

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.373.8

Исследование искажений, вносимых усилителем яркости на парах бромида меди, в формируемые лазерным монитором изображения

М.В. Тригуб^{1,2}, М.В. Бурков^{2,3}, П.С. Любутин^{2,3}, С.Н. Торгаев^{1,2*}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

² *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

³ *Институт физики прочности и материаловедения
634021, г. Томск, пр. Академический, 2/1*

Поступила в редакцию 14.07.2016 г.

Представлены результаты оценки качества изображений, получаемых при визуализации объектов с использованием активных сред лазеров на парах бромида меди. Исследования проводились для двух методов визуализации: лазерной подсветки и лазерного мониторинга, когда активная среда является усилителем яркости изображения. Оценка качества выполнялась с использованием стандартных численных показателей — среднеквадратичной ошибки MSE, информационной энтропии H и коэффициента корреляции ZNCC. Показано, что использование активной среды в качестве усилителя яркости приводит к некоторым искажениям получаемых изображений, которые зависят от стабильности усилительных характеристик активной среды. В режиме лазерной подсветки влияние нестабильности менее выражено. Применение визуализации в «покадровом» режиме позволяет снизить искажения, вносимые активной средой.

Ключевые слова: CuBr-лазер, лазерный монитор, скоростная визуализация, качество изображений; CuBr laser, laser monitor, high-speed visualization, image quality.

Введение

В последние годы активно ведутся исследования процессов в областях взаимодействия высококонцентрированных потоков энергии с веществом. Отличительными особенностями таких процессов являются малая область взаимодействия, высокая скорость протекания и наличие экранирующей засветки. Примерами могут служить лазерные методы получения наноматериалов, лазерная сварка и резка, модификация свойств поверхности и др. Визуализация области взаимодействия возможна с использованием различных лазерных методик [1], одной из которых является активная оптическая система с усилителем яркости на парах бромида меди [2, 3]. За счет высокой спектральной яркости излучения (усиления) активных лазерных сред на парах металлов достигается фильтрация оптического сигнала от фоновой засветки. Расчеты показывают, что такая система позволяет наблюдать процессы, экранированные фоновой засветкой с яркостной температурой свыше 10^3 К, а также процессы, экранированные высокотемпературной плазмой [4, 5].

Лазерный монитор позволяет получать оптические изображения объектов, но наличие усиливающей среды в оптической схеме приводит к их искажениям, которые зависят от многих факторов, таких как уровень входного сигнала усилителя яркости, режим его работы — частота, концентрация паров рабочего вещества, частота следования импульсов и т.д. Для снижения этих искажений необходимо иметь информацию о влиянии параметров активного элемента и режима съемки на получаемые изображения.

Целью работы является исследование качества изображений, получаемых с помощью CuBr-лазера при различных режимах работы — лазерной подсветке и использовании среды в качестве усилителя яркости изображения. Поставленная задача является достаточно важной для развития активных оптических систем с усилителями яркости, так как определение оптимального режима работы позволит снизить искажения, вносимые средой, что повысит достоверность получаемой оптической информации.

Экспериментальная установка

Объект визуализировался в схеме лазерного монитора [6], включающей в себя усилитель яркости на парах бромида меди, оптику, формирующую изображения объекта наблюдения, цифровую каме-

* Максим Викторович Тригуб (trigub@tpu.ru); Михаил Владимирович Бурков (burkovispms@mail.ru); Павел Сергеевич Любутин (psl@sibmail.com); Станислав Николаевич Торгаев (torgaev@tpu.ru).

