

УДК 621.373.8

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ЛАЗЕРНОГО
МОНИТОРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**Е.З. Дашинимаева¹, М.В. Тригуб^{1,2}, Г.С. Евтушенко¹¹Томский политехнический университет²Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

E-mail: trigub@tpu.ru

Дашинимаева Евгения Зориктуевна, магистрант кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: zhen_da@mail.ru

Область научных интересов: системы управления с обратной связью, обработка изображений, математическое моделирование.

Тригуб Максим Викторович, инженер, ассистент кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: trigub@tpu.ru

Область научных интересов: активные оптические системы, системы управления, источники питания лазеров, физика лазеров.

Евтушенко Геннадий Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ime@tpu.ru

Область научных интересов: физика лазеров, применение лазеров.

Предложены аппаратные методы улучшения качества и достоверности изображений, получаемых в лазерном мониторе. Предложен и апробирован алгоритм определения перемещений объектов по изображениям, полученным в лазерном мониторе.

Ключевые слова:

Лазерный монитор, активная оптическая система, определение перемещения.

Одним из перспективных применений активных сред лазеров на парах металлов (ЛПМ) и их галогенидов является использование их в качестве усилителей яркости в активных оптических системах. Подобные устройства (лазерный проекционный микроскоп, лазерный монитор) позволяют наблюдать процессы, протекающие в условиях широкополосной фоновой засветки [1, 2]. Например, в работе [3] показана возможность наблюдения процесса лазерной сварки, осуществляемой силовым воздействием мощного 10 кВт волоконного лазера, таким устройством, созданным на базе лазера на парах меди. Визуализация процесса сварки лазерным монитором позволила выявить ряд параметров, определяющих качество сварного шва, что было невозможно сделать с помощью обычных методик.

Работы по исследованию и применению систем с усилителями яркости на парах металлов начались в семидесятых годах, и со временем интерес к ним пропал. Однако с созданием ЛПМ с высокой частотой следования импульсов (до 100 кГц и выше) и появлением современных высокоскоростных регистраторов (CCD-камер) становился возможным визуализации процессов, протекающих в условиях мощной фоновой засветки с высоким временным разрешением. Фон, который оказывается «прозрачным» для излучения лазера на парах бромида меди, по разным оценкам соответствует температуре черного тела 25...50 тыс. К [4], что свидетельствует о достаточно обширной области применения таких систем.

Основным недостатком работ по использованию активных оптических систем с усилителями яркости для наблюдения быстропротекающих процессов [1–3] является асинхронная работа активного элемента лазера и регистрирующей аппаратуры. Это приводит к снижению временного разрешения системы и искажению получаемых изображений за счет того, что каждое изображение формируется несколькими импульсами сверхсветимости, попадающими в экспозицию камеры. Для устранения данных недостатков была предложена схема покадровой регистрации. Достоинства метода покадрового режима показаны в работе [5], однако, из-за особенностей схемной реализации, предложенный вариант имел ограничения в применении. Формирование синхроимпульса необходимо производить до импульса генерации лазера, т. к. задержка между импульсом управления (являющимся входным для системы синхронизации) и

импульсом генерации лазера может быть любой и определяется особенностями схемы, например, джиттером тиратрона. К тому же, длительность импульса генерации (сверхсветимости) составляет 40...60 нс, что требует точного позиционирования момента открытия затвора. Так же необходимо учесть задержку отклика камеры на запускающий импульс, которая зависит от типа камеры (типовое значение до 1 мкс). Кроме того, необходимо учитывать наличие высокочастотных помех, создаваемых источником накачки оптического усилителя, и обеспечить его развязку с системой регистрации. Учет всех перечисленных выше особенностей необходим для создания универсальной системы синхронизации.

В большинстве работ использован лазер на парах меди, частота работы которого ниже, чем у лазера на парах бромида меди [6]. Поэтому, для получения лучшего временного разрешения, предлагается использование активной среды лазера на парах бромида меди. Однако усилительные характеристики данной среды сильно зависят от концентрации рабочего вещества в активной зоне, определяемой температурой генератора бромида меди и стенки ГРТ (газоразрядной трубки) [7].

