

УДК 621.373.8

Визуализация объектов, расположенных на удалении до 5 м от CuBr-усилителя яркости, с импульсом излучения типичной длительности

М.В. Тригуб^{1,2}, К.В. Федоров^{1,2}, Г.С. Евтушенко^{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*

Поступила в редакцию 25.06.2015 г.

Представлены результаты исследования возможности наблюдения объектов, расположенных на некотором расстоянии (до 5 м) от усилителя яркости, в моностатической схеме лазерного монитора. Проведено экспериментальное исследование влияния расстояния от усилителя яркости до объекта наблюдения на качество получаемых изображений. Показано, что временной сдвиг между началом импульса сверхсветимости и моментом поступления сигнала на вход усилителя яркости в значительной мере определяет контраст изображения на выходе усилителя яркости. Предложена схема, позволяющая получать контрастные изображения объекта, расположенного на расстоянии до 5 м от усилителя яркости.

Ключевые слова: лазерный монитор, визуализация объектов, лазеры на парах металлов, активные оптические системы; laser monitor, objects visualization, metal vapor lasers, active optical system.

Введение

Использование оптических методов неразрушающего контроля позволяет решать большой круг исследовательских задач. Развитие современных методов микроскопии и скоростной визуализации процессов позволило получить ряд фундаментальных знаний о процессах и явлениях, протекающих в областях экстремального состояния вещества. Наличие экранирующей засветки, ионизирующего излучения и вредных факторов требует применения методик визуализации, в которых регистрирующая аппаратура расположена на достаточном удалении от наблюдаемого процесса. Например, визуальн-оптический контроль в ядерных реакторах проводится с помощью волоконных жгутов для отдаления регистрирующей аппаратуры на значительное расстояние от зоны действия ионизирующего излучения [1]. Но этот и другие подобные методы оказываются бессильными при визуализации объектов, скрытых от наблюдения фоновой засветкой.

Известен метод лазерной подсветки, когда объект наблюдения подсвечивается внешним источником высокой яркости (лазером). Отраженное от объекта излучение, несущее изображение, регистрируется в узком спектральном диапазоне за счет применения узкополосных фильтров. Этот метод позволяет в значительной мере «отсечь» фоновую засветку. В случае мощной засветки избавиться от

нее полностью не удается. В таких условиях могут эффективно работать активные оптические системы, основанные на использовании усилителей яркости изображений в узком спектральном диапазоне. В известных работах (например, [2, 3]) усилитель яркости располагался в непосредственной близости от наблюдаемого объекта (единицы–десятки сантиметров). Связано это с тем, что применялась так называемая моностатическая схема, в которой освещение объекта и усиление отраженного сигнала осуществляются одной и той же активной средой. И предельное расстояние до объекта наблюдения во многом определяется длительностью импульса сверхсветимости усилителя яркости.

В [4] теоретически показана возможность визуализации стенки дивертора термоядерного реактора, расположенной на расстоянии 10 м от диагностического окна, с помощью активной оптической системы, созданной по бистатической схеме. В этом случае объект освещается одним излучателем (лазером), а усиление яркости изображения осуществляется в другой аналогичной активной среде. При этом импульс усиливающей среды задержан относительно генератора в соответствии с расстоянием от объекта до усилителя. Такая схема построения является более функциональной и, соответственно, более сложной. Результаты практического применения подобных систем нам не известны.

В типичных условиях для лазера на парах меди длительность импульса по полувысоте составляет 15–20 нс, а для галогенидов меди несколько больше (30–40 нс). Считая, что среда все это время усиливает входной сигнал и его уровень достаточен

* Максим Викторович Тригуб (trigub@tpu.ru); Кирилл Валерьевич Федоров; Геннадий Сергеевич Евтушенко.

для получения контрастного изображения, предельное расстояние до объекта наблюдения составит 7–8 м (с учетом двукратного прохождения излучения от усилителя до объекта и обратно). На практике это расстояние будет меньше ввиду уменьшения коэффициента усиления к концу импульса и уровня входного сигнала в оптической схеме.

В настоящей статье рассмотрена возможность использования более простой моностатической схемы лазерного монитора на основе CuBr-усилителя яркости для визуализации удаленных объектов.

