

УДК 621.373.8

Особенности формирования изображения в бистатическом лазерном мониторе

М.В. Тригуб , Н.А. Васнев*

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

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.;
после доработки 27.09.2022 г.;
принята к печати 26.10.2022 г.

Рассмотрены особенности работы бистатической лазерной активной оптической системы (лазерный монитор) в задаче формирования мощных пучков и контрастных изображений микрообъектов. В разработанной системе усилитель яркости имеет больший объем активного элемента, чем источник подсветки, что позволяет получать контрастные изображения. Впервые установлено влияние временного сдвига между импульсом сверхизлучения усилителя и моментом поступления сигнала на его вход на контраст и мощность изображений, формируемых одним импульсом. Показано, что артефакты, являющиеся результатом паразитных отражений и рассеиваний излучения сверхсветимости от элементов оптической схемы, существенно снижают контраст и мощность выходных сигналов. Устранить данный эффект удастся за счет поступления сигнала на вход усилителя до момента появления усиленного спонтанного излучения. Оптимальная задержка составляет 1 нс.

Ключевые слова: активные оптические системы, усилитель, CuBr-лазер, задающий генератор – усилитель мощности, контраст; active opticals system, amplifier, CuBr laser, master oscillator – power amplifier, contrast.

Введение

Разработка лазеров на парах металлов и повышение их частотно-энергетических характеристик являются в настоящее время важными задачами [1–3]. Связано это с особенностями работы таких лазеров и возможностями их применения [4–6]. В частности, активные оптические системы с усилителями яркости на парах металлов широко используются для решения диагностических задач [7–10]. Разделение функции подсветки объекта и усиления яркости его изображения, впервые реализованное для лазерных мониторов в работе [11], позволило расширить их функциональные возможности. В ранее опубликованных исследованиях по разработке, исследованию и применению бистатического лазерного монитора [12–15] габаритные размеры источника подсветки (ИП) существенно превышали параметры усилителя яркости. Например, в [15] в качестве усилителя яркости (УЯ) использовалась газоразрядная трубка (ГРТ) с длиной активной зоны 30 см и диаметром 4 см. Длина активной зоны ИП при этом была в три раза больше (90 см), а диаметр сопоставим с диаметром усилителя (5 см). Такие параметры были обусловлены задачами исследования и областью применения активной оптической системы. Большие габаритные размеры ИП

позволяют получить большую мощность излучения подсветки, что критически важно при визуализации удаленно расположенных объектов. В публикации [12] использовался источник подсветки активным объемом 1766 см³. При уровне накачки 1,85 кВт, мощность генерации составила 8,2 Вт, что позволило получать усиленные по яркости изображения даже на рекордных расстояниях (от 5 до 15,5 м).

Параметры УЯ, как правило, выбираются такими, чтобы обеспечить максимальные поле зрения и численные показатели качества изображений. Для этого обязательным условием является высокая числовая апертура ГРТ усилителя, т.е. соотношение между диаметром ГРТ и ее длиной. Очевидно, что чем больше диаметр ГРТ, тем больше при прочих равных условиях будет уровень входного сигнала, несущего изображение объекта. Что касается длины активной зоны, то ее относительно малая величина обусловлена принципом работы лазерного монитора. Из формулы тонкой линзы $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}$ очевидно, что расстояние до объекта наблюдения d , а также фокусное расстояние F определяют дистанцию f , на которой будет спроецировано резкое оптическое изображение объекта.

В связи с этим при наблюдении микрообъектов с высоким линейным увеличением возникают ограничения на возможную длину активной зоны усилителя. Например, при формировании изображе-

* Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru); Николай Александрович Васнев (vasnev_na@iao.ru).

ния объективом Helios-44-2 с фокусным расстоянием 58 мм и расположении объекта на дистанции 64 мм резкое изображение находится на расстоянии 620 мм от линзы. Если длина активной зоны усилителя превышает указанную цифру, то резкое изображение будет формироваться непосредственно в его активной среде — зарегистрировать изображение в данном случае не представляется возможным. Добиться увеличения f можно за счет уменьшения d , однако, во-первых, на практике это не всегда бывает возможно, а во-вторых, такой подход неизбежно приводит к изменению линейного увеличения

$$\Gamma = \frac{f}{d}.$$

Таким образом, для визуально-оптической диагностики следует использовать УЯ с малой длиной активной зоны и сравнительно большим диаметром.