ру Point Gray Grasshopper 2 с разрешением 5 Мп для регистрации изображения. Система синхронизации [2], входящая в схему лазерного монитора, дает возможность работать в «покадровом режиме», когда кадр формируется одним импульсом сверхсветимости и регистрируется камерой. Изменение экспозиции камеры позволяет осуществлять регистрацию изображений, сформированных различным числом импульсов излучения усилителя яркости. В работе использовались два активных элемента на парах бромида меди – большого и малого объема, длина и диаметр газоразрядных труб (ГРТ) которых были 90 и 5 см у первого элемента (ГРТ 1) и 40 и 2 см у второго (ГРТ 2). В качестве тестового объекта была выбрана металлическая монета. Для формирования изображения применялось сферическое зеркало с радиусом кривизны 12 см, что позволило избежать появления паразитных бликов, вызванных отражением от граней объективов.

Результаты экспериментов

Путем изменения длительности экспозиции камеры (выбирали значения экспозиции $t = f \cdot N$, где f – частота работы усилителя яркости; N – количество импульсов) регистрировались изображения, формируемые разным количеством импульсов – от 1 до 100. Для каждого значения выдержки регистрировали серии из 150 изображений, записываемых последовательно, без задержки.

Для предварительной оценки всех изображений в серии рассчитывали среднюю яркость каждого из них. Был осуществлен поиск ближайших по средней яркости изображений (I_{mean}). После определения списка 10 ближайших по яркости из них формировали усредненное изображение, которое далее было использовано для расчета информативных параметров. Было разработано программное обеспечение, которое рассчитывает следующие параметры: среднеквадратичную ошибку MSE (mean square error), информационную энтропию H (Shannon entropy) и коэффициент корреляции ZNCC (zero-mean normalized cross correlation).

На начальном этапе была проведена визуализация объекта в режиме лазерной подсветки, для которой использовалась ГРТ 1 с плоскопараллельным резонатором. На рис. 1 приведены информативные параметры, рассчитанные для данного режима, который характеризуется монотонным изменением средней яркости (рис. 1, а) изображения при увеличении выдержки (а соответственно, и количества импульсов генерации, формирующих изображение). Зависимость информационной энтропии H , рассчитанной для усредненного изображения, имеет схожий характер с зависимостью средней яркости. Максимум среднеарифметического MSE (рис. 1, б) для данной серии равен 14 (при 40 импульсах генерации), а коэффициент корреляции для данной точки – 0,99835. Для оценки лазеров и режимов работы также анализировали значения при 10 импульсах: для данной серии значения MSE и ZNCC равны соответственно 2,92 и 0,99547.

