

# ЛАЗЕРНЫЕ МОНИТОРЫ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ СРЕД НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ И ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

*Г. С. Евтушенко, Ф. А. Губарев, М. В. Тригуб, С. Н. Торгаев, Д. В. Шиянов, И. В. Красников*

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В статье обсуждается использование активной среды лазера на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов для визуализации объектов и быстропротекающих процессов, скрытых от наблюдения мощной фоновой засветкой. Применение покадровой регистрации изображений позволило наблюдать процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, термораскол стекла под действием излучения  $\text{CO}_2$  лазера, горение дуги постоянного тока в воздухе и в атмосфере аргона, процесс развития коронного разряда в воздухе.

## 1. Введение

Развитие многих областей науки и техники связано с применением мощных потоков энергии, которые взаимодействуют с различными объектами. К ним относятся плазмоиндуцированные процессы, модификация поверхностей изделий с целью улучшения эксплуатационных характеристик, получение новых материалов, в том числе, наноструктур, процессы, протекающие при термоядерном синтезе и т. д. Как правило, наблюдение подобных процессов в режиме реального времени затруднено вследствие мощной экранирующей засветки, яркостная температура которой достигает нескольких тысяч и даже десятков тысяч градусов. Использование активных оптических систем с усилителями яркости изображения позволяет наблюдать подобные процессы, благодаря высокой спектральной яркости активной среды лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов [1–4]. Одним из первых, кто предложил использовать подобные системы для наблюдения процессов, протекающих в условиях мощной фоновой засветки в режиме реального времени был И. И. Климовский [2]. Он же ввел термин лазерный монитор для подобных систем.

В докладе обсуждается использование активной среды лазера на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов для визуализации объектов и быстропротекающих процессов, скрытых от наблюдения мощной фоновой засветкой. Представлены методы и оборудование для визуализации и мониторинга быстропроте-

кающих процессов в режиме реального времени, с использованием разработанной аппаратуры покадровой регистрации. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития лазерных мониторов на основе активных сред на парах металлов и их применений для визуальной диагностики плазмы и газового разряда.

## 2. Техника эксперимента

В качестве усилителей яркости для активных оптических систем использовались активные элементы  $\text{CuBr}$ -лазера (газоразрядные трубки – ГРТ), изготовленные из кварца в лаборатории квантовой электроники ИОА СО РАН, с апертурой пучка излучения 2–5 см, длиной 40–50 см. В качестве буферного газа использовался неон, при давлении 30–50 тор. Накачка активных сред проводилась с использованием традиционной схемы накачки, либо схемы с импульсным зарядом накопительного конденсатора [5]. Длительность импульсов накачки составляла 100–150 нс, с частотой повторения импульсов 20–100 кГц. Для улучшения частотно-энергетических и пространственных характеристик пучка излучения (усиления) в среду вводилась активная примесь ( $\text{HBr}$ ), в количестве 0,1–0,3 тор [6]. Регистрация импульсов напряжения и тока разряда осуществлялась с помощью пробника напряжения Tektronix P6015A и датчика тока Pearson Current Monitors 8450, соответственно. Регистрация импульсов генерации осуществлялась с помощью коаксиального фотоэлемента типа ФК-22. Средняя мощность излучения фиксировалась дат-

чиками Ophir 20C-SH и Ophir 30C-SH. Для регистрации изображений, получаемых в активных оптических системах с усилителями яркости, применялись современные регистрирующие устройства – скоростные камеры Motion ProX3, с максимальной скоростью съемки до 40 тыс. кадров в сек. и Fastec HiSpec 1 со скоростью съемки до 100 тыс. кадров в сек. Монитор, в составе усилителя яркости, скоростной камеры, схемы покадровой регистрации изображений, построен по так называемой моностатической схеме. В этом случае, активный элемент является одновременно и источником сверхизлучения, освещающим объект, и усилителем яркости, отраженного излучения, переносящего изображение объекта [7, 8]. Тестирование лазерного монитора, проведенное на стандартных объектах: дифракционных решетках (600 штр./мм и 1200 штр./мм, камере Горяева, позволило установить пространственное разрешение – 1 мкм. А регистрация изображения от одного импульса сверхизлучения, длительностью кадра (40 нс) определила временное разрешение  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  сек (соответственно частоте повторения импульсов от 10 до 100 кГц). В качестве тестовых экспериментов по визуализации объектов и процессов, в условиях фоновой засветки, производилась визуализация процесса горения бенгальской свечи (случай собственной засветки) и металлической сетки, скрытой от наблюдения плазмой дуги постоянного тока (случай внешней засветки). Предельная температура засветки, оцененная в приближении черного тела, и экспериментально подтвержденная засветкой плазмой дуги постоянного тока с продувом аргоном, превышает 10000 К.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Применение лазерного монитора с покадровой регистрацией изображений позволило наблюдать процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), термораскол стекла под действием излучения  $\text{CO}_2$  лазера, процесс развития коронного разряда в воздухе и определить некоторые параметры указанных процессов.