При математической обработке изображений яркость конкретных пикселей является основным параметром. В случае, если она будет меняться не только из-за изменений объекта наблюдения, но и из-за «нестационарности» работы лазерного усилителя, снижается достоверность полученных результатов. Следовательно, для получения изображений с минимальными искажениями требуется стабилизация концентрации рабочего вещества в активном объеме.

Используемые в лаборатории квантовой электроники (ЛКЭ) ИОА СО РАН, г. Томск, регуляторы температуры ячейки рабочего вещества обеспечивают стабилизацию на уровне ± 15 К, что существенно влияет на генерационные характеристики лазера (коэффициент усиления, мощность излучения, КПД) [7]. Для стабилизации усилительных характеристик активной среды лазера нами предложена система стабилизации температуры, построенная по схеме двухпозиционного регулятора на базе микроконтроллера. Данный подход обеспечивает простоту настройки регулятора на объекте регулирования. Также наличие контроллера позволяет быстро адаптировать регулятор (изменяя его структуру) под конкретный объект управления с помощью несложных операций конфигурирования. Система проверялась на нагревателе отрезков с бромидом меди максимальной мощностью 250 Вт. В качестве образцовых измерителей температуры использовали ртутный термометр СП-76 (для калибровки по абсолютному значению) и термопарный электронный термометр CENTER 307 (для регистрации отклонения от установочной температуры). Кроме этого были проверены и регуляторы стабилизации температуры, используемые сегодня в ЛКЭ ИОА СО РАН. Так, регулятор фирмы ИТМ обеспечивает худшую стабилизацию температуры, тогда как у регулятора РМП-1 отклонения от установочного значения уже в два раза меньше. Но его недостаток – высокая стоимость.

Отклонения фиксировались не только в статическом режиме, но и при изменении нагрузки (изменялся теплообмен с окружающей средой). При этом отклонение температуры для всех случаев у разработанного устройства не превышало $\pm 1,5$ °С, в первые моменты времени наблюдалось перерегулирование.

Следующий аппаратный метод улучшения качества получаемых изображений – система синхронизации лазерного монитора. Она обеспечивает корректную работу с любыми усилителями яркости и различными скоростными камерами без дополнительной калибровки. Система синхронизации представляет собой ждущий мультивибратор, в качестве формирователя импульса в котором используется микроконтроллер. Благодаря этому могут варьироваться параметры синхроимпульса: частота, длительность, задержка относительно импульса управления высоковольтным источником возбуждения усилителя. Алгоритм программы написан на языке Assembler, что увеличивает скорость работы и, как результат, минимальный джиттер синхроимпульса. Позиционирование синхроимпульса относительно задающего сигнала осуществляется с помощью многооборотного потенциометра и встроенного АЦП (аналогово-цифрового преобразователя) микроконтроллера.

Для экспериментов с системой синхронизации был использован лазерный монитор на основе усилителя яркости на парах бромида меди. Длина активной зоны составляла 900 мм, диаметр 50 мм, частота следования импульсов 21 кГц, длительность импульса сверхсветимости 47 нс. В качестве регистратора использовались скоростные камеры FastecHiSpec 1, со скоро-

стью съемки до 100000 кадров/сек. и MotionProX3 со скоростью съемки до 40000 кадров/сек. На рис. 1 представлены результаты визуализации тестового образца, а также осциллограммы синхроимпульса, импульса сверхсветимости и импульса экспозиции камеры. Видно, что при использовании системы синхронизации в каждый импульс накачки лазера попадает один импульс сверхсветимости лазерного усилителя.