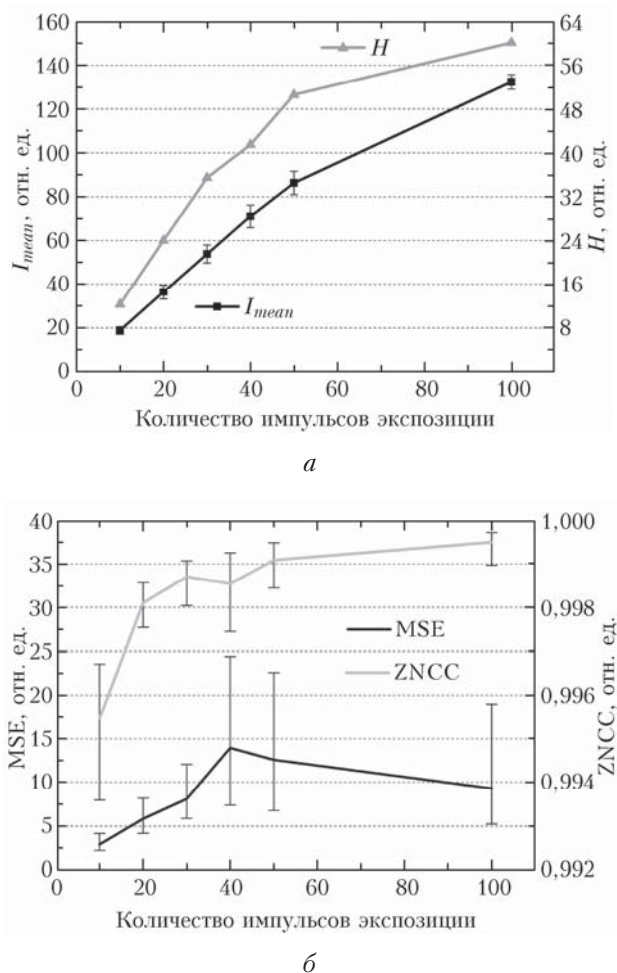
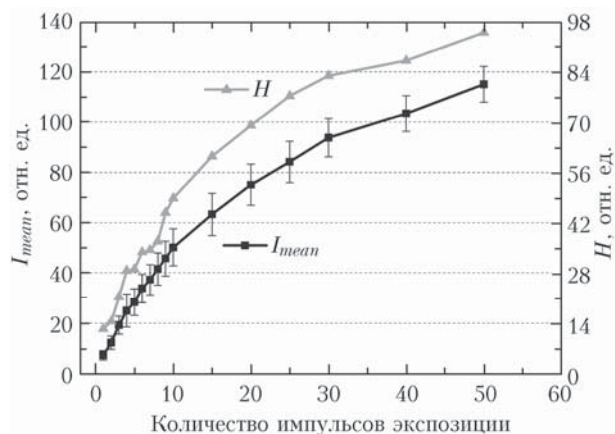
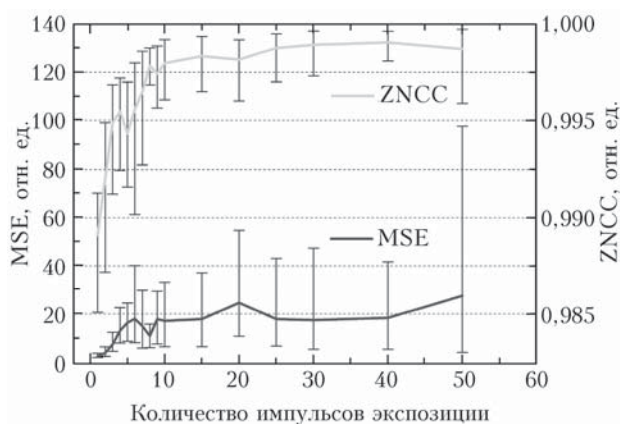


Рис. 1. Зависимость информативных параметров от количества импульсов генерации: а – значений средней яркости I_{mean} , рассчитанных по сериям из 150 изображений, и энтропии H изображения, усредненного по 10 наиболее близким по яркости изображениям; б – среднеарифметических значений MSE и ZNCC для 10 наиболее близких по яркости изображений (указан разброс по серии)

На следующем этапе проводилась визуализация объекта в схеме лазерного монитора, когда активный элемент (ГРТ 1) использовался в качестве усилителя яркости. На рис. 2, а представлены результаты расчета значений средней яркости и энтропии для данного режима визуализации при открытом положении диафрагмы камеры, регистрирующей изображение. На первом участке (до ~10 импульсов) рост яркости практически линейный, на втором участке нелинейность обусловлена постепенной засветкой изображения. Закрытие диафрагмы объектива позволило устранить засветку, зависимость вновь приобрела линейный характер, вплоть до 50 импульсов (для значения 100 импульсов изображение опять немного засветилось). Зависимости информативных параметров для данной серии показаны на рис. 3, а. Зависимость информационной энтропии, как и для режима подсветки, практически полностью повторяет характер поведения средней яркости.