#### 3.1. Визуализация процесса СВС

Первым реальным объектом исследования был выбран процесс структурных превращений, протекающих на поверхности образца при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС). Особенности данного процесса являются довольно высокая скорость протекания – фронт горения перемещается со скоростью до

10 см/сек и высокая яркостная температура (от 1500 К и выше). Все это создает ряд трудностей по наблюдению процессов непосредственно во время горения, т. е. в режиме реального времени. К моменту начала проведения работ, процесс горения визуализировался только с использованием, так называемого, режима лазерной подсветки. Работа проводилась совместно с сотрудниками отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН Кирдяшкиным А. И., Китлером В. Д., Юсуповым Р. А. На рис. 1 приведена типичная картина горения СВС-структуры, непосредственно на видеокамеру.



а)



б)



в)

Рис. 1. Процесс горения СВС-структуры, снятый непосредственно на скоростную камеру: а) начало горения, после зажигания, б) самостоятельное горение, в) окончание горения.

Очевидно, что проводить анализ структурных превращений, происходящих в процессе горения, при обычной визуализации невозможно. С использованием лазерного монитора были получены видеокadres процесса. Визуализация осуществлялась со скоростью 420 кадров/с. Результаты показаны

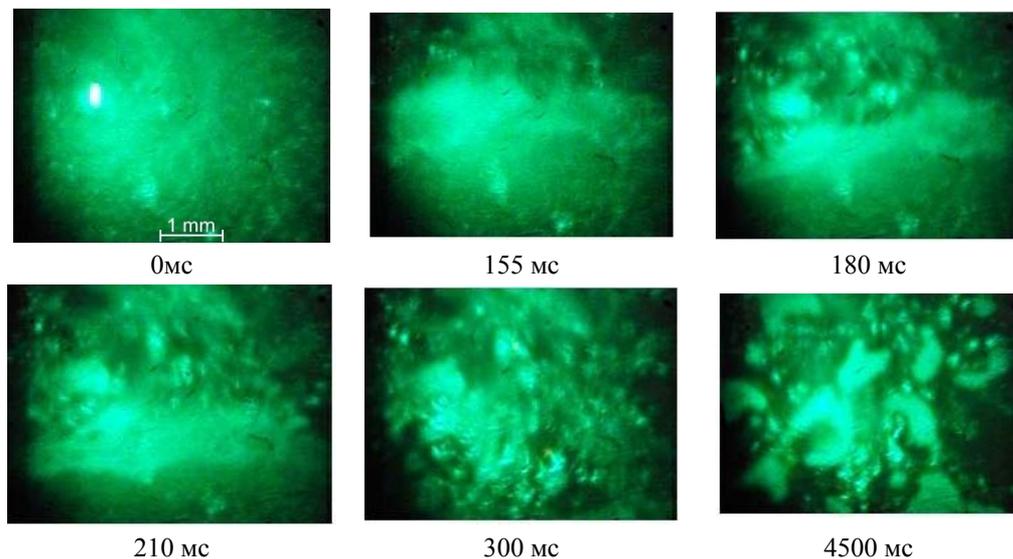


Рис. 2. Кадры процесса горения структуры  $\text{FeTiO}_3+\text{SiO}_2+\text{Si}+\text{Al}+\text{C}$ , визуализация процесса с помощью лазерного монитора (без покадровой регистрации)

