

УДК 621.373.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ ЗРЕНИЯ АКТИВНОЙ  
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УСИЛИТЕЛЕМ  
ЯРКОСТИ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
ОТДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**К.В. Федоров<sup>1</sup>, М.В. Тригуб<sup>1,2</sup>, Г.С. Евтушенко<sup>1</sup>,  
В.В. Гребенников<sup>1</sup><sup>1</sup> Томский политехнический университет<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы

им. академика В.Е. Зуева ТНЦ СО РАН, г. Томск

E-mail: trigub@tpu.ru

**Федоров Кирилл Валерьевич**, магистрант кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.  
E-mail: trigub@tpu.ru

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

**Тригуб Максим Викторович**, канд. техн. наук, науч. сотр. Институт оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева ТНЦ СО РАН, 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, заведующий кафедрой промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.  
E-mail: trigub@tpu.ru

Область научных интересов: физика лазеров, применение лазеров.

**Гребенников Виталий Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.  
E-mail: trigub@tpu.ru

Область научных интересов: высокоэффективные преобразователи электрической энергии.

Проведено исследование возможности визуализации отдаленных объектов с помощью активной оптической системы с усилителем яркости на парах бромида меди. Определены теоретическая и экспериментальная зависимости области зрения активной оптической системы (лазерного монитора, лазерного проекционного микроскопа) от расстояния между объектом и усилителем яркости. По результатам визуализации показано, что при отдалении объекта происходит как уменьшение области зрения, так и снижение качества получаемых изображений. Предельное расстояние между объектом и усилителем яркости составляет 8,5 м. Теоретический предел расстояния между объектом и усилителем яркости, определенный исходя из длительности импульса сверхсветимости, не совпадает с результатами визуализации. При увеличении расстояния между объектом и усилителем яркости до 1,5 м область зрения снижается на 60 %. Продемонстрирована целесообразность использования бистатической схемы для визуализации далеко расположенных объектов.

**Ключевые слова:**

Активная оптическая система, диагностика, лазерный монитор.

Усилители яркости для активных оптических систем (АОС) являются одним из вариантов использования лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, в частности лазеров на парах меди [1]. Благодаря уникальным свойствам этих лазеров, а именно высоким значениям коэффициента усиления и выходной мощности усилителя яркости на переходах атома меди, в активных оптических системах на их основе существует возможность формировать увеличенное изображение на большом экране при минимальном уровне освещения объекта, а также в условиях сильной фоновой засветки. Регистрация изображений с помощью высокоскоростных камер позволяет проводить диагностику быстротекущих процессов в режиме реального времени [2–4], в том числе на удаленном расстоянии [5]. Например, в работе [6] показана возможность наблюдения процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. В работе [7] приведен вариант использования системы для получения изображений, формируемых с помощью ЖК-дисплея, на больших экранах.

При построении активных оптических систем необходимо обеспечить значение некоторых параметров на требуемом уровне. В частности, можно выделить следующие параметры АОС:

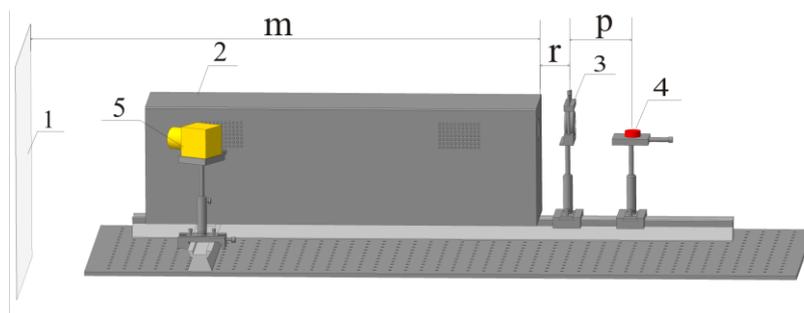
1. Разрешающая способность – наименьшее расстояние между двумя точками, при которых они видны раздельно.
2. Поле (область) зрения.
3. Расстояние между усилителем яркости и наблюдаемым объектом.
4. Уровень освещенности объекта лазерным излучением, который необходим для преодоления широкополосной фоновой засветки.
5. Глубина резко изображаемого пространства (ГРИП).

Очевидно, что эти параметры определяются как используемой оптикой, так и усилителем яркости.

Перед проведением визуальной диагностики данные характеристики должны быть рассчитаны, а также при необходимости сведены к компромиссу. В частности, визуализация удаленных объектов с помощью моностатической схемы лазерного монитора (лазерного проекционного микроскопа) [1] предполагает увеличение длительности импульса сверхизлучения, что приведет к снижению коэффициента усиления среды. Это отразится на качестве получаемых изображений и уровнях засветки, при которой возможно применение лазерного монитора. Кроме того, при визуализации удаленных объектов часть излучения усилителя яркости не попадет в апертуру линзы.