Для решения некоторых задач может возникнуть потребность формирования оптических сигналов с заданным распределением интенсивности и высокой мощностью, например в задачах микрообработки. Бистатический лазерный монитор позволяет решить указанную задачу. В работах [11–13, 15] применялись типичная конфигурация активных элементов, когда геометрические и энергетические параметры задающего генератора (ИП) существенно превышали аналогичные параметры УЯ.

Цель данной работы — исследовать особенности формирования изображений в бистатическом лазерном мониторе для случая, когда УЯ имеет большие геометрические и энергетические характеристики, чем источник подсветки.

Техника эксперимента

В табл. 1 приведены геометрические размеры активных элементов на парах бромида меди ($\lambda_1 = 510,6$ нм; $\lambda_2 = 578,2$ нм), использованные в эксперименте как ИП и УЯ. Сведения о параметрах накачки каждого активного элемента, в частности

номинальное напряжение питания U и потребляемый от сети ток I , представлены в табл. 2.

Таблица 1

Габаритные размеры используемых активных элементов УЯ

Активный элемент	Длина активной зоны l , см	Диаметр канала D , см	Объем активной зоны V , см ³
ИП	50	3,2	402
УЯ	90	5,0	1767

Таблица 2

Основные технические характеристики источников накачки каждого активного элемента

Активный элемент	f , кГц	C , пФ	U , В	I , А
ИП	16	1000	170	6,10
УЯ	16	892	200	5,15

Вынужденное излучение ИП 1 формировалось плоскопараллельным резонатором 2, 3 и направлялось на объект наблюдения 4 с помощью зеркал 5, 6, а также объектива 7. Отраженное от объекта 4 излучение проходило через объектив 8, который формировал его оптическое изображение. Затем сигнал, несущий изображение, поступал на вход УЯ 9, где за счет инверсной населенности повышалась его яркость. Далее изображение проецировалось на экран 10 и регистрировалось камерой машинного зрения Baumer VLG-20C 11, которая управлялась компьютером 12. После этого регистрировалась мощность сигнала несущего изображение на выходе УЯ с помощью измерительного прибора Ophir 30C-SH 13, а для фокусировки полученного изображения на измерительной головке применялся объектив И-51 14. После измерения мощности прибор убирали в сторону, чтобы он не перекрывал дальнейший путь распространения излучения. Импульсы излучения регистрировались коаксиальными фотоэлементами 15, 16, которые были подключены к осциллографу. Излучение направлялось на фотоэлементы с помощью полупрозрачных зеркал 17, 18. Для регистрации осциллограмм импульсов излучения

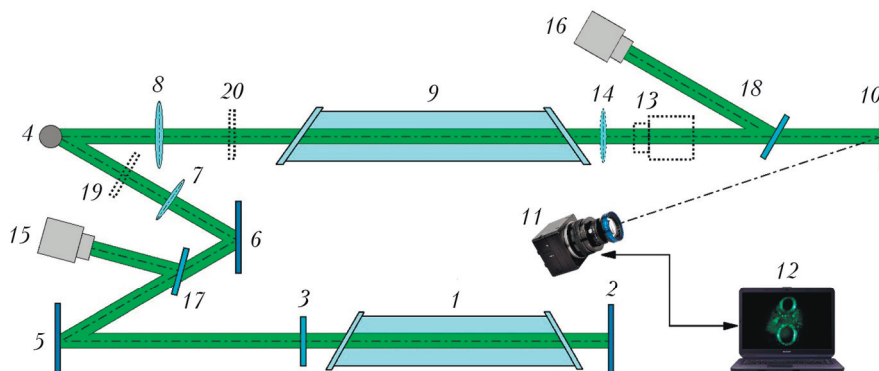


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ИП; 2, 3 — зеркала плоскопараллельного резонатора; 4 — объект наблюдения; 5, 6 — глухие зеркала; 7 — объектив для фокусировки; 8 — объектив (ОКП1-250-1); 9 — УЯ; 10 — проекционный экран; 11 — камера машинного зрения (Baumer VLG-20C); 12 — компьютер; 13 — измеритель мощности (Ophir 30C-SH); 14 — объектив для фокусировки (Индустар-51); 15, 16 — коаксиальные фотоэлементы (ФЭК-22-СПУ-М); 17, 18 — полупрозрачные зеркала; 19, 20 — блокировочные экраны

каждого активного элемента совместно использовались блокировочные экраны 19 и 20. При их отсутствии появлялась возможность регистрации усиленного сигнала.