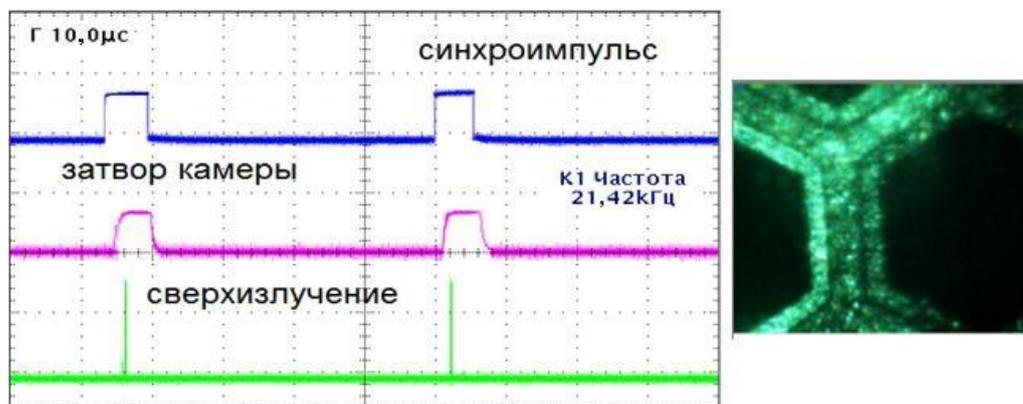


Рис. 1. Результаты визуализации тестового образца и диаграммы работы системы

Как отмечалось выше, основным достоинством лазерных мониторов является возможность наблюдения процессов, экранированных фоновой засветкой. В качестве демонстрации возможностей разработанной системы и возможностей лазерного монитора визуализирован процесс горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) структуры, горение которой отличается высокой скоростью пробега спина. Следовательно, для минимизации искажений необходима малая длительность экспозиция. При покадровом режиме кадр формируется одним импульсом сверхсветимости, следовательно, экспозиция будет составлять порядка 50 нс. Результат визуализации представлен на рис. 2.

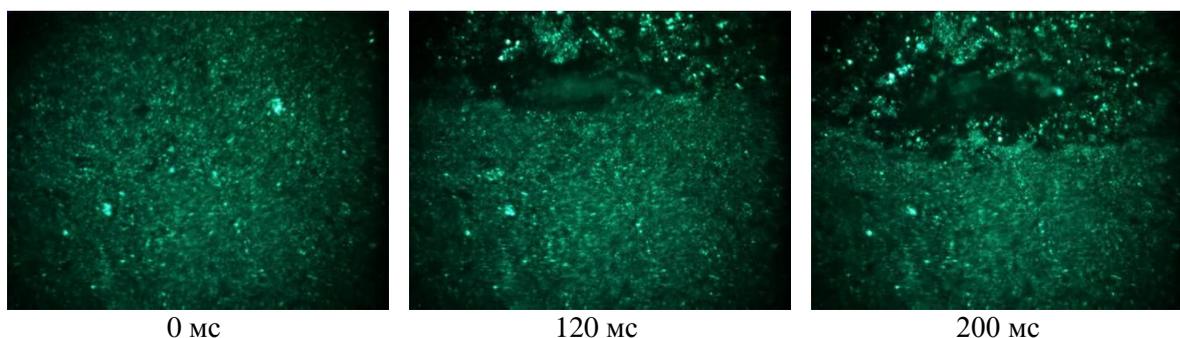


Рис. 2. Процесс горения СВС структуры

Одним из параметров, которые можно определить по полученным изображениям, является скорость распространения теплового фронта.

Для демонстрации возможностей автоматизированного определения перемещений по изображениям, полученным с помощью лазерного монитора с указанными выше аппаратными методами оптимизации параметров, проведен следующий эксперимент. Получены изображения периодического объекта с высоким контрастом – металлическая сетка, которая управляемо перемещалась. Для математической обработки было решено использовать пакеты Matlab, а так же ImageJ.

Алгоритм определения вектора перемещения изображения состоит из следующих основных операций:

- Разбиение начального изображения на несколько расчетных областей (области интереса) равного размера. Разбиение следующего изображения на области возможного перемещения областей интереса большего размера;
- Расчет нормированной корреляционной функции;

- Нахождение максимума корреляционной функции;
- Нахождение координаты области интереса в области возможного перемещения и построение вектора перемещения.

Смещение между вторым и первым кадрами изображения находится с помощью встроенной функции MATLAB, нормированной двумерной функции взаимной корреляции. Данная функция вычисляет нормированную взаимную корреляцию двух матриц разного размера. При этом значения исходной матрицы не должны быть все одинаковыми. Результирующая матрица содержит корреляционные коэффициенты, которые представляют собой числа в диапазоне от -1,0 до 1,0. По этой матрице производится поиск максимального корреляционного пика, отвечающего наиболее вероятному смещению в области. Поскольку изображение представляется в виде конечного числа элементов, найденное положение максимума будет иметь целочисленные координаты в пикселях. Далее находим координату левого верхнего угла области интереса в области возможного перемещения и с помощью простых математических вычислений находим расстояние перемещения области в координатах $[x, y]$, строим вектор перемещения на изображении.

