

УДК 621.373.8

Лазерный монитор для одновременной визуализации в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра

М.В. Тригуб[✉], П.И. Гембух, Н.А. Васнев, Д.В. Шиянов*

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

Поступила в редакцию 24.10.2022 г.;
после доработки 17.11.2022 г.;
принята к печати 20.01.2023 г.

Представлены результаты разработки активной оптической системы, так называемого лазерного монитора для формирования усиленных изображений одновременно в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра. Изображения формируются в активной среде усилителя яркости на переходах атома марганца за время, соответствующее импульсу усиления (генерации), что составляет порядка 25 нс для видимого диапазона и 35 нс для ИК-диапазона. Изображение регистрируется с использованием цифровых камер, в том числе на основе сенсора InGaAs российского производства. Впервые продемонстрированы изображения процессов, сопровождающихся фоновым излучением, которые сформированы одиночным импульсом усилителя яркости на парах хлорида марганца.

Ключевые слова: активные оптические системы, усилители яркости, ближний ИК-диапазон, получение изображений; active optical systems, brightness amplifiers, near-IR range, imaging.

Введение

Лазеры и системы на их основе — эффективные инструменты для решения различных практических и научных задач [1–8]. При этом спектральные, частотно-энергетические и пространственные параметры лазерного излучения определяют перспективность использования того или иного лазера на практике. Поэтому одними из приоритетных задач лазерной физики и техники являются расширение спектрального диапазона и улучшение частотно-энергетических характеристик лазерных сред. Несмотря на активное развитие твердотельных и волоконных лазеров [9–12], газовые активные среды используются при решении различных задач [13–18].

Один из ярких примеров эффективного применения газовых активных сред — скоростная визуализация объектов и процессов, экранированных фоновой засветкой. В этом случае среда лазера используется как частотно-избирательный усилитель с малой полосой усиления (1–10 пм) [19–22].

Наибольшее распространение для построения систем визуализации (лазерных мониторов) получили среды на переходах атома меди [23–26]. С помощью лазерных мониторов на их основе решались

задачи визуализации процессов при лазерной сварке [27, 28], лазерной абляции тугоплавких оксидов [29, 30], горения различных смесей [31], в том числе нанодисперсных [32, 33], и др. [34, 35]. Следует подчеркнуть, что визуализация проводилась в видимом диапазоне, что обусловлено спектральным диапазоном работы усилителя и регистрирующей аппаратуры. Для расширения спектрального диапазона лазерных мониторов необходим поиск эффективных активных сред, способных работать в режиме усиления сигналов с заданным распределением интенсивности, а также использование подходящих регистраторов (цифровых камер).

С точки зрения расширения спектрального диапазона визуализации современных лазерных мониторов наиболее перспективна среда на переходах атома марганца [36, 37], которая удовлетворяет требованиям, предъявляемым к усилителям яркости для построения лазерных активных оптических систем визуализации [23]. В частности, для усилителя яркости на парах хлорида марганца в [23] показана возможность работы с частотой следования импульсов усиления вплоть до 125 кГц, что позволяет проводить визуализацию с временным разрешением не хуже 8 мкс. Зафиксированы две спектральные линии видимого диапазона ($\lambda_1 = 534,1$ нм; $\lambda_2 = 542,0$ нм), а также три спектральные линии в ИК-диапазоне ($\lambda_3 = 1,289$ мкм; $\lambda_4 = 1,332$ мкм; $\lambda_5 = 1,362$ мкм) [38]. Регистрация изображений, сформированных с помощью усилителя яркости на переходах атома марганца, возможна с помощью

* Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru); Павел Ильич Гембух (gembukh.pavel@yandex.ru); Николай Алексеевич Васнев (vasnev.nickol@yandex.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (shiyonov73@mail.ru).

современных камер, функционирующих в ближнем ИК-диапазоне спектра. В работе [39] показаны перспективы использования камеры коротковолнового ИК-диапазона с сенсорами на основе гетероструктур InGaAs на подложке InP в лазерных мониторах с усилителями яркости на переходах атома марганца. Очевидно, что построение изображений одновременно в двух спектральных диапазонах, имеющих временные особенности формирования (сдвиг импульсов усиления), может быть использовано для изучения быстропротекающих процессов.