Очевидно, что представленная экспериментальная установка позволяет поочередно проводить визуализацию различными способами. При отсутствии накачки, УЯ становился прозрачной однородной средой – в этом случае сигнал формировался исключительно излучением подсветки (255 мВт) и не усиливался за счет инверсной населенности среды усилителя. Если же, напротив, оптическое изображение объекта наблюдения формировалось исключительно сверхизлучением усилителя, а вынужденное излучение ИП при этом перекрывалось блокировочным экраном 19, то в этом случае визуализация осуществлялась в моностатической схеме лазерного монитора. При одновременной работе двух активных элементов и отсутствии блокировочных экранов 19 и 20 визуализация выполнялась в бистатической схеме лазерного монитора.

В публикациях, посвященных разработке и исследованию бистатического лазерного монитора, зачастую отмечается схожесть принципа его действия с МОРА-системой. Более того, прежде чем перейти непосредственно к визуализации на этапах подготовки к работе, целесообразно испытать активные элементы как задающий генератор (Master Oscillator) и УЯ (Power Amplifier) в МОРА-системе – это даст возможность определить, достигается ли усиление полезного сигнала при разработанных технических решениях. Для проведения такого испытания из экспериментальной установки (см. рис. 1) достаточно удалить объективы 7 и 8, а также заменить объект наблюдения 4 на глухое зеркало.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульса ИП и УЯ для временного сдвига между импульсами $t_c = -10$ нс. Знак минус означает, что входной сигнал «отстает» от импульса сверхизлучения усилителя, т.е. поступает на вход усилителя на 10 нс позже. На рис. 3 показана зависимость мощности на выходе усилителя от временного сдвига. Наибольшая мощность выходного излучения ($P_{\text{вых}} = 4,5$ Вт) была достигнута при временном сдвиге $t_c = -1$ нс между импульсами излучения ИП и УЯ (рис. 3). Усиление в данном случае оценива-

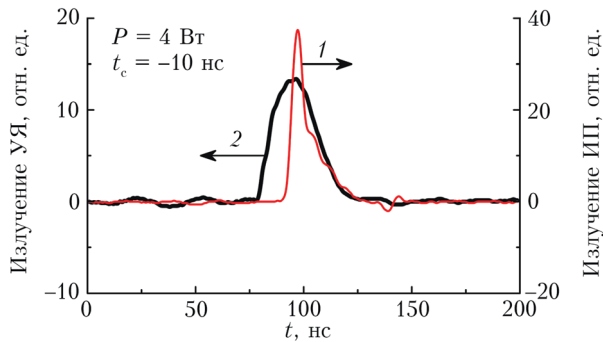


Рис. 2. Осциллограммы импульсов излучения ИП (1) и УЯ (2)

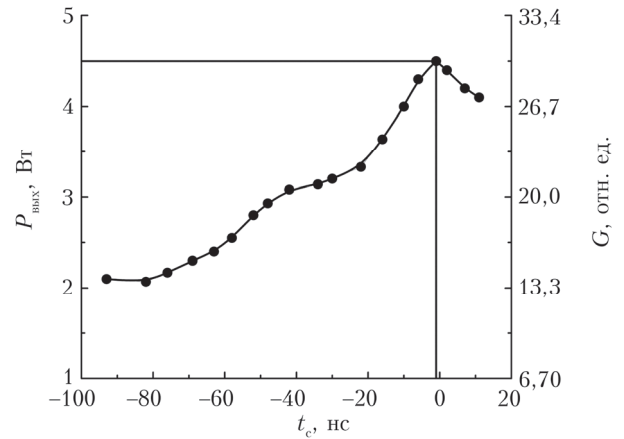


Рис. 3. Зависимости мощности выходного излучения усилителя ($P_{\text{вых}}$) и коэффициента усиления (G) от временного сдвига (t_c) между импульсами излучения активных элементов

ется как отношение мощности выходного сигнала к мощности входного сигнала, данный коэффициент обозначается как G . Наибольшее значение коэффициента $G = 30$ отн. ед. и достигается как раз при указанном временном сдвиге $t_c = -1$ нс. Дальнейшие эксперименты по визуализации были выполнены при указанном временном сдвиге.

Формирование изображений

В качестве объекта наблюдения использовалась печатная плата. На рис. 4 представлен внешний вид объекта, а также примеры изображений, полученные при визуализации различными способами: с помощью лазерной подсветки, в схемах моностатического и бистатического лазерного монитора.