Экспериментальная установка

Визуализация проводилась в схеме лазерного монитора – активной оптической системе с усилителем яркости на парах бромида меди [5]. Диаметр активной зоны усилителя яркости составлял 25 мм, длина 500 мм, давление буферного газа неона 25 торр. Возбуждение активной среды осуществлялось с помощью источника питания с импульсным зарядом рабочей емкости и ее разрядом на газоразрядную трубку (ГРТ) через тиратрон [6]. Импульсы излучения усилителя яркости регистрировались коаксиальным фотоэлементом ФК-22, а изображение объекта с помощью фотокамеры Casio FX-EH 20 и высокоскоростной камеры Fastcam HiSpec 1.

Увеличение расстояния от объекта до усилителя яркости в схеме лазерного проекционного микроскопа приводит к тому, что растет задержка между началом импульса сверхсветимости (усиленного спонтанного излучения) и моментом прихода отраженного от объекта сигнала. Очевидно, что изменение момента поступления входного сигнала в усилитель приведет к уменьшению энергии изображения и увеличению энергии фона (усиленного спонтанного излучения), т.е. отношение полезный сигнал-шум на выходе усилителя яркости уменьшится. Следствием этого должно стать уменьшение контраста изображения. Отметим, что вопрос влияния задержки на качество получаемого изображения также не нашел отражения в предшествующих работах. Вместе с тем имеется ряд публикаций [7, 8], посвященных исследованию влияния временной задержки поступления сигнала на вход усилителя мощности на выходные параметры в схеме «задающий генератор – усилитель» (МОРА-система как некий аналог усилителя яркости). Авторами [7, 8] отмечается, что существует оптимальная задержка между импульсами задающего генератора и усилителя, при которой выходная мощность системы максимальна, и отклонение от этой задержки на 10 нс может приводить к уменьшению выходной мощности на 35% и более.

Оценка влияния расстояния между объектом и усилителем яркости на возможность визуализации проводилась нами с использованием схемы, показанной на рис. 1. После каждого перемещения объекта с помощью системы позиционирования формировалось резкое изображение на входном окне ФК-22. Объектом служило зеркало с щелью, ширина которой регулировалась микровинтом.

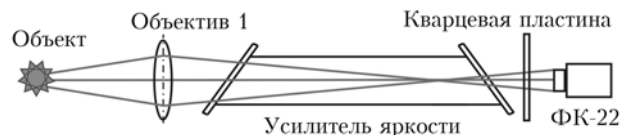


Рис. 1. Схема эксперимента

Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты визуализации объекта в схеме лазерного монитора и осциллограммы оптических импульсов PI представлены на рис. 2 при использовании схемы без кварцевой пластины.

Для каждого случая пунктирной линией показан импульс сверхсветимости, когда объект наблюдения отсутствовал, а сплошной – импульс излучения при наличии объекта. Для рис. 2, *а* временная задержка между началом импульса излучения и поступлением входного сигнала на вход усилителя яркости составляет 2,6 нс. Изображение получается максимально контрастным. Энергия излучения при наличии объекта в 2 раза превышает энергию сверхсветимости. При расстоянии 150 см (рис. 2, *б*) временная задержка составляет 10 нс. Усиленный сигнал (сплошная линия) имеет большую длительность, что обусловлено задержкой прихода сигнала, отраженного от объекта. Такая задержка не приводит к значительным искажениям получаемого изображения, усиление и уровень входного сигнала еще достаточны для получения контрастного изображения, несмотря на его снижение (ср. с рис. 2, *а*).

При расстоянии 330 см временное рассогласование между началом импульса сверхсветимости и поступлением сигнала, отраженного от объекта, на вход усилителя составляет 22 нс. Такая задержка приводит к тому, что меньше половины отраженного сигнала попадает в среду в тот момент, когда она является усиливающей (т.е. когда в ней существует инверсная населенность). Усиление в среде к моменту поступления отраженного сигнала будет ниже своего максимального значения. Как было показано в [7], мощность в системе «генератор–усилитель» уменьшается более чем на 50% при таких задержках. Результаты визуализации при расстоянии до объекта 330 см представлены на рис. 2, *в*. Видно, что импульсы сверхсветимости и усиленного сигнала совпадают по амплитуде. Небольшое усиление наблюдается только на «хвосте» импульса. Контраст изображения значительно ниже максимального вследствие превышения фона (усиленного спонтанного излучения) над полезным сигналом – изображением.