а



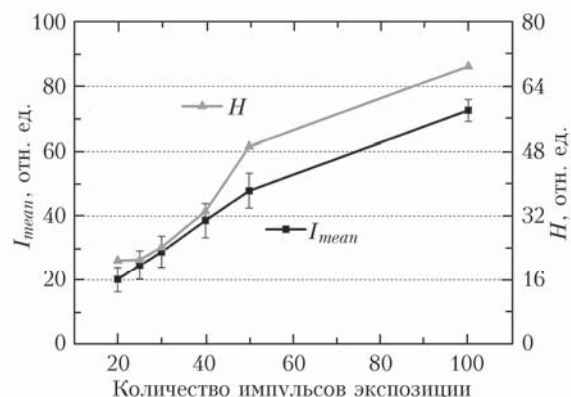
б

Рис. 2. Зависимость от количества импульсов генерации: а – значений средней яркости I_{mean} , рассчитанных по сериям из 150 изображений, и энтропии H изображения, осредненного по 10 наиболее близким по яркости изображениям; б – среднеарифметических значений MSE и ZNCC для 10 наиболее близких по яркости изображений (указан разброс по серии)

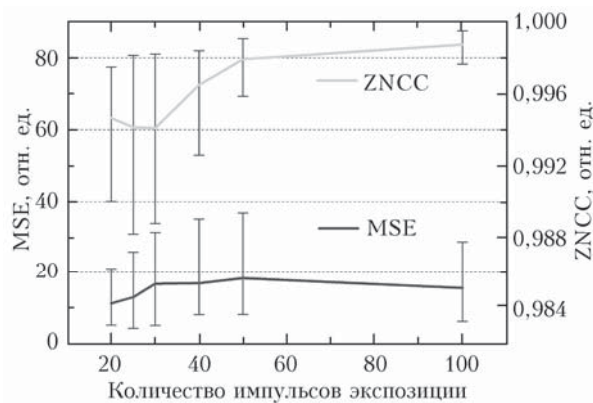
Для лазерного монитора вследствие искажений, вносимых рабочей средой газового лазера, значения максимумов среднеарифметического MSE (рис. 2, б и рис. 3, б) для 10 изображений, а также и разброс минимального и максимального были выше: так для 40 импульсов MSE составило 18,3, а при закрытой диафрагме 16,8. Коэффициент корреляции при этом – 0,99905 для открытого и 0,99648 для закрытого положения диафрагмы.

Следующим этапом было исследование искажений, вносимых усилителем яркости ГРТ 2: графики исследуемых параметров приведены на рис. 4. При 50 импульсах генерации изображение еще не засвечивается, поэтому рост средней яркости в целом практически линейен. Однако работа данного лазера сопровождалась как наибольшими колебаниями яркости, так и геометрическими искажениями пучка, что заметно в виде скачков (или, наоборот, постоянства значений), приводящих к отклонению от линейности поведения средней яркости и информационной энтропии. Связано это с осо-

бенностью активного элемента – отсутствием активного термостабилизатора температуры стенки ГРТ 2.