Используя данный алгоритм вычисления, было проанализировано перемещение объекта. На рис. 3 показаны результаты проведенной работы. Измерялось расстояние, на которое переместился объект наблюдения (рис. 3, б) относительно первого кадра (рис. 3, а). На рисунке показаны начальные координаты областей интереса и конечные координаты.

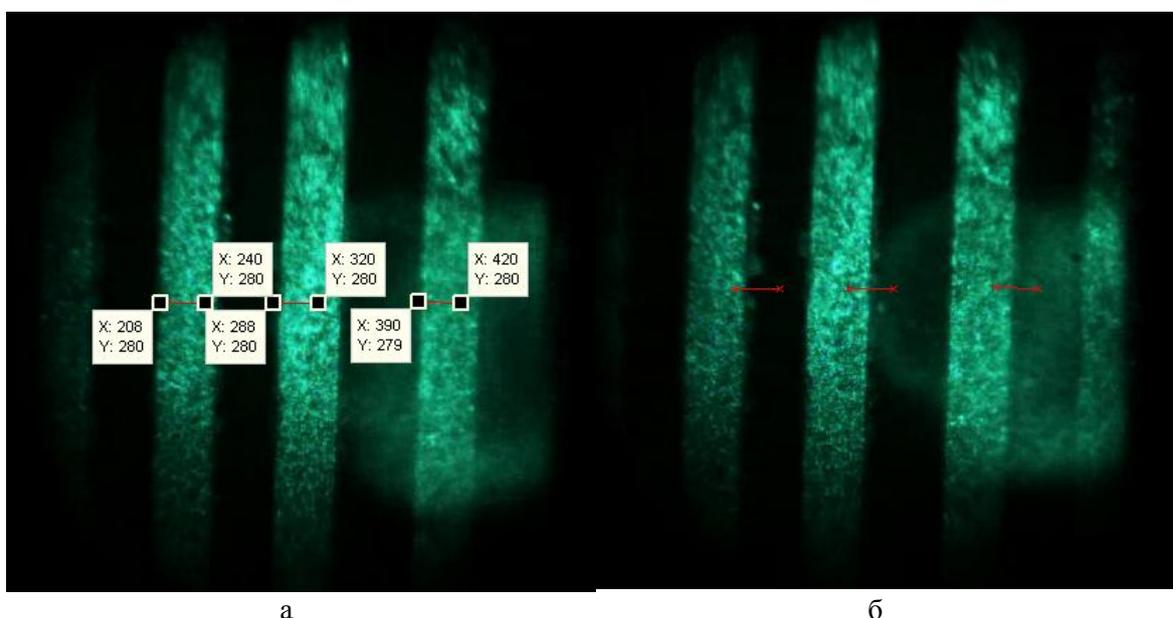


Рис. 3. Изображение двух кадров перемещения тестового объекта

Среднее расстояние перемещения объекта составляет 32 пикселя. Различные перемещения для каждой области интереса объясняются тем, что ячейки выбираются в различных областях кадра. При этом само изображение является не идеальным, присутствуют искажения (наличие неравномерного фона, блика от линзы, неравномерность профиля усиления), к тому же от кадра к кадру изменяется яркость пикселей.

Для проверки полученных результатов перемещение объекта измерялось вручную по характерной области – край грани. В программе ImageJ строились зависимости яркости пикселей для центральной области. Результаты показаны на рис. 4, а, б, соответственно, для начального и конечного изображения. Перемещение составляет 33 пикселя, что хорошо согласуется с данными, полученными при матобработке.