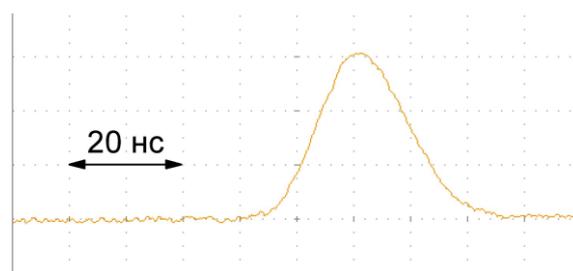
Целью работы является исследование возможности визуально-оптической диагностики удаленных объектов с помощью активной оптической системы, определение области зрения активной оптической системы, а также исследование влияния удаленности объекта на качество его изображения.

Визуализация проводилась в схеме лазерного проекционного микроскопа, представленной на рис. 1. В качестве усилителя яркости (2) использовалась среда лазера на парах бромида меди, длина активной зоны которого 90 см, диаметр 5 см. Схема возбуждения аналогична представленной в работах [8, 9], частота следования импульсов излучения составляет 22 кГц. Диаметр излучения сверхсветимости усилителя яркости составлял 2 см на выходе из трубки, расходимость пучка –  $1,7^\circ$ . Изображение объекта (4) формировалось с помощью ахроматической линзы (5) с фокусным расстоянием 25 см и диаметром 55 мм. Объектом служила миллиметровая бумага. Сформированное изображение проецировалось на экран (1) и регистрировалось на камеру FastCam HiSpec1 (5).



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – экран; 2 – усилитель яркости; 3 – ахроматическая линза,  $F = 250$  мм; 4 – исследуемый объект; 5 – камера

Теоретический предел, на котором возможно расположение объекта для его визуализации в активной оптической системе, ограничен длительностью импульса сверхсветимости. На длительность импульса влияют различные факторы: частота работы усилителя яркости, концентрация паров рабочего вещества и др. Для используемого в работе усилителя яркости импульс сверхсветимости представлен на рис. 2.

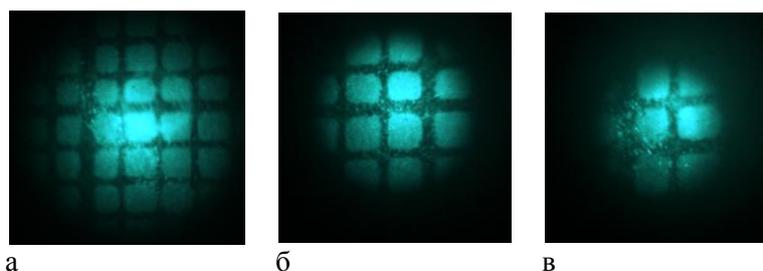


**Рис. 2.** Осциллограмма импульса сверхсветимости усилителя яркости

Длительность импульса сверхизлучения по уровню 0,1 составляет 60 нс и является теоретическим максимумом для данного усилителя. В этом случае, принимая, что изображение объекта должно дойти до половины длины усилителя яркости, чтобы достаточно усилиться по яркости, максимальная удаленность объекта составляет 8,5 м.

При визуализации объект и линза были жестко закреплены на оптическом рельсе, который мог перемещаться. Для получения резкого изображения на экране использовался столик с микроподвижкой, на котором располагался объект. Линза располагалась как можно ближе к лазеру, для того чтобы все излучение сверхсветимости лазера попадало в ее апертуру. Так, в нашем случае минимально возможное расстояние между усилителем яркости и линзой составило 28 см, диаметр пятна сверхсветимости на этом расстоянии составил 3 см. В этом случае область зрения была 7,5 мм. При теоретическом расчете учитывался максимальный угол, под которым излучение сверхсветимости будет попадать на линзу при различном расстоянии между усилителем яркости и линзой. Использование законов геометрической оптики достаточно затруднительно и приводит к значительным искажениям ввиду наличия усиливающей среды. Отдаление объекта и линзы от усилителя приводит к уменьшению яркости освещенной области на наблюдаемом объекте, что снижает уровень входного сигнала, несущего изображение, для усилителя яркости.