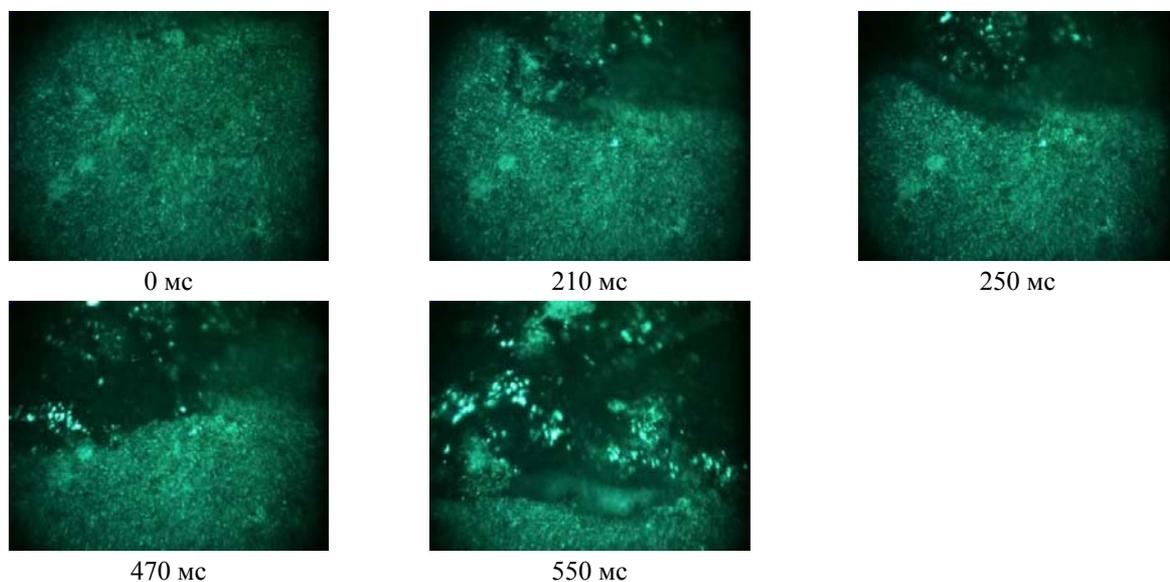


Рис. 3. Процесс горения СВС структуры «каолин» (в режиме покадровой регистрации)

на рис. 2, с временным разрешением относительно начала горения наблюдаемой области, поле зрения составляло  $5 \times 5$  мм. На кадрах видны характерные моменты процесса – начало горения (0 мс), синтез (155–300 мс) – процесс горения, для которого характерно наличие жидкой фазы и кристаллизация (4500 мс). Полученные результаты соответствуют данным, представленным в [9], позволяют проводить анализ структурных превращений при различной фазе протекания процесса. Полученные кадры позволяют проводить оценку скорости протекания процесса, что так же является весьма важной характеристикой для СВС.

Использование режима покадровой регистрации позволило выявить особенности горения

СВС-структуры. Видно, что горение протекает неравномерно (рис. 3). На начальном этапе происходит «всасывание» поверхностного материала (движение вверх) и образование поры. Далее происходит прогрев следующего участка структуры. Процесс повторяется ниже, спустя определенное время. Временная задержка, возможно, обусловлена повышением температуры от центра к поверхности и определяется толщиной образца.

Скорость синтеза, определенная с использованием изображений, полученных в лазерном мониторе, составляет 0,22 см/сек. Положение фронта определялось исходя из анализа изображений по характерным изменениям яркости пикселей. В работе [9] скорость горения данной смеси, измерен-

ная стандартизованным методом, составила 0,23 см/сек, что свидетельствует о возможности использования изображений, получаемых в лазерном мониторе, для определения скорости протекания процессов СВС. Использование лазерных мониторов на основе  $\text{CuVt}$ -лазера с покадровой регистрацией изображения для визуализации процессов СВС, позволяет получить новые фундаментальные данные о физических процессах, протекающих в зоне горения, оптимизировать полученные материалы с заданными свойствами с целью энерго- и ресурсосбережения, провести анализ механизмов структурных и химических превращений веществ, при протекании СВС неорганических соединений.