Целью работы является разработка системы визуализации на основе усилителей яркости на переходах атома марганца (лазерного монитора) для формирования и регистрации изображений одновременно в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра.

Усилитель яркости на переходах атома марганца

Для построения лазерного монитора был разработан усилитель яркости на парах хлорида марганца. Длина активной зоны составляла 50 см, диаметр 2 см, объем 157 см³. Температурный режим стенки газоразрядной трубки $T_{ГРТ}$ (850 °С) и контейнеров с хлоридом марганца T_{MnCl} (780 °С) обеспечивался двумя независимыми ПИД-регуляторами REX-C100. Активная среда возбуждается традиционным источником [40] с импульсным зарядом накопительной емкости ($C = 750$ пФ). Энергия, запасаемая в конденсаторе, составляла 82,14 мДж, удельный энерговклад — 523 мкДж/см³. В качестве коммутатора применялся тиратрон ТГИ1-1000/25. Указанные параметры накачки при оптимизации температурного режима работы активного элемента позволили получить суммарную мощность генерации 1,2 Вт. Мощность в ИК-диапазоне составила 425 мВт (выделялось с помощью фильтра ИКС-1), в видимом — 670 мВт (выделялось с помощью СЗС-25). Условия работы активного элемента на парах $MnCl_2$ и параметры возбуждения перечислены в таблице.

Параметры накачки и температурные режимы активного элемента на парах хлорида меди ($MnCl_2$)

f , кГц	C , пФ	P , Вт	U , кВ	I , А	$T_{ГРТ}$, °С	T_{MnCl} , °С
17	750	1380	14,8	174	850	780

Для оценки временных особенностей формирования усиленных изображений зафиксированы импульсы излучения в каждом спектральном диапазоне. Схема эксперимента для регистрации импульсов в видимом и ближнем ИК-диапазонах показана на рис. 1 (цв. вкладка).

Осциллограммы импульсов напряжения U и тока через ГРТ I и импульсов излучения в видимом и ближнем ИК-диапазонах показаны на рис. 2 (цв. вкладка) при работе без HCl и с оптимальной концентрацией HCl.

Результаты показали, что длительности импульсов составляют 25 нс в видимом диапазоне и 35 нс в ИК-диапазоне. Сдвиг импульсов — порядка 5 нс. Таким образом, разработанный активный элемент может быть использован для построения лазерного монитора.

Лазерный монитор

Для одновременной регистрации изображений в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра предложена схема лазерного монитора с системой синхронизации (рис. 3, цв. вкладка).

Принцип работы установки состоит в следующем. Сверхизлучение усилителя яркости 1 подсвечивает объект наблюдения 2. Отраженный и рассеянный сигнал, проходя через объектив 3, попадает в активную среду усилителя 1. Так как сигнал поступает в момент, когда среда является усиливающей, его распространение по активной среде приводит к увеличению интенсивности. Экран 4 расположен таким образом, чтобы на нем формировалось резкое увеличенное и перевернутое изображение объекта 2. За счет системы синхронизации 8 обеспечивается покадровый режим съемки, при котором каждый кадр камер 5 и 6 формируется одиночным импульсом усилителя яркости 1. Далее результаты сохраняются в персональном компьютере 7. Цифрой 5 обозначена SWIR-камера (SVUS000) с InGaAs-сенсором (производство НПО «Орион», г. Москва), которая позволяет регистрировать изображения в ИК-области спектра. Цифрой 6 обозначена камера машинного зрения Baumer VLG-20C.