В случае рис. 2, *г* расстояние составляло 425 см, что соответствует временной задержке 28 нс. Изображение неразлично на фоне сверхсветимости в связи с низким уровнем входного сигнала, отраженного от объекта, и малым усилением среды к моменту его прихода. В этом случае можно считать, что отраженный сигнал не усилился, так как отношение полезный сигнал-шум значительно меньше единицы.

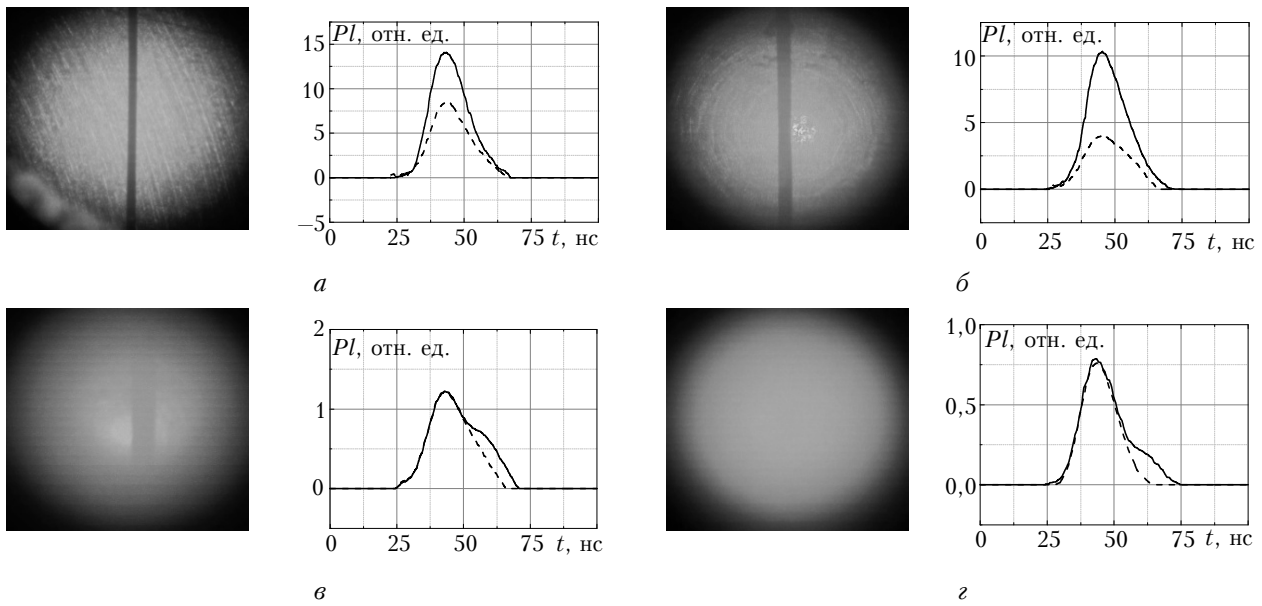


Рис. 2. Результаты визуализации зеркала с щелью в схеме лазерного монитора при различном расстоянии от него до усилителя: *a* – 40, *б* – 150, *в* – 330, *г* – 425 см

Для увеличения расстояния между объектом и усилителем яркости, при котором возможна визуализация в моностатическом лазерном мониторе, необходимы модификация оптической части схемы или увеличение длительности импульса усилителя яркости. Мы предлагаем использовать схему (см. рис. 1), в которой перед ФК-22 располагается кварцевая пластина. Введение кварцевой пластины позволяет сформировать генерацию на выходе усилителя яркости. Это обеспечивает увеличение энергии и уменьшение расходимости излучения, освещающего объект. При этом область зрения активной оптической системы уменьшилась по сравнению с первой схемой. В результате входной сигнал уси-

лителя яркости будет больше, чем в схеме без пластины. На рис. 3 представлены результаты визуализации тестового объекта в модернизированной схеме при разном расстоянии между объектом и усилителем яркости. Для анализа результатов пренебрежем временной задержкой, связанной с формированием однопроходowego излучения за счет отражения части излучения от кварцевой пластины. Задержка составляет примерно 3 нс. Область зрения такой системы в 4 раза меньше, чем на рис. 2, *a*. Это связано с тем, что диаметр пучка однопроходowego излучения в случае использования кварцевой пластины меньше, чем диаметр излучения сверхсветимости.