Результаты визуализации методом лазерной подсветки показаны на рис. 4, б, в, изображения сформированы 64 и 128 импульсами соответственно. Локальный контраст по Веберу увеличился с 22 до 38,9, преимущественно за счет увеличения яркости точки А.

Для оценки контраста использовался следующий подход. Вдоль проведенных на изображениях прямых определялась зависимость яркости пикселей от координаты X . Значение яркости G усреднялось по 20 пикселям по координате Y . Затем данные полученной зависимости нормировались на единицу, после чего вычислялась относительная яркость пикселя по формуле

$$L(G) = \begin{cases} \frac{G}{12,92}, & G \leq 0,04045; \\ \left(\frac{G + 0,055}{1,055} \right)^{2,4}, & G > 0,04045. \end{cases}$$

Далее по полученным данным были построены графики распределения яркости пикселей, фиксировались яркость освещенной области объекта I и яркость фона I_b и определялся контраст по Веберу

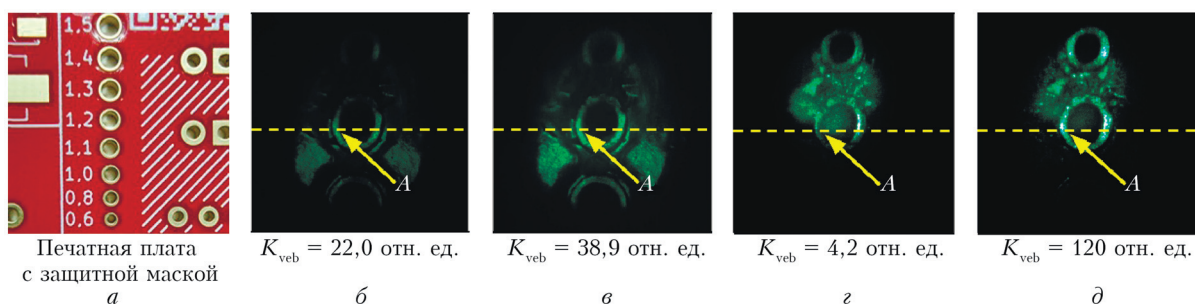


Рис. 4. Тестовый объект (а) и его изображения, сформированные лазерной подсветкой при экспозиции камеры 4 (б) и 8 мс (в), а также в моностатической (з) и бистатической схемах лазерного монитора (д) при экспозиции камеры 4 мкс

$$K_{\text{veb}} = \frac{I - I_b}{I_b}.$$

При включении усилителя яркости и использовании экрана 19 реализуется схема моностатического лазерного монитора. Экспозиция составляла 4 мкс, кадр формировался одним импульсом УЯ (рис. 4, з). В этой схеме поле зрения существенно уменьшилось по сравнению с режимом лазерной подсветки, что обусловлено особенностями работы моностатического лазерного монитора: наблюдаемая область освещается излучением сверхсветимости. Кроме того, в центральной части изображения появился оптический артефакт в виде блика, который особенно хорошо заметен на отверстии большего диаметра. Это обусловлено паразитными отражениями от компонентов оптической схемы (в данном случае от объектива ОКП1-250-1), которые усиливаются в активной среде УЯ вместе с полезным сигналом. Разумеется, такой артефакт неизбежно влияет на контраст по Веберу – в точке А он составил всего 4,2 отн. ед., что на порядок ниже, чем при лазерной подсветке. Частично устранить влияние отражения усиленного спонтанного излучения можно за счет расположения оптических компонентов под углом относительно оптической оси активного элемента. Однако более эффективным способом устранения таких артефактов является бистатическая схема лазерного монитора. Принцип ее действия позволяет регулировать временную задержку между формированием излучения каждого активного элемента. Следовательно, реализуется режим, когда излучение ИП, отраженное

от объекта наблюдения и несущее изображение, поступает в активный объем усилителя еще до формирования его усиленного спонтанного излучения. В этом случае происходит эффективный съем инверсной населенности полезным сигналом, за счет этого обеспечивается усиление полезного сигнала, а не спонтанного излучения. В результате обеспечивается высокое соотношение «полезный сигнал/шум».