а

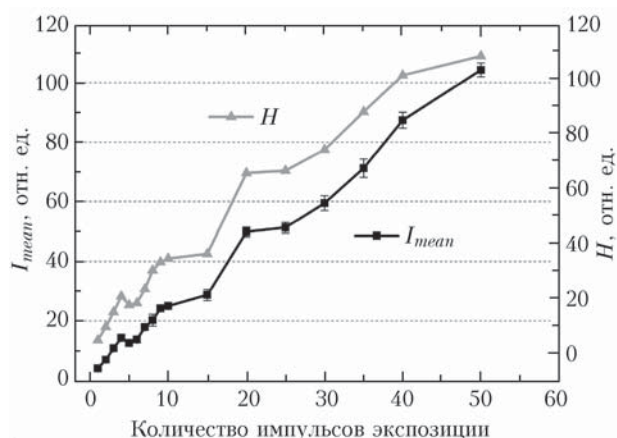


б

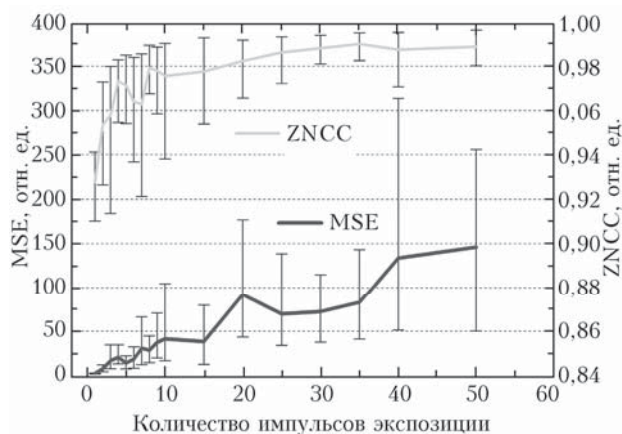
Рис. 3. Зависимость от количества импульсов генерации: а – значений средней яркости I_{mean} , рассчитанных по сериям из 150 изображений, и энтропии H изображения, осредненного по 10 наиболее близким по яркости изображениям; б – среднеарифметических значений MSE и ZNCC для 10 наиболее близких по яркости изображений (указан разброс по серии)

Наличие указанного недостатка активного элемента привело к существенному разбросу яркости получаемых изображений и к геометрическому искажению формы, достаточно хорошо заметному и при визуальном анализе. Вследствие указанной нестабильности значения MSE (рис. 4, б) существенно выше, в сравнении с лазерным монитором, реализованном на ГРТ 1, а коэффициент корреляции ZNCC ниже. Для серии с экспозицией, соответствующей 40 импульсам генерации, значения MSE и ZNCC составили 133,8 и 0,98733 соответственно, а для 10 импульсов – 41,5 и 0,97550. Также достаточно хорошо видно из рис. 4, б, что разброс MSE и ZNCC на протяжении всего эксперимента существенно больше, чем для активного элемента со стабильной температурой стенки ГРТ, а кроме того, с ростом количества импульсов экспозиции MSE значительно возрастает, в то время как для ГРТ 1 среднеарифметическое MSE достигает определенного уровня (~20) и далее не меняется. Можно предположить, что высокие значения MSE

в данном случае получаются вследствие того, что изображения сильно геометрически искажены из-за незначительных перемещений и колебаний газового пучка и, соответственно, пятна освещенности.



а



б

Рис. 4. Зависимость от количества импульсов генерации: а – значений средней яркости I_{mean} , рассчитанных по сериям из 150 изображений, и энтропии H изображения, осредненного по 10 наиболее близким по яркости изображениям; б – среднеарифметических значений MSE и ZNCC для 10 наиболее близких по яркости изображений (указан разброс по серии)

Полученные значения среднеквадратичной ошибки MSE и коэффициента корреляции ZNCC для разных типов лазеров и режимов работы сведены в таблицу. Видно, что с ростом экспозиции

значения MSE возрастают. Это отчасти обусловлено тем, что данный параметр дает абсолютное значение разницы яркости двух изображений. Таким образом, чтобы иметь возможность сравнения разных режимов и лазеров, необходимо нормировать эти значения по яркости. Значения нормированного MSE приведены в последней строке таблицы.

Заключение

Путем сравнения двух режимов работы ГРТ 1 (подсветка и усиление) и анализа яркости получаемых изображений показано, что в режиме подсветки разброс существенно меньше, чем в режиме усиления. Для ГРТ 2 данный разброс незначителен, однако сам график имеет несколько изломов, что свидетельствует о недостаточной стабильности работы лазера из-за отсутствия активной термостабилизации.

Разброс значений MSE и ZNCC для ГРТ 1 в режиме подсветки является наименьшим, что позволяет сделать вывод о получении качественного изображения с минимальными искажениями с использованием CuVg-лазера. При визуализации в лазерном мониторе, вследствие искажений, вносимых усиливающей средой, получаемые изображения незначительно искажаются, о чем свидетельствуют как более высокие значения MSE, так и больший их разброс. Данный вывод также подтверждается параметром ZNCC.