Ранее была приведена мощность излучения активного элемента на парах хлорида марганца, работающего в режиме генератора. Однако при использовании активных сред на парах металлов в качестве усилителей яркости необходимо снижать концентрацию активного вещества на 30–50%. Таким образом, температура контейнеров с хлоридом марганца была уменьшена, в связи с чем суммарная средняя мощность излучения при использовании плоскопараллельного резонатора составила 715 мВт. Мощность сверхизлучения при этом была равна 30 мВт, при выделении спектральных диапазонов с помощью фильтров СЗС-25 и ИКС-1 мощность сверхизлучения в видимом и ближнем ИК-диапазонах составила 17 и 9 мВт соответственно (без учета потерь на фильтрах).

При визуализации использовался объектив «Индустар 51» ($F = 210$ мм). Результаты визуализации тестового объекта (металлической линейки) показаны на рис. 4 (цв. вкладка). В видимой области спектра изображения обладают достаточно высокой яркостью и контрастностью, чтобы как следует рассмотреть наблюдаемый фрагмент тестового объекта. Численные показатели качества изображений, сформированных в ИК-диапазоне, хуже.

Для одной пары изображений были построены графики распределения яркости пикселей, чтобы показать разницу между численными показателями качества изображений, сформированных в видимом

и ближнем ИК-диапазонах спектра. В видимом диапазоне наибольшее значение яркости составляет $243 \cdot 10^{-3}$ отн. ед., а в ИК-области спектра — $52 \cdot 10^{-3}$, т.е. более чем в 4,5 раза меньше. Средняя яркость изображений равна $13 \cdot 10^{-3}$ и $1,27 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. соответственно. Локальный контраст видимого изображения в диапазоне пикселей (225÷235) составляет 38,20 отн. ед. Локальный контраст изображения в ИК-области в том же диапазоне пикселей — 8,45 отн. ед. — в 4,5 раза меньше. Наибольшее значение локального контраста в ИК-области — 11,85 отн. ед.

Далее была проведена визуализация структурных превращений на поверхности бенгальской свечи во время ее горения (рис. 5, цв. вкладка), которые сопровождалась фоновым излучением.

Несмотря на низкие мощность усиленного спонтанного излучения (30 мВт) и отражательную способность выбранного объекта, в видимой области спектра удалось получить достаточное яркое для визуального анализа и математической обработки изображение. В ИК-области изображения также удалось зарегистрировать, но их яркость существенно ниже. Результаты визуализации позволяют установить момент начала горения и особенности его протекания. Видно, что волна горения распространяется по поверхности объекта наблюдения, приводя к его необратимым изменениям. Особенно хорошо видно приграничную область, на которой соединяется материал в исходном твердом состоянии и жидкий расплавленный металл. Скорость горения свечи составила приблизительно 2,8 мм/с. Фоновое излучение отсутствует на всех изображениях. Контрольные измерения показали, что к моменту окончания эксперимента мощность генерации снизилась до 460 мВт при прочих равных условиях.

Эксперимент доказывает принципиальную возможность наблюдения подобных процессов в ИК-области с помощью активных сред на парах металлов. Для повышения информативности визуализации необходимо использовать SWIR-камеры с более высоким временным разрешением. За счет оптимизации режима работы усилителя яркости можно добиться большего усиления оптических сигналов в ИК-области спектра.

Заключение

В работе впервые представлены результаты разработки и применения лазерного монитора для одновременной регистрации изображений, сформированных в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра. Показано, что временной сдвиг между началом формирования изображений в видимом (534,1 нм) и ближнем ИК- (1,289 нм, 1,332 нм) диапазонах составляет 5 нс, что может быть использовано при исследовании динамических явлений с высокой скоростью протекания. Экспериментально продемонстрировано, что доступные на рынке SWIR-камеры отечественного производства позволяют регистрировать изображения, сформированные одиночным им-

пульсом усиления активного элемента на парах хлорида марганца. Контраст изображений в диапазоне пикселей (225÷235) составляет 38,20 и 8,45 отн. ед. в видимой и ИК-областях спектра. При этом энергия оптического сигнала, освещающего объект, составляет менее 1 мкДж для каждого из спектральных диапазонов. Для улучшения численных показателей качества формируемых изображений требуется оптимизация режима работы, в том числе варьирование температуры контейнеров с рабочим веществом и мощности накачки при заданной частоте следования импульсов. Наличие фонового излучения не искажает формируемые изображения ни в видимом, ни в ИК-диапазонах.

В дальнейшем предполагается сопоставить режим работы усилителя яркости с численными показателями качества изображений для повышения эффективности применения лазерного монитора в диагностических задачах, а также повысить эффективность использования энергии импульса в ИК-области для изучения оптики и физики атмосферы. В частности, предполагается использовать данную среду для дистанционного зондирования методом дифференциального рассеяния.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-79-10096-П). Источник питания с импульсным зарядом рабочей емкости разработан в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Jung W., Kim H., Voronov A., Park S., Ryu J., Jeong S.H., Roh C.L. High-precision laser glass cutting for future display // J. Soc. Inform. Disp. 2022. V. 30, N 5. P. 462–470. DOI: 10.1002/jsid.1130.
2. Liu H., Guo Z., Yuan X., Gao Q., Duan X., Zhang X. Femtosecond laser processing and field emission properties of the FEAs on single crystal GdB6 (100) surface // Vacuum. 2022. V. 199. P. 110948. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.110948.
3. Liu H., Lin W., Hong M. Hybrid laser precision engineering of transparent hard materials: Challenges, solutions and applications // Light: Sci. Appl. 2021. V. 10, N 1. P. 162. DOI: 10.1038/s41377-021-00596-5.
4. Dogan G., Chiu F., Chen S.U.H., David M.R.T., Michalowski A., Schänzel M., Silber C., Schütz G., Grévent C., Keskinbora K. Micromachining of Al₂O₃ thin films via laser drilling and plasma etching for interfacing copper // Mater. Des. 2021. V. 210. P. 110114. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110114.
5. Wang B., Zhou L., Guo Y., Guo H., Zhong Y., Huang X., Ge Y., Wang Q., Chu X., Jin Y., Lan K., Yang M., Qu J. Cyanobacteria-based self-oxygenated photodynamic therapy for anaerobic infection treatment and tissue repair // Bioact. Mater. 2022. V. 12. P. 314–326. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2021.10.032.
6. Kwaśny M., Bombalska A. Applications of laser-induced fluorescence in medicine // Sensors. 2022. V. 22, N 8. P. 2956. DOI: 10.3390/s22082956.
7. Zeng W., Cai F. Ming, Wang F., Miao L., You F., Yao F. Finite element simulation of laser-generated ultrasonic waves for quantitative detection of internal defects in welds // Optik. 2020. V. 221. P. 165361. DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.165361.

8. *Moralev I., Kazanskii P., Bityurin V., Bocharov A., Firsov A., Dolgov E., Leonov S.* Gas dynamics of the pulsed electric arc in the transversal magnetic field // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. V. 53, N 42. DOI: 10.1088/1361-6463/ab9d5a.
9. *Wang W.C., Zhou B., Xu S.H., Yang Z.M., Zhang Q.Y.* Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers // *Prog. Mater. Sci.* 2019. V. 101. P. 90–171. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2018.11.003.
10. *Дианов Е.М.* Волоконные лазеры // *Фотон-Экспресс*. 2016. Т. 129, № 1. С. 22–25.
11. *Bowers M.S., Canalias C., Mirov S., Nilsson J., Saraceno C.J., Schunemann P.G.* Feature issue introduction: Advanced solid-state lasers // *Opt. Mater. Express*. 2022. V. 12, N 6. P. 20762–20766. DOI: 10.1364/ome.464524.
12. *Brauch U., Röcker C., Graf T., Abdou Ahmed M.* High-power, high-brightness solid-state laser architectures and their characteristics // *Appl. Phys. B: Laser. Opt.* 2022. V. 128, N 3. P. 1–32. DOI: 10.1007/s00340-021-07736-0.
13. *Батенин В.М., Глина В.Ю., Климовский И.И., Селезнев Л.А.* Применение оптических систем с усилителями яркости для исследования поверхностей электродов из графита и пирографита во время горения дуги // *Теплофизика высоких температур*. 1991. Т. 29, № 6. С. 1204–1210.
14. *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, N 2. P. 141–155. DOI: 10.1016/S0920-3796(01)00610-X.
15. *Saraev Y.N., Trigub M.V., Vasnev N.A., Semenchuk V.M., Nepomnyashiy A.S.* The imaging of the welding processes with the use of CuBr-laser // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11322. DOI: 10.1117/12.2554872.
16. *Пономарев И.В., Шакина Л.Д., Топчий С.Б., Ключарева С.В., Пушкарёва А.Е.* Лечение пиогенной granulемы излучением лазера на парах меди // *Вестн. дерматологии и венерологии*. 2021. Т. 97, № 2. С. 41–49. DOI: 10.25208/vdv1209.
17. *Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А., Шиганов И.Н.* Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди // *Научное издание технологий в машиностроении*. 2017. Т. 68, № 2. С. 36–48.
18. *Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э., Казарян М.А., Прохоров А.М., Фатеев Н.В.* Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах. М.: Физматлит, 2017. 228 с.
19. *Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyanov D.V., Evtushenko T.G., Kulagin A.E.* High-speed CuBr brightness amplifier beam profile // *Opt. Commun.* 2017. V. 383. P. 148–152. DOI: 10.1016/j.optcom.2016.09.001.
20. *Vuchkov N., Temelkov K.* New High-Power Metal Halide Vapour Lasers: Gas-Discharge Plasma Physics and Lasers' Applications. Australia, Adelaide: University of Adelaide, 2015. 194 p.
21. *Foster P.G.* Industrial applications of copper bromide laser technology: Ph.D. Thesis, 2005. 308 p.
22. *Little C.E.* Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Application. Chichester (UK): John Wiley&Sons, 1998. 620 p.
23. *Evtushenko G.S.* Methods and Instruments for Visual and Optical Diagnostics of Objects and Fast Processes. New York: Nova Science Publishers Inc., 2018. 184 p.
24. *Тригуб М.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С.* Визуализация объектов, расположенных на удалении до 5 м от CuBr-усилителя яркости, с импульсом излучения типичной длительности // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 9. С. 850–853. DOI: 10.15372/AOO20150911.
25. *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 стекла и пироуглерода // *Изв. ТПУ*. 2008. Т. 312, № 2. С. 97–100.
26. *Земсков К.И., Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г., Самсонова М.П., Скрипниченко А.С.* Лазерная обработка объектов с одновременным визуальным контролем в системе «генератор – усилитель» на парах меди // *Квант. электрон.* 1984. Т. 11, № 2. С. 418–420.
27. *Saraev Y.N., Trigub M.V., Vasnev N.A.* Copper bromide vapor laser for imaging of drip-transfer processes in electric arc welding // *The 14th Intern. Conf. on pulsed lasers and laser applications – «AMPL-2019»: Abstracts*. Tomsk: STT Publishing House, 2019. P. 104–105.
28. *Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Тригуб М.В., Перовская М.В.* Методика исследований характеристик теплопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом с видео регистрацией изображений в условиях лазерного когерентного излучения // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2018. Т. 5, № 1–2. С. 20–25.
29. *Osipov V.V., Evtushenko G.S., Platonov V.V., Thikhonov E.V., Kremenetskii M.V., Vasnev N.A., Gembukh P.I., Trigub M.V.* High-speed video recording of liquid melt spraying during ablation of the Y₂O₃ target using a fiber ytterbium laser // *2022 Intern. Conf. Laser Optics (ICLO)*. St. Petersburg, 2022. P. 1.
30. *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. V. 143. P. 486–490. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.03.016.
31. *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.
32. *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 // *Ceram. Int.* 2018. V. 44, N 16. P. 19800–19808. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.237.
33. *Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Smirnov A., Gubarev F.A.* Optical system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders // *IEEE Transac. Instrum. Meas.* 2020. V. 69, N 2. P. 457–468.
34. *Bushuev E.V., Yurov V.Y., Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Khomich A.A., Antonova I.A., Ashkinazi E.E., Shershulin V.A., Pashinin V.P., Konov V.I.* Express *in situ* measurement of epitaxial CVD diamond film growth kinetics // *Diam. Relat. Mater.* 2017. V. 72. P. 61–70. DOI: 10.1016/j.diamond.2016.12.021.
35. *Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Тригуб М.В., Шутко Ю.В.* Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 1. С. 85–90; *Rybka D.V., Andronikov I.V., Evtushenko G.S., Kozuyev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Kostyria I.D., Tarasenko V.F., Trigub M.V., Shutko Yu.V.*

- rev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Kostyrya I.D., Tarasenko V.F., Trigub M.V., Shut'ko Yu.V.* Corona discharge in atmospheric pressure air under a modulated voltage pulse of 10 ms // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 5. P. 449–454.
36. *Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Петухов Т.Д., Евтушенко Г.С.* Усилитель яркости на переходах атома марганца с частотой следования импульсов до 100 кГц // *Письма в журн. техн. физ.* 2018. Т. 44, № 24. С. 135. DOI: 10.21883/PJTf.2018.24.47041.17523.
 37. *Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С.* Активная среда на парах бромида марганца с внутренним реактором при частоте следования импульсов до 100 кГц // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 4. С. 321–325; *Trigub M.V., Shiyonov D.V., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S.* MnBr vapor active medium with a built-in reactor at 100-kHz pulse repetition frequency // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 4. P. 458–462.
 38. *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. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106302.
 39. *Васнев Н.А., Гембух П.И., Тригуб М.В.* Активная среда на парах хлорида марганца для визуализации в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра // *Тр. XXX Междунар. научн. конф. «Лазерно-информационные технологии ЛИТ-2022».* Новосибирск, 2022. С. 82–84.
 40. *Тригуб М.В., Огородников Д.Н., Димаки В.А.* Исследование источника накачки лазера на парах металлов с импульсным зарядом рабочей емкости // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 12. С. 1112–1115.

M.V. Trigub, P.I. Gembukh, N.A. Vasnev, D.V. Shiyonov. **Laser monitor for simultaneous imaging in the VIS and near-IR spectral ranges.**

The paper presents the results of the development of an active optical system (a laser monitor) to form enhanced images simultaneously in the visible and near-IR spectral regions. Imaging is carried out in the active medium of a manganese atom brightness amplifier. Images are formed for a time corresponding to the amplification (generation) pulse, which is about 25 ns for the visible region and 35 ns for the IR. Image recording is carried out using digital cameras, including those based on a Russian-made InGaAs sensor. Images of processes accompanied by background radiation formed by a single pulse of a brightness amplifier based on manganese chloride vapors are shown for the first time.

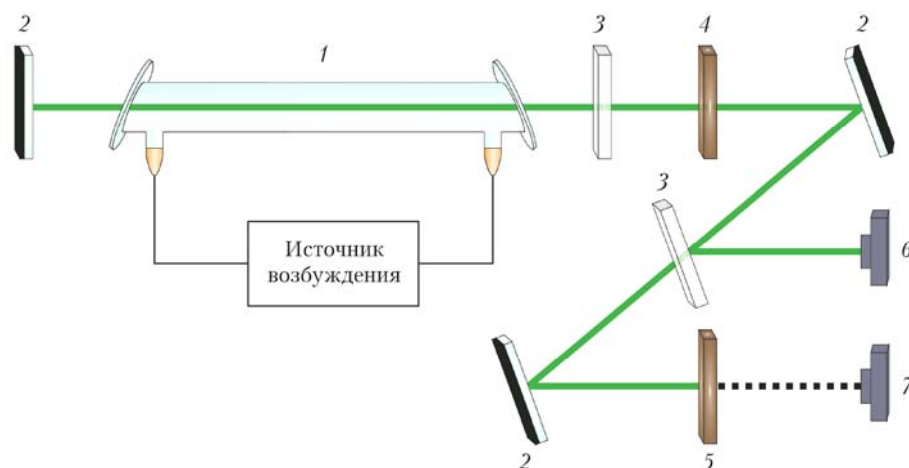


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – активный элемент усилителя яркости; 2 – глухое зеркало; 3 – полупрозрачная пластинка; 4 – нейтральный светофильтр (НС-3); 5 – фильтр (ИКС1); 6 – фотодиод DET-10А/М (200–1100 нм); 7 – фотодиод DET-10Н/М (500–1700 нм)

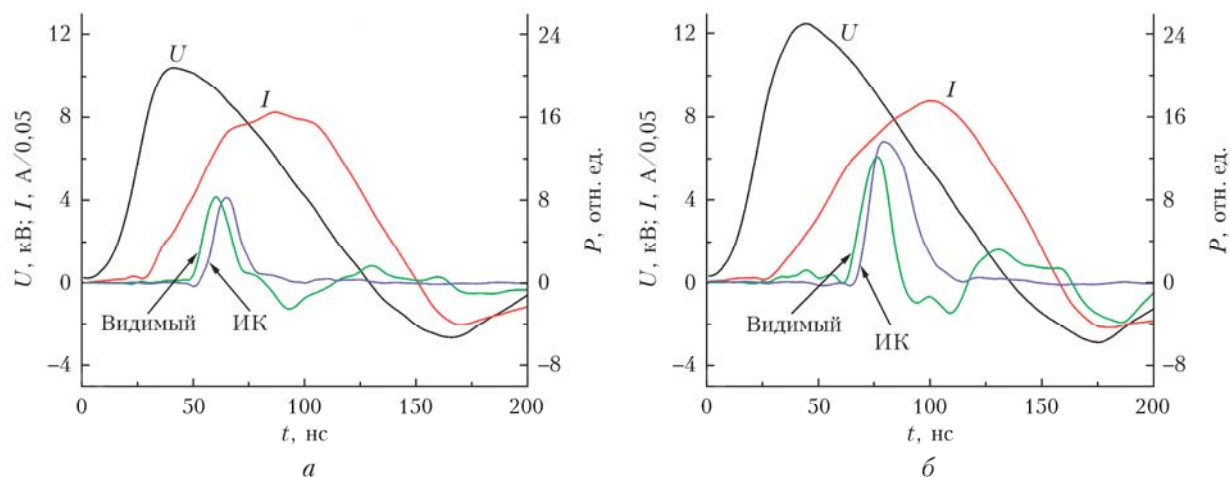


Рис. 2. Осциллограммы импульсов возбуждения (U , I) и генерации при работе без водородсодержащей добавки (а) и с ней (б)

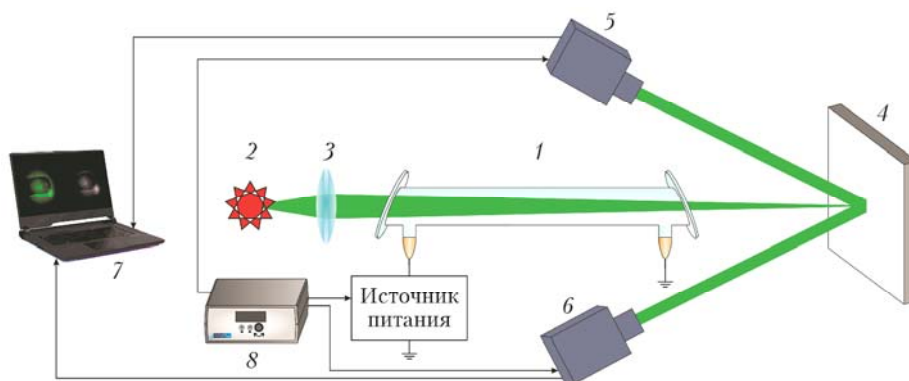


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – усилитель яркости; 2 – объект наблюдения; 3 – объектив; 4 – проекционный экран; 5 – SWIR-камера (Orion SVUS000); 6 – камера машинного зрения Baumer VLG-20C; 7 – компьютер; 8 – система синхронизации