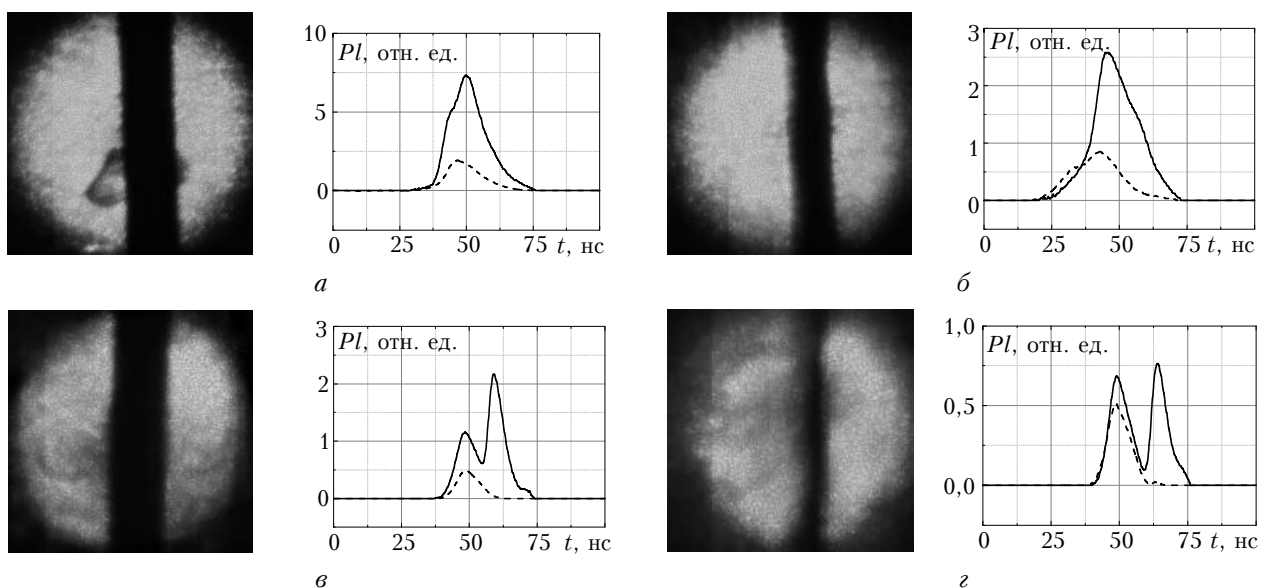


Рис. 3. Результаты визуализации зеркала с щелью в схеме лазерного монитора с кварцевой пластиной при различном расстоянии до объекта наблюдения: *a* – 40, *б* – 150, *в* – 330, *г* – 425 см

На рис. 3, б амплитуда импульса меньше, чем на рис. 3, а (масштабы на рис. 3, а–г для наглядности разные), что связано с уменьшением эффективного усиления среды к моменту прихода отраженного от объекта сигнала. Но при этом параметры получаемых изображений практически не меняются — контраст и область зрения одинаковы. При расстояниях 330 (рис. 3, в) и 425 см (рис. 3, г) использование предложенной схемы обеспечивает условия, при которых энергия излучения, несущего изображение объекта, остается больше энергии фона, что позволяет получать достаточно контрастное изображение на экране. Но усиление среды в этих случаях уже мало, так как отраженный от объекта сигнал поступает в среду к моменту спада коэффициента усиления. При расстоянии 425 см практически не наблюдается усиления сигнала, изображение становится слабоконтрастным, но заметным, область зрения системы остается прежней.