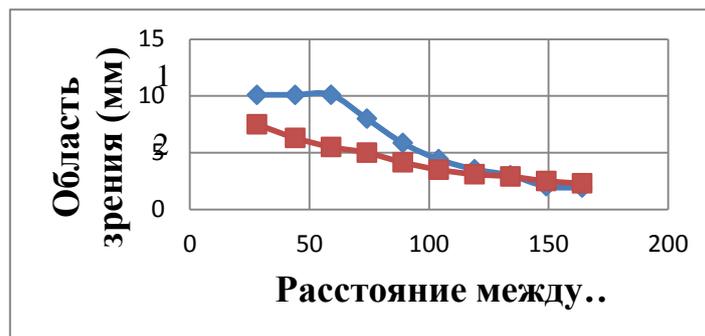
На рис. 3 приведены результаты визуализации при различном расстоянии между усилителем яркости и линзой. К сожалению, лабораторные условия не позволили увеличить расстояние свыше 150 см, но даже в этом случае видно значительное ухудшение характеристик активной оптической системы (области зрения, контраста).



**Рис. 3.** Результаты визуализации тестового объекта при различном расстоянии между объектом и усилителем яркости: *а* – 30 см; *б* – 90 см; *в* – 150 см

Увеличение расстояния между усилителем и линзой от 30 до 60 см приводит к снижению области зрения от 7 до 3,5 мм, что видно на рис. 3, *а* и *б*. При расстоянии 150 см область зрения составляет менее 3 мм, что показано на рис. 3, *в*. Связано это как с геометрической оптикой, так и с характеристиками активной оптической системы. В этом случае уменьшается диаметр освещенной области объекта и интенсивность подсветки.

На рис. 4 приведены зависимости области зрения от расстояния между линзой и усилителем яркости.



**Рис. 4** Зависимости области зрения от расстояния между усилителем яркости и линзой, полученные теоретически (1) и экспериментально (2)

Экспериментальная зависимость рассчитывалась исходя из формулы линзы, а также с учетом угла расходимости излучения свехсветимости усилителя яркости, попадающего на линзу. Экспериментальная зависимость определялась по получаемым изображениям. Существенное отклонение при малом расстоянии между объектом и усилителем яркости объясняется расходимостью лазерного излучения и параметрами усилителя яркости, которые невозможно учесть в расчетах. При значительном расстоянии (более 50 см) получаемое изображение «проходит» преимущественно по центру усилителя яркости, где коэффициент усиления значительно выше, нежели по краям. Это приводит к уменьшению влияния параметров усилителя яркости. Угол расходимости излучения, попадающего на линзу, уменьшается, что снижает диаметр освещенной области. В результате расходимость между теоретическим и экспериментальным значениями области зрения уменьшается, что и видно из рис. 4.

Таким образом, экспериментально продемонстрировано, что диагностика удаленных объектов в моностатической схеме лазерного монитора предполагает уменьшение области зрения, что не всегда допустимо. Удаление объекта на 150 см от усилителя яркости приводит к уменьшению области зрения на 60 %. Визуализация объектов, находящихся на значительном расстоянии от усилителя яркости следует проводить либо с помощью бистатической схемы, либо проводить оптимизацию оптической схемы за счет введения дополнительных элементов. Ввиду высокого коэффициента усиления активной среды это может привести к значительным искажениям получаемых изображений за счет появления паразитной генерации, вызванной отражениями от поверхности оптических элементов.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптические системы с усилителями яркости / Под ред. Г.Г. Петраша. – М.: Наука, 1991. (Труды ФИАН, Т. 206.). – 152 с.
2. Abramov D.V., Arakelian S.M., Galkin A.F. et al. A laser-induced process on surface of a substance and their laser diagnostics in real time // *Laser physics*. – 2005. – V. 15. – № 9. – P. 1313–1318.
3. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л. и др. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // *Физика плазмы*. – 2010. – Т. 36. – № 5. – С. 463–472.
4. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A. et al. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // *Review of Scientific Instruments*. – 2014. – V. 85. – Issue 3, № 033111. – P. 1–5
5. Buzhinskij O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I. et al. Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER // *Fusion engineering and design*. – 2002. – V. 60. – P. 141–155.
6. Юсупов Р.А., Китлер В.Д., Кирдяшкин А.И. и др. Динамический мониторинг структурообразования гетерогенных систем в процессах горения с использованием лазерного излучения // *Известия вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. – № 9/3. – С. 226–228.

7. Торгаев С.Н., Карюгин К.Л., Тригуб М.В. Электронное устройство для переноса изображения с помощью лазерного проекционного микроскопа // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 1 (11). – С. 40–45. – URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/879>.
8. Красников И.В., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С. Источник накачки CuBbr-лазера с импульсным зарядом рабочей емкости // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 5 (6). – С. 54–58. – URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/507>.
9. 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.

Поступила 29.01.2015 г.