### 3.2. Взаимодействие излучения $\text{CO}_2$ -лазера со стеклом

Следующим этапом стала визуализация процессов, протекающих при воздействии лазерного излучения на объект. Наблюдался процесс взаимодействия  $\text{CO}_2$  лазера со стеклом. Непрерывное излучение, мощностью 20 Вт, фокусировалось на стеклянной подложке в пятно, диаметром 1 мм. Плотность мощности излучения в зоне взаимодействия составила  $2 \text{ кВт/см}^2$ . Процесс взаимодействия излучения  $\text{CO}_2$  лазера со стеклом сопровождается образованием плазмы. Температура засветки, в предположении черного тела, определена по закону смещения Вина. Для этого спектр засветки снимался с помощью USB спектрометра фирмы Ocean Optics USB4000 – VIS – NIR – ES, диапазон измерений от 350 нм до 1000 нм. Исходя из спектра, оценочное значение температуры в зоне взаимодействия составило 3600 К.

Результаты визуализации показаны на рис. 4, поле зрения составляло  $2 \times 2 \text{ мм}$ . Засветка не оказывает влияния на качество изображения, отчетливо видны изменения, происходящие в зоне воздействия – образование жидкой фазы (а, б, в) и термораскол (г).

Полученные в данном эксперименте результаты согласуются с результатами работы [10], по визуализации процесса плавления графика излучением твердотельного лазера. Подобная картина наблюдается и при визуализации процесса лазерной сварки [11].

### 3.3. Визуализация коронного разряда в воздухе

Процессы, происходящие при коронном разряде с электродов в виде острия, могут быть подобны тем, которые наблюдаются в стримерной короне лидера молнии и детально исследуются в Институте сильноточной электроники СО РАН (см., например, [12]).

Для получения дополнительной информации и уточнения результатов, полученных с помощью скоростной визуализации, совместно с научной группой профессора Тарасенко В. Ф., было решено провести визуализацию разряда с помощью лазерного монитора. Для увеличения контраста получаемых изображений в схему было введено зеркало (за объектом-разрядом), что позволило реализовать схему лазерного монитора в проходящем свете. Скорость съемки составляла 2665 кадр./с, при этом каждый кадр формировался за время, соответствующее длительности импульса сверхсветимости усилителя яркости, т. е. 40 нс. На рис. 5 приведены первые 4 кадра развития разряда

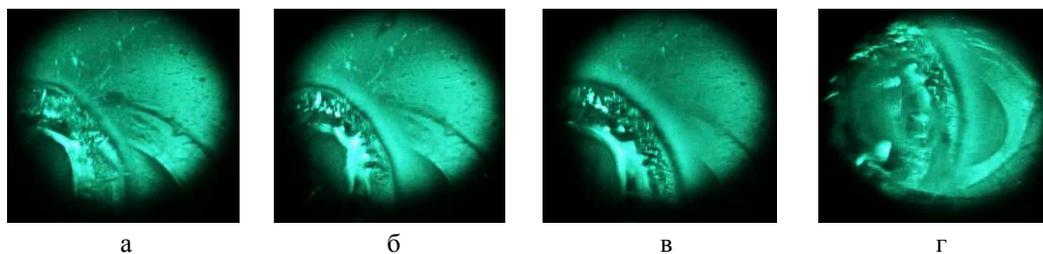


Рис. 4. Модификация поверхности стекла при воздействии излучением  $\text{CO}_2$  лазера