Нормированное значение MSE является наименьшим для ГРТ 1, работающей в режиме подсветки. С ростом количества импульсов освещения (от 10 до 40) MSE возрастает с 2,36 до 7,54. При усилении яркости изображения значения MSE достигают 9–10, при этом закрытие диафрагмы для снижения общей яркости изображения практически не меняет нормированных значений MSE. Таким образом, данный параметр позволяет проводить оценку изображений при сравнении разных активных элементов и режимов работы. Для ГРТ 2 значения нормированного MSE при 10 и 40 импульсах освещения равны 12,84 и 30,06 соответственно, что также подтверждает предположение о недостаточной стабильности и больших искажениях в использованном лазере.

В режиме усиления яркости изображения и регистрации его от одного импульса излучения значения MSE являются минимальными (так, нормированные значения MSE равны 1,73 и 1,39 для ГРТ 1 и ГРТ 2 соответственно), что свидетельствует

Параметр	ГРТ 1 (подсветка) кол-во импульсов		ГРТ 1 (монитор, диафрагма открыта) кол-во импульсов		ГРТ 1 (монитор, диафрагма закрыта) кол-во импульсов		ГРТ 2	
	10	40	10	40	20	40	10	40
MSE (сред)	2,92	13,95	17,03	18,3	11,19	16,8	41,54	133,8
MSE (макс)	4,14	24,41	32,22	41,57	21,2	35,15	104,6	313,6
ZNCC (сред)	0,9954	0,9985	0,9979	0,9990	0,9946	0,9964	0,9755	0,9873
ZNCC (мин)	0,9936	0,9974	0,996	0,998	0,99	0,992	0,938	0,97
I_{mean}	17,3	70,6	47,5	101,9	20,8	34,18	25,42	85,7
MSE (норм)	2,36	7,54	10,15	9,11	8,49	10,9	12,84	30,06

о минимальном отличии яркости изображений, получаемых в одном импульсе. Коэффициент корреляции ZNCC для одного импульса минимален, это позволяет сделать вывод: вследствие колебаний усиливающей среды изображения отличаются качественно — из-за пространственного искажения хода лучей в ГРТ.

Работа по изготовлению усилителя яркости выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-19-00175.

1. *Webb C.E., Jones J.D.C.* Handbook of Laser Technology and Applications. V. 3: Applications. IoP Publishing, 2004. 1180 p.
2. *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 // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. V. 85, iss. 3. Article N 033111. P. 1–5.
3. *Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савелов А.С., Саранцев С.А., Терехин А.Н.* Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // *Физ. плазмы.* 2010. Т. 36, № 5. С. 463–472.
4. *Torgaev S.N., Trigub M.V., Evtushenko G.S., Evtushenko T.G.* High prf metal vapor laser active media for visual and optical monitoring // *J. Phys.: Conference Series.* 2016. 671(1). DOI:10.1088/1742-6596/671/1/012060.
5. *Buzhinskij O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I., Slivitskaya I.A., Slivitsky A.A.* Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER // *Fusion Eng. Des.* 2002. V. 60. P. 141–155.
6. *Trigub M.V., Agapov N.A., Evtushenko G.S., Gubarev F.A.* A computational algorithm for designing an active optical system with an image intensifier // *Rus. Phys. J.* 2013. V. 56, iss. 5. P. 588–591. DOI: 10.1007/s11182-013-0072-y.

M.V. Trigub, M.V. Burkov, P.S. Lyubutin, S.N. Torgaev. **Investigation of distortions of images formed by a CuBr laser monitor.**

The paper presents the results of quality assessment of images made using a copper bromide vapor laser monitor. Two different imaging techniques were used for the study: laser illumination and amplification using laser active medium (so called laser monitor). The images were numerically evaluated using the following informative parameters: standard error, Shannon entropy (H), and zero mean normalized cross-correlation (ZNCC). It is shown that use of an active medium introduces into images small distortions, which depend on the stability of amplification properties of the active medium. In the scheme of laser illumination, the influence of instability is less pronounced. The imaging in single-frame mode can decrease the distortions introduced by the active medium.