Заключение

При использовании стандартной моностатической схемы лазерного монитора (лазерного проекционного микроскопа) расстояние до объекта наблюдения определяется как длительностью импульса сверхсвечимости — длительностью, в течение которой среда является усиливающей, так и энергией, отраженной от объекта наблюдения. Очевидно, что контраст получаемого изображения будет зависеть от этих факторов. В целом схема может быть использована для диагностики объектов, находящихся на расстояниях до 150 см от усилителя яркости. При увеличении расстояния будет уменьшаться контраст изображения за счет преобладания фона — усиленного спонтанного излучения. Устранить это, в некоторой степени, можно увеличением энергии излучения, освещающего объект, путем введения дополнительных оптических элементов, например коллиматоров. Однако это приведет к появлению артефактов на изображении за счет рассеяния от поверхностей оптических элементов.

Использование модифицированной схемы, представленной в настоящей статье, позволяет увеличить предельное расстояние до наблюдаемого объекта. Такая схема имеет как преимущества, так и недостатки. Достоинство заключается в большой мощности излучения, освещающего объект, что увеличивает мощность входного сигнала усилителя яркости. Недостатком является меньшая область зрения по сравнению со стандартной схемой. Показано, что сигнал усиливается активной средой при расстояниях между объектом и усилителем яркости вплоть до 330 см. Дальнейшее увеличение расстояния не приводит к усилению сигнала, несущего изображение.

M.V. Trigub, K.V. Fedorov, G.S. Evtushenko. Remote object visualization using a laser monitor with a typical pulse duration of CuBr brightness amplifier.

In this paper, the feasibility of monitoring the objects located at a distance (up to 5 m) from a brightness amplifier in a monostatic laser monitor is demonstrated. The experimental study of the dependence of the quality of the obtained images on the distance between the object and the brightness amplifier is presented. It is shown that the time delay between the initial moment of the ASE pulse and the moment when the input signal is brought to the input of the brightness amplifier significantly specifies the image contrast at its output. A scheme that allows us to obtain high image contrast of objects located at a distance from the brightness amplifier is proposed.

Можно считать, что для расстояний более 330 см отношение полезный сигнал-шум становится равным единице. В моностатическом лазерном мониторе удалось получить изображение объекта, расположенного на расстоянии 425 см, за счет использования усилителя яркости с частично сформированной генерацией с помощью кварцевой пластины.

Таким образом, предельное расстояние между усилителем яркости и объектом наблюдения, при котором использование моностатической схемы лазерного монитора оправдано, составляет 330 см. Отметим, что результат получен для усилителя яркости с типичной длительностью излучения. При визуализации более отдаленных объектов необходимо увеличивать длительность импульса сверхсвечимости либо использовать бистатическую схему активной оптической системы.

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

1. Бояринов О.В., Чигорко А.Б., Агапов Н.А., Перельгин А.В., Барабанов Н.А., Мевуц В.В., Чигорко А.А., Ерофеев С.Ю. Дистанционный визуальный контроль в атомной промышленности // Сб. научн. трудов. Вып. 13. Физико-математические и технические науки. С. 8–22.
2. Abramov D.V., Arakelian S.M., Galkin A.F., Klimovskii I.I., Kucherik A.O., Prokoshev V.G. A laser-induced process on surface of a substance and their laser diagnostics in real time // Laser physics. 2005. V. 15, N 9. P. 1313–1318.
3. Бужинский П.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.
4. 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 Engin. Design. 2002. V. 60. P. 141–155.
5. 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 // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85, iss. 3. 033111. P. 1–5. DOI: 10.1063/1.4869155.
6. Тригуб М.В., Огородников Д.Н., Димаки В.А. Исследование источника накачки лазера на парах металлов с импульсным зарядом рабочей емкости // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1112–1115.
7. Карпухин В.Т., Маликов М.М. Двухпроходный лазерный усилитель на парах меди с высокой пиковой мощностью // Ж. техн. физ. 2005. Т. 75, вып. 10. С. 69–72.
8. Лябин Н.А. Создание современных промышленных лазеров и лазерных систем на парах меди для прецизионной микрообработки материалов: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. М., 2014. 36 с.