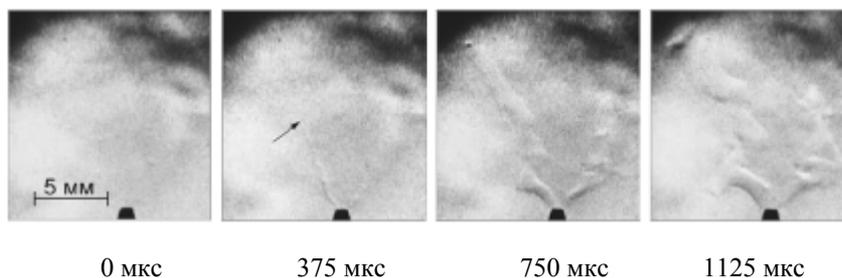


Рис. 5. Коронный разряд в воздухе

(до 1,125 мс). Ввиду относительно малой области зрения анализировался лишь начальный этап развития разряда (первые два кадра). На втором кадре (375 мкс) наблюдается отображение градиента плотности воздуха, связанное с формированием диффузного канала, окончание которого указано стрелкой. Длина канала составляет 6–12 мм. Исходя из этого, можно оценить скорость распространения диффузного канала, которая составила 1630 см/с. Данное значение на порядок выше скорости теплового расширения канала, рассчитанной по результатам скоростной съемки процесса, но ниже скорости прорастания канала.

### Заключение

Применение лазерного монитора с покадровой регистрацией изображений позволило наблюдать процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, протекающего со скоростью ~0,2 см/сек, термораскол стекла под действием излучения CO<sub>2</sub> лазера, горение дуги постоянного тока в воздухе и в атмосфере аргона. С помощью лазерного монитора наблюдался также процесс развития коронного разряда в воздухе. Применение данного средства диагностики позволило наблюдать процесс распространения диффузного канала, и определить его некоторые численные параметры.

К обсуждению предлагаются перспективы дальнейшего развития лазерных мониторов на основе активных сред на парах металлов и их применений для исследования физики плазмы и газового разряда.

Авторы признательны сотрудникам лаборатории квантовой электроники ИОА СО РАН и кафедры ПМЭ ТПУ, снс ФИ РАН Земскову К. И. за проявленный интерес к работе и полезные дискуссии.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда, проект № 14-19-00175.

### Список литературы

1. Земсков К. И., Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г. Лазерный проекционный микроскоп // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 1. С. 14–15.
2. Батенин В. М., Климовский И. И., Селезнева Л. А. Исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения // Доклады АН СССР. 1988. Т. 303. № 4. С. 857–860.
3. Бужинский Р. О., Савранский В. В., Земсков К. И., Исаев А. А., Бужинский О. И. Наблю-

дение объектов в условиях сильной фоновой засветки от плазмы // Прикладная физика. № 3. 2009. С. 96–98.

4. 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 // Review of Scientific Instruments. 2014. Vol. 85, N 3. P. 033111–033115.

5. Димаки В. А., Андриенко О. С., Троицкий В. О. и др. Лазер на парах бромида меди малой мощности // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 11. С. 890–894.

6. Шиянов Д. В., Евтушенко Г. С., Суханов В. Б., Федоров В. Ф. Влияние состава газовой смеси и условий накачки на характеристики CuBr+Ne+H<sub>2</sub>(HBr)- лазера // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 1, С. 49–52.

7. Тригуб М. В. Лазерный монитор для неразрушающего контроля изделий и визуализации быстропротекающих процессов в условиях фоновой засветки: Дис... канд. техн. наук. Томск, 2013. С. 157.

8. Патент РФ № 2463634. Лазерный проекционный микроскоп (варианты) / Тригуб М. В., Евтушенко Г. С., Губарев Ф. А., Торгов С. Н. 2013 г.

9. Юсупов Р. А., Максимов Ю. М., Китлер В. Д. Закономерности технологического горения порошковых систем на минеральной основе при получении пористых композиционных материалов // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 5. С. 85–89.

10. Абрамов Д. В., Аракелян С. М., Галкин А. Ф., Квачева Л. Д., Климовский И. И., Кононов М. А., Михалицын Л. А., Кучерик А. О., Прокошев В. Г., Савранский В. В. Плавление углерода, нагреваемого сконцентрированным лазерным излучением в воздухе при атмосферном давлении и температуре, не превышающей 4000 К. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. № 5. С. 315–319.

11. Yermachenko V. M., Kuznetsov A. P., Petrovskiy V. N., Prokopova N. M., Streltsov A. P., Uspenskiy S. A. Specific features of the welding of metals by radiation of high-power fiber laser // Laser physics. 2011. Vol. 21. N 8. P. 1530–1537.

12. Козырев А. В., Кожевников В. Ю., Костыря И. Д., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф., Шитц Д. В. Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 1009–1017.