На изображении, полученном в бистатической схеме при тех же значениях экспозиции съемки и диафрагмы (рис. 4, д), практически отсутствует блик. Яркость точки А составила 0,685 отн. ед., а контраст по Веберу в ее окрестности – 120 отн. ед., т.е. на порядок выше, чем в режиме лазерной подсветки. Данный результат был получен при временном сдвиге между импульсами излучения подсветки и усиления $t_c = -1$ нс. Наряду с этим в бистатической схеме лазерного монитора были зарегистрированы изображения в широком диапазоне значений t_c (рис. 5), контраст также в точке А. Полученная зависимость контраста от временного сдвига представлена на рис. 6, а (кривая 2). На этом же рисунке показана зависимость мощности излучения МОРА системы (кривая 1) от t_c в диапазоне (-30; +30) нс. Видно, что наибольшая мощность излучения и максимальный локальный контраст в точке А достигаются при одинаковом $t_c = -1$ нс.

Интерес представляет характер изменения контраста от временного сдвига. Если входной сигнал от ИП поступает в активный объем усилителя до формирования сверхизлучения, контраст

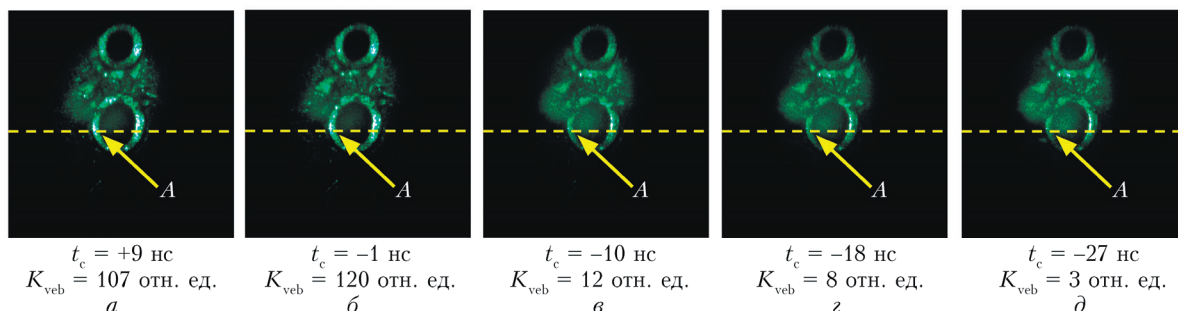


Рис. 5. Результаты визуализации в бистатической схеме лазерного монитора при различном временном сдвиге между импульсами излучения при экспозиции камеры 4 мкс

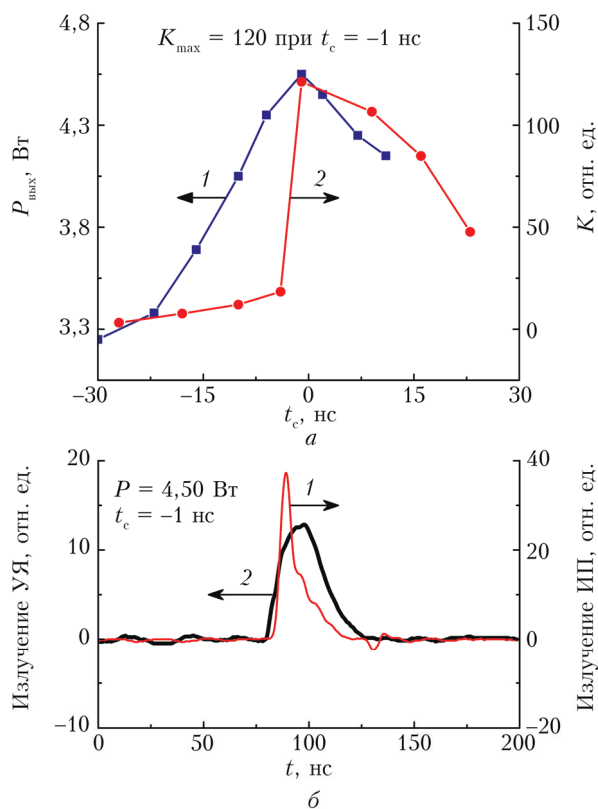


Рис. 6. Зависимость мощности излучения МОРА системы (1) и контраста изображения в точке А (2) от временного сдвига между импульсами излучения ИП и УЯ (а); и осциллограммы импульса УЯ (2) и ИП (1) при оптимальном временном сдвиге (б)

снижается не столь заметно относительно своего наибольшего значения. Например, при $t_c = +9$ нс контраст составляет 107 отн. ед., что всего на 11% ниже его максимума. Увеличение t_c еще на +7 нс обеспечивает контраст на уровне 85 отн. ед., что составляет около 70% от его максимума.