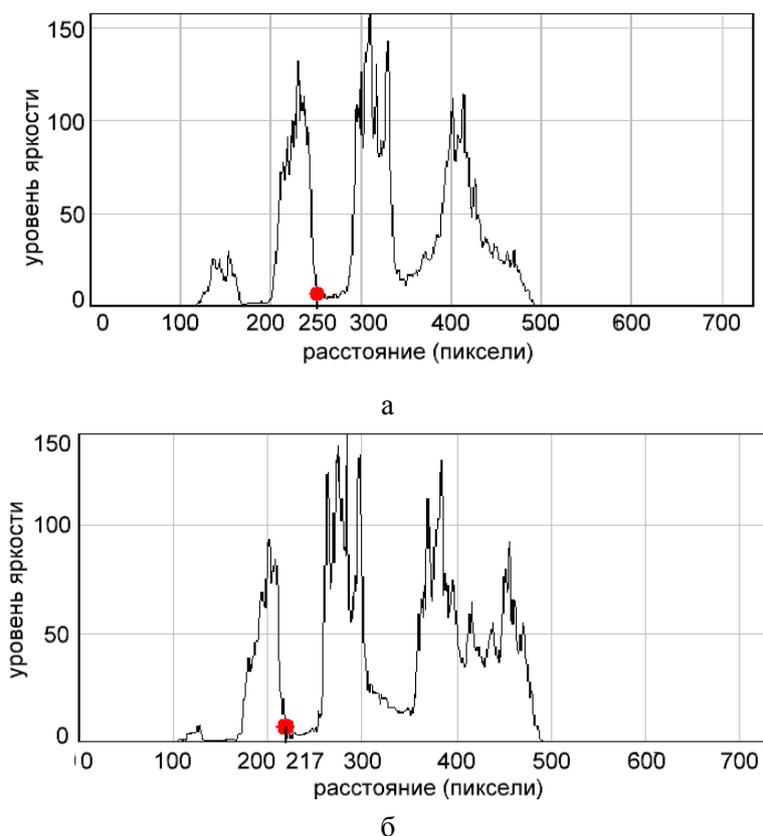


Рис. 4. Измерение расстояние перемещения объекта в среде ImageJ

Таким образом, в работе описаны методы оптимизации работы лазерного монитора с целью улучшения качества и достоверности получаемых изображений. Для стабилизации усилительных характеристик предложено устройство, обеспечивающее относительно высокую стабильность температуры генератора бромида меди лазерного усилителя и, следовательно, концентрацию рабочего вещества в активном объеме. Для получения изображений, формируемых одиночным импульсом сверхсветимости лазерного усилителя, предложена универсальная система синхронизации с возможностью работы с различными усилителями и скоростными регистраторами. Методы оптимизации обеспечили получение изображений, качество которых позволяет проводить математическую обработку с достаточно высокой точностью.

Предложенный алгоритм обработки изображений может быть использован для определения скоростей перемещения объектов либо развития процессов.

Авторы работы выражают благодарность Рогожину К.В. за участие в работе, Китлеру В.Д., Юсупову Р.А. за помощь в проведении экспериментов с СВС-структурами. Работа выполнена при поддержке Госзадания РФ № 7.586.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бужинский Р.О., Савранский В.В., Земсков К.И., Исаев А.А., Бужинский О.И. Наблюдение объектов в условиях сильной фоновой засветки от плазмы // Прикладная физика. – 2009. – № 3. – С. 96–98.
2. Абрамов Д.В., Галкин А.Ф., Жаренова С.В., Климовский И.И., Прокошев В.Г., Шаманская Е.Л. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло- и пироуглерода // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 97–101.

3. 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. – V. 21. – № 8. – P. 1530–1537.
4. Торгаев С.Н., Тригуб М.В., Губарев Ф.А. Оценка возможностей лазерного монитора на парах бромида меди при наблюдении яркосветящихся объектов // *Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т.* – Томск, 2011, 18–22 апреля. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – Т. 1. – С. 260–262.
5. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображений // *Контроль. Диагностика*. – 2011. – Вып. Специальный. – С. 140–143.
6. Nekhoroshev V.O., Fedorov V.F., Evtushenko G.S., Torgaev S.N. Copper bromide vapor laser with a pulse repetition rate up to 700 kHz // *Quantum Electronics*. – 2012. – V. 42. – № 10. – P. 877–879.
7. Лазеры на парах металлов и их галогенидов // *Труды ФИАН.–Т.–181.* – М.: Наука.–1987. – С. 192.

Поступила 19.11.2012 г.