (см. рис. 2) осу-

ществляет регулировку задержки с точностью ± 1 нс. Обратное смещение, необходимое для запираания тиратронов, также формируется общими элементами $U3$, $R3$ и $C4$.

На рис. 3 показан внешний вид лазерной системы с одной лазерной трубкой. Каждая из трубок подключается коаксиальным кабелем. Блоки входного выпрямителя, стабилизатора напряжения, инвертора и трансформаторно-выпрямительного узла располагаются в стандартном корпусе. Блоки запуска и регулируемых каналов задержки располагаются в выносном стандартном корпусе. Такой способ компоновки позволяет компактно размещать систему в условиях лаборатории.



Рис. 3. Внешний вид лазерной системы с одной лазерной трубкой

Визуализация горения

Тестовые образцы компактировались в виде параллелепипедов размером $20 \times 5 \times 3$ мм³. Применялись две смеси высокоэнергетических материалов на основе нанопорошка алюминия: 30% нанопорошка алюминия, 30% микронного порошка алюминия и 40% нанопорошка железа (смесь 1); 60% нанопорошка алюминия и 40% нанопорошка железа (смесь 2). Распределение частиц по размерам для компонентов было близким к логнормальному с максимумом 80 нм для наноAl, 2 мкм для микроAl и 110 нм для наноFe. На рис. 4 приведены кадры горения смеси 1, зарегистрированные путем прямой видеозаписи. При относительно невысокой яркости и незначительной площади горения кадры засвечиваются частично (2,49 с). В случае более высокой интенсивности засвечивается весь образец (2,51 с).

На рис. 5–7 показаны примеры визуализации поверхности горящих образцов с использованием различных вариантов реализации предложенной лазерной системы. Лазерная подсветка с установленным светофильтром СФ1 с полосой пропускания 510 ± 5 нм (рис. 5) снижает яркость засветки, при этом поверхность оказывается хорошо освещенной, гораздо лучше видны детали поверхности по сравнению с прямой видеозаписью. Пересвеченные фрагменты

изображений практически отсутствуют. Тем не менее лазерная подсветка не полностью подавляет засветку.

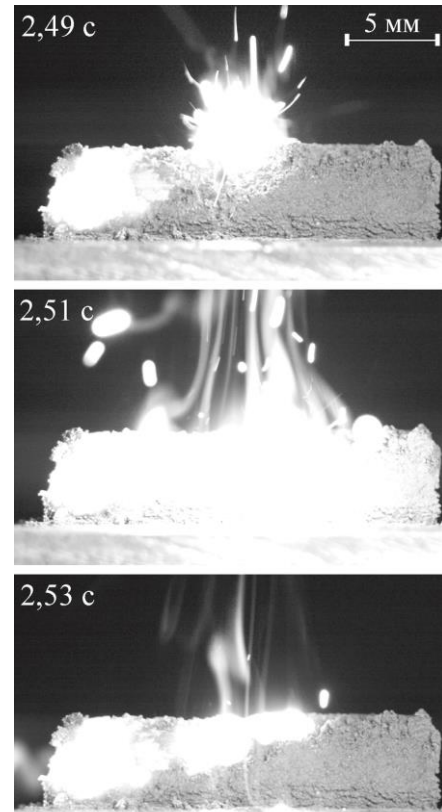


Рис. 4. Пример визуализации горения смеси 1 путем прямой видеосъемки

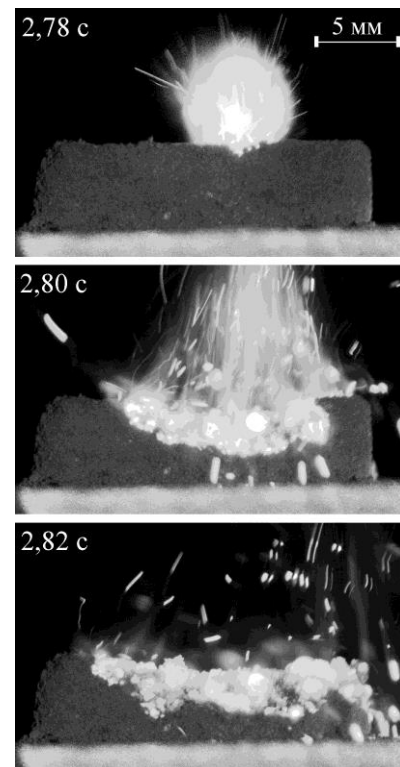


Рис. 5. Пример визуализации поверхности смеси 1 с использованием режима лазерной подсветки (см. рис. 1, а)

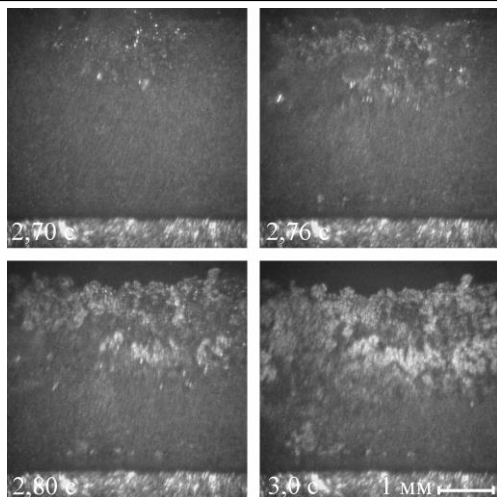


Рис. 6. Пример визуализации поверхности смеси 2 с использованием режима лазерного монитора (см. рис. 1, б)

В отличие от лазерной подсветки, в поле зрения лазерного монитора попадает только часть поверхности (рис. 6, 7). Кроме того, лазерный монитор дает увеличенное изображение объекта. Преимуществом лазерного монитора является полное подавление фоновой засветки от горящего образца. Применение синхронной лазерной подсветки при лазерном мониторинге горения дает увеличение контраста изображений [15], что наблюдалось также в условиях настоящей работы (см. рис. 7). Настройка оптической схемы в случае бистатического лазерного монитора усложняется незначительно. При этом требуется точная настройка задержки работы усилителя по отношению к излучению подсветки, которая осуществляется визуально для достижения наибольшей яркости и контрастности изображений.

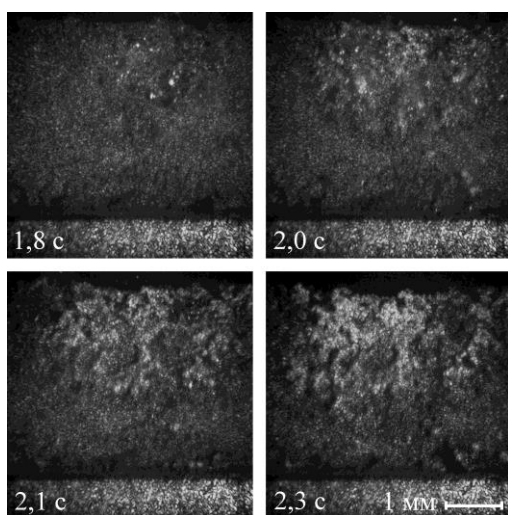


Рис. 7. Пример визуализации поверхности смеси 2 с использованием режима лазерного монитора с синхронной лазерной подсветкой (см. рис. 1, в)

Заключение

В работе рассмотрены различные варианты реализации скоростной визуализации с использованием лазера и усилителя яркости на парах бромида меди.

Универсальность системы заключается в возможности на основе набора компонентов реализовать различные методы активной визуализации. В зависимости от задач визуализации, основные компоненты системы могут быть сконфигурированы в систему с лазерной подсветкой, одноканальный лазерный монитор или лазерный монитор с синхронной лазерной подсветкой. Высоковольтный импульсный источник накачки позволяет подключать как одну лазерную трубку, так и две одновременно, при этом переключение режимов работы может осуществляться без отключения источника питания. Выведение лазерных трубок из номинального температурного режима потребуется только в случае их перемещения.

Заряд накопительных конденсаторов двухканальной схемы накачки осуществляется общим источником стабилизированного напряжения, обеспечиваемого импульсным стабилизатором понижающего типа и формирователем импульсов заряда накопительных конденсаторов на основе мостового инвертора. Синхронизация лазерной подсветки и усилителя яркости в режиме с синхронной лазерной подсветкой реализована на основе транзисторного модулятора с регулируемыми линиями задержки на основе ферровариометров. Разработанный источник накачки показал работоспособность без сбоев непрерывно в течение 10 ч на две разные газоразрядные трубки, работающие в разных режимах (лазерной генерации с плоскопараллельным резонатором и усилителя яркости).

Результаты визуализации смесей порошков на основе нанопорошка алюминия демонстрируют возможность визуализации поверхности горящих материалов как с применением лазерной подсветки, так и в режиме лазерного монитора. Система дает возможность выбрать исследователю тот или иной режим визуализации в зависимости от задач эксперимента. Лазерная подсветка имеет преимущество при визуализации всего образца, лазерный мониторинг – при более детальном исследовании фрагмента поверхности с оптическим увеличением. Разработанная многофункциональная система может применяться не только для исследования поверхности горящих высокоэнергетических материалов, но и для визуализации поверхности жидких, газообразных и твердых топлив, а также биотоплива и твердых промышленных отходов.

Автор выражает признательность сотрудникам Томского политехнического университета (г. Томск) за предоставленную техническую возможность проведения экспериментального исследования.

Литература

1. Sick V. High speed imaging in fundamental and applied combustion research // Proceedings of the Combustion Institute. – 2013. – Vol. 34, No. 2. – P. 3509–3530.
2. Characterization of aluminum powders: IV. Effect of nanometals on the combustion of aluminized ammonium nitrate-based solid propellants / A.A. Gromov, E.M. Popenko, A.V. Sergienko, K.V. Slyusarsky, A.Yu. Nalivaiko, D.Yu. Ozhe-

relkov, K.B. Larionov, E.L. Dzidziguri // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2021. – Vol. 46, No. 3. – P. 450–459.

3. Advanced laser-based techniques for gas-phase diagnostics in combustion and aerospace engineering / A. Ehn, J. Zhu, X. Li, J. Kiefer // *Applied Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 71, No. 3. – P. 341–366.

4. Study of aluminum particle combustion in solid propellant plumes using digital in-line holography and imaging pyrometry / Y. Chen, D.R. Guildenbecher, K.N.G. Hoffmeister, M.A. Cooper, H.L. Stauffacher, M.S. Oliver, E.B. Washburn // *Combustion and Flame*. – 2017. – Vol. 182. – P. 225–237.

5. Huang H.W., Zhang Y. Analysis of the ignition process using a digital image and colour processing technique // *Measurement Science and Technology*. – 2011. – Vol. 22, No. 7. – Art. no 075401.

6. Glushkov D.O. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets / D.O. Glushkov, R.I. Egorov, D.M. Klepikov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2021. – Vol. 175. – Art. No. 121359.

7. Relative environmental, economic, and energy performance indicators of fuel compositions with biomass / D. Glushkov, G. Nyashina, V. Medvedev, K. Vershinina // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 10, No. 61. – Art. No. 2092.

8. Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов, Т.А. Хабас, А.П. Ильин, Е.М. Попенко, А.Г. Коротких, В.А. Архипов, А.А. Дитц, Ю.И. Строчкова, Л.О. Толбанова. – Томск: Дельтаплан, 2008. – 382 с.

9. Peering through the flames: imaging techniques for reacting aluminum powders / E.T. Zepper, M.L. Pantoya, S. Bhattacharya, J.O. Marston, A.A. Neuber, R.J. Heaps // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, No. 9. – P. 2535–2541.

10. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting / G.S. Evtushenko, M.V. Trigub, F.A. Gubarev, T.G. Evtushenko, S.N. Torgaev, D.V. Shiyarov // *Review of Scientific Instruments*. – 2014. – Vol. 85. – Art. No 033111.

11. High-speed visualization of nanopowder combustion in air / F.A. Gubarev, M.S. Klenovskii, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // *Optica Pura y Aplicada*. – 2018. – Vol. 51, No. 4. – P. 1–7.

12. Петраш Г.Г. Оптические системы с усилителями яркости / Г.Г. Петраш. – М.: Наука, 1991. – 152 с.

13. Evtushenko G.S. Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes / G.S. Evtushenko. – New York: Nova Science Publishers, 2018. – 236 p.

14. Trigub M.V. Bistatic laser monitor for imaging objects and processes / M.V. Trigub, N.A. Vasnev, G.S. Evtushenko // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2020. – Vol. 126. – Art. No. 33.

15. Two-channel system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders / F.A. Gubarev, E.Yu. Burkin, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, L. Li // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2021. – Vol. 70. – Art. No. 9371760.

16. A stabilized copper bromide laser with computer-controlled operating modes and a mean lasing power of 20 W / V.A. Dimaki, V.B. Sukhanov, V.O. Troitskii, A.G. Filonov // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2012. – Vol. 55, No. 6. – P. 696–700.

17. Li L. Spatial-temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme / L. Li, D.V. Shiyarov, F.A. Gubarev // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2020. – Vol. 126, No 10. – Art. No. 155.

18. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. – 152 с.

19. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2: в 2 т. – Т. 2 / В.М. Батенин, П.А. Бохан, В.В. Бучанов, Г.С. Евтушенко, М.А. Казарян, В.Т. Карпухин, И.И. Климовский, М.М. Маликов. – М.: Физматлит, 2011. – 616 с.

Губарев Федор Александрович

Д-р техн. наук, доцент, профессор каф. паротурбинных установок (ПТУ) Севастопольского государственного ун-та (СевГУ)

Университетская ул., 33, г. Севастополь, Россия, 299053

ORCID: 0000-0002-7499-6109

Тел.: +7-978-681-65-72

Эл. почта: FAGubarev@mail.sevsu.ru

Gubarev F.A.

Multifunctional imaging system based on a laser and a brightness amplifier on copper bromide vapors

A multifunctional system meant to image the surface of energetic materials during combustion based on copper bromide vapor gain media is proposed. The system allows quickly implement various methods of active visualization and is based on a high-speed video camera, an illuminating laser, and a copper bromide vapor brightness amplifier. Depending on imaging needs, the main components of the system can be configured as a laser-illuminating system, a single-channel laser monitor, or a laser monitor with synchronous laser illumination. A high-voltage pulsed power supply allows connecting both one laser tube and two at the same time, while switching operating modes can be carried out on-the-fly. The source generates one or two synchronized sequences of high-voltage pulses for pumping gas-discharge tubes with a voltage of up to 6 kV and a frequency of 20 kHz. Due to the use of gas discharge tubes with independent control of temperature parameters, the operating modes with a pump power of 500–700 W for each channel can be realized. To generate pump pulses for laser media, a two-channel thyatron circuit for the direct discharge of storage capacitors were used, charged by a common stabilized voltage source provided by a step-down pulse stabilizer and a pulse shaper for charging storage capacitors based on a bridge inverter. A transistor modulator with adjustable delay lines carries out synchronization of the laser illumination and the brightness amplifier in the mode with synchronous laser illumination with an accuracy of ± 1 ns. The experimental data of the system operation in various modes are presented. The imaging results for the surface of mixtures of metal nanopowders during combustion, obtained with various configurations of the laser system, are presented.

Keywords: high-speed imaging, laser monitoring, pulsed laser illumination, high-temperature combustion, high-voltage power supply, synchronization.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-21-27

References

1. Sick V. High speed imaging in fundamental and applied combustion research. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, no 2, pp. 3509–3530.

2. Gromov A.A., Popenko E.M., Sergienko A.V., Slyusarsky K.V., Nalivaiko A.Yu., Ozherelkov D.Yu., Larionov K.B., Dzidziguri E.L. Characterization of aluminum powders: IV. Effect of nanometals on the combustion of aluminized ammonium nitrate-based solid propellants. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2021, vol. 46, no. 3, pp. 450–459.

3. Ehn A., Zhu J., Li X., Kiefer J. Advanced laser-based techniques for gas-phase diagnostics in combustion and aerospace engineering. *Applied Spectroscopy*, 2017, vol. 71, no. 3, pp. 341–366.
4. Chen Y., Gueldenbecher D.R., Hoffmeister K.N.G., Cooper M.A., Stauffacher H.L., Oliver M.S., Washburn E.B. Study of aluminum particle combustion in solid propellant plumes using digital in-line holography and imaging pyrometry. *Combustion and Flame*, 2017, vol. 182, pp. 225–237.
5. Huang H.W., Zhang Y. Analysis of the ignition process using a digital image and colour processing technique. *Measurement Science and Technology*, 2011, vol. 22, no. 7, Art no. 075401.
6. Glushkov D.O., Egorov R.I., Klepikov D.M. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 175, Art no. 121359.
7. Glushkov D., Nyashina G., Medvedev V., Vershinina K. Relative environmental, economic, and energy performance indicators of fuel compositions with biomass. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, vol. 10, no. 61, Art no. 2092.
8. Gromov A.A., Khabas, T.A., Ilyin, A.P., Popenko, E.M., Korotkikh, A.G., Arkhipov, V.A., Ditz, A.A., Strokova & Y.I., Tolbanova L.O. [Metal nanopowders combustion]. Tomsk, Deltaplan, 2008, 383 p. (in Russ.).
9. Zepper E.T., Pantoya M.L., Bhattacharya S., Marston J.O., Neuber A.A., Heaps R.J. Peering through the flames: imaging techniques for reacting aluminum powders. *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no 9, pp. 2535–2541.
10. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting. *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol. 85, Art no. 033111.
11. 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*. 2018. vol. 51, no 4, pp. 1–7.
12. Petrash G.G. [Optical systems with brightness amplifiers]. Moscow, Nauka, 1991, 152 p. (in Russ.).
13. Evtushenko G.S. Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes. New York, Nova Science Publishers, 2018. – 236 p.
14. Trigub M.V., Vasnev N.A., Evtushenko G.S. Bistatic laser monitor for imaging objects and processes. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2020, vol. 126, Art no. 33.
15. Gubarev F.A., Burkin E.Yu., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Li L. Two-channel system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, vol. 70, Art no. 9371760.
16. Dimaki V.A., Sukhanov V.B., Troitskii V.O., Filonov A.G. A stabilized copper bromide laser with computer-controlled operating modes and a mean lasing power of 20 W. *Instruments and Experimental Techniques*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 696–700.
17. Li L., Shiyonov D.V., Gubarev F.A. Spatial-temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2020, vol. 126, no. 10, Art no. 155.
18. Soldatov A.N., Solomonov V.I. [Gas-discharge lasers based on self-terminating transitions in metal vapors]. Novosibirsk: Nauka, 1985, 152 p. (in Russ.).
19. Batenin V.M., Bokhan P.A., Buchanov V.V., Evtushenko G.S., Kazaryan M.A., Karpukhin V.T., Klimovskii I.I., Malikov M.M. [Lasers on self-limiting transitions in metal atoms - 2. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit, 2011, 616 p. (in Russ.).

Fedor A. Gubarev

Doctor of Science in Engineering, Associate Professor,
 Department of Steam Plants, Sevastopol State University
 33, Universitetskaya st., Sevastopol, Russia, 299053
 ORCID: 0000-0002-7499-6109
 Phone: +7-978-681-65-72
 Email: FAGubarev@mail.sevsu.ru