Совсем другая картина наблюдается при изменении временного сдвига в противоположную сторону: изменение t_c относительно оптимального значения всего на -3 нс приводит к резкому снижению контраста до 18 отн. ед., что составляет всего 15% от максимального значения. Данные результаты говорят о том, что чем позже входной сигнал поступает на вход усилителя, тем больше на его выходе преобладает фон, обусловленный усиленным спонтанным излучением активного элемента. Иными словами, для получения наиболее контрастного изображения необходимо чтобы максимум импульса излучения подсветки приходился на передний фронт усиленного спонтанного излучения усилителя, как это показано на рис. 6, б.

Заключение

В рамках работы была реализована и исследована бистатическая лазерная активная оптическая система с источником подсветки ($l = 50$ см; $D = 3,2$ см;

$V = 402$ см³) и усилителем яркости ($l = 90$ см; $D = 5,0$ см; $V = 1767$ см³) на парах бромида меди. Согласование импульсно-периодических режимов работы активных элементов обеспечивает мощность излучения 4,5 Вт при мощности входного сигнала 150 мВт, что соответствует коэффициенту усиления $G = 30$. Добавление в экспериментальную установку оптической системы формирования изображений позволяет использовать ее для визуализации тестовых объектов различными способами.

Метод лазерной подсветки обеспечивает относительно низкую яркость и контрастность изображений, поскольку он исключает усиление сформированного сигнала в активной среде за счет инверсной населенности. В таком режиме работы невозможно формировать изображения от одного импульса излучения ввиду малых энергетических параметров полезного сигнала. Реализация моностатической схемы лазерного монитора приводит к уменьшению поля зрения, а также возникновению оптических искажений (бликов), вследствие чего наблюдается снижение локального контраста. Устранить формирование шума удастся в схеме бистатического лазерного монитора, поскольку его принцип действия позволяет сформировать входной сигнал усилителя яркости до момента формирования усиленного спонтанного излучения, которое является источником искажений. Кроме того, дополнительный источник подсветки обеспечивает более высокий уровень освещения наблюдаемой области объекта, что способствует увеличению мощности полезного сигнала. В результате, контраст по Веберу в бистатическом лазерном мониторе составил 120 отн. ед, что на порядок выше, чем при использовании метода лазерной подсветки. Продемонстрировано, что наибольший контраст изображения обеспечивается, когда максимум импульса излучения подсветки приходился на фронт усиленного спонтанного излучения усилителя яркости.

Впервые экспериментально показано, что сигнал на входе усилителя яркости должен быть сформирован до начала импульса сверхизлучения. В этом случае уровень фона, обусловленный усиленным спонтанным излучением, будет минимальным.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 19-79-10096-П).

Список литературы

1. Lavrukhin M.A., Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevsky D.E. Self-terminating barium ion laser at 614.2 nm // Opt. Laser Technol. 2022. V. 149, N 107625. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107625.
2. Shiyonov D.V., Trigub M.V., Sokovikov V.G., Evtushenko G.S. MnCl₂ laser with pulse repetition frequency up to 125 kHz // Opt. Laser Technol. 2020. V. 129, N 106302. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106302.
3. Kostadinov I.K., Temelkov K.A., Astadjov D.N., Slaveeva S.I., Yankov G.P., Sabotinov N.V. High-power

- copper bromide vapor laser // *Opt. Commun.* 2021. V. 50115, N 127363. DOI: 10.1016/j.optcom.2021.127363.
4. *Ponomarev I.V., Topchiy S.B., Andrusenko Y.N., Shalkina L.D.* The successful treatment of eyelid intradermal melanocytic nevi (Nevus of Miescher) with the dual-wavelengths copper vapor laser // *J. Laser. Medic. Sci.* 2021. V. 12. P. 1–3. DOI: 10.34172/jlms.2021.23
 5. *Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Груднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Кулаев С.П., Тарасенков М.В., Троицкий В.О., Федосов А.В.* Бистатическая оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн. Полевые эксперименты в 2016 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 2. С. 111–114.
 6. *Lyabin N.A., Kazaryan M.A., Asratyan A.A., Kazaryan S.M., Ambrozovich S.A., Krasovskii V.I., Mkhitarian R., Topoyan G., Morozova E.A., Andrienko O.S., Li Hongda, Sachkov V.I.* Current state of research in precision microprocessing and some of their applications // *Proc. SPIE.* 2019. V. 113222019, N 113221F. DOI: 10.1117/12.2550843.
 7. *Yermachenko V.M., Kuznetsov A.P., Petrovskiy V.N., Prokopova N.M., Strel'tsov A.P., Uspenskiy S.A., Strel'tsov A.P., Uspenskiy S.A.* Specific features of the welding of metals by radiation of high-power fiber laser // *Laser Phys.* 2011. V. 21, N 8. P. 1530–1537. DOI: 10.1134/S1054660X11160043.
 8. *Prokoshev V.G., Abramov D.V., Danilov S.U., Shishin S.I., Chizhov A.V., Arakelian S.M.* Real time diagnostics of the laser-induced thermochemical processes and nonlinear images on the surface of materials experiment and mathematical modeling // *Laser Phys.* 2011. V. 11, N 11. P. 1167–1171.
 9. *Li L., Ilyin A.P., Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Klenovskii M.S.* Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor // *Ceramics Intern.* 2018. V. 46, N 16. P. 19800–19808.
 10. *Trigub M.V., Platonov V.V., Evtushenko G.S., Osipov V.V., Evtushenko T.G.* Laser monitors for high speed imaging of materials modification and production // *Vacuum.* 2017. Vol. 143. P. 486–490.
 11. *Тригуб М.В., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О., Шиянов Д.В.* Бистатический лазерный монитор // *Письма в журн. техн. физ.* 2016. Т. 42, № 12. С. 51–56.
 12. *Васнев Н.А., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С.* Особенности работы усилителя яркости на парах бромида меди в схеме бистатического лазерного монитора // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 22, № 3. С. 247–253; *Vasnev N.A., Trigub M.V., Evtushenko G.S.* Features of operation of a brightness amplifier on copper bromide vapors in the bistatic scheme of a laser monitor // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 483–489.
 13. *Trigub M.V., Vasnev N.A., Evtushenko G.S.* Bistatic laser monitor for imaging objects and processes // *Appl. Phys. B: Laser. Opt.* 2020. V. 126, N 3. P. 1–7. DOI: 10.1007/s00340-020-7387-5.
 14. *Губарев Ф.А., Мостовицков А.В., Ильин А.П., Ли Л., Буркин Е.Ю., Свиридов В.В.* Лазерный монитор с независимой подсветкой для наблюдения процессов высокотемпературного горения нанопорошков металлов // *Письма в журн. техн. физ.* 2021. Т. 47, № 8. С. 20–24.
 15. *Тригуб М.В., Васнев Н.А., Китлер В.Д., Евтушенко Г.С.* Применение бистатического лазерного монитора для высокоскоростной визуализации процессов горения // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 12. С. 962–966.; *Trigub M.V., Vasnev N.A., Kitler V.D., Evtushenko G. S.* The use of a bistatic laser monitor for high-speed imaging of combustion processes // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 2. P. 154–159.
 16. *Astadjov D.N., Stoychev L.I., Dixit S.K., Nakhe S.V., Sabotinov N.V.* High-brightness cubr mopa laser with diffraction-limited throughout-pulse emission // *IEEE J. Quantum. Electron.* 2005. V. 41, N 8. P. 1097–1101. DOI: 10.1109/JQE.2005.850701.
 17. *Тригуб М.В., Васнев Н.А., Евтушенко Г.С., Димаки В.А.* Система синхронизации импульсно-периодического режима работы активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов // *Приборы и техника эксперимента.* 2019. № 1. С. 30–35. DOI: 10.1134/S0032816218060307.

M.V. Trigub, N.A. Vasnev. Features of maging formation in a bistatic laser active optics system.

The features of high-power and high-contrast imaging in a bistatic laser active optics system (laser monitor) are considered. In the developed system, a brightness amplifier has a larger volume than an illumination source, which makes provides for high-power contrast images of micro objects. For the first time, the influence of the time shift between a superradiance pulse of the amplifier and the time of signal arrival at its input on the contrast and power of images formed by one pulse was ascertained. It is shown that artifacts formed as a result of the superluminous radiation "parasitic" reflection and scattering from optical circuit elements significantly reduce the contrast and power of the generated signals. This effect can be eliminated by the generation of an amplifier input signal before the generation of amplified spontaneous emission. The optimal delay is 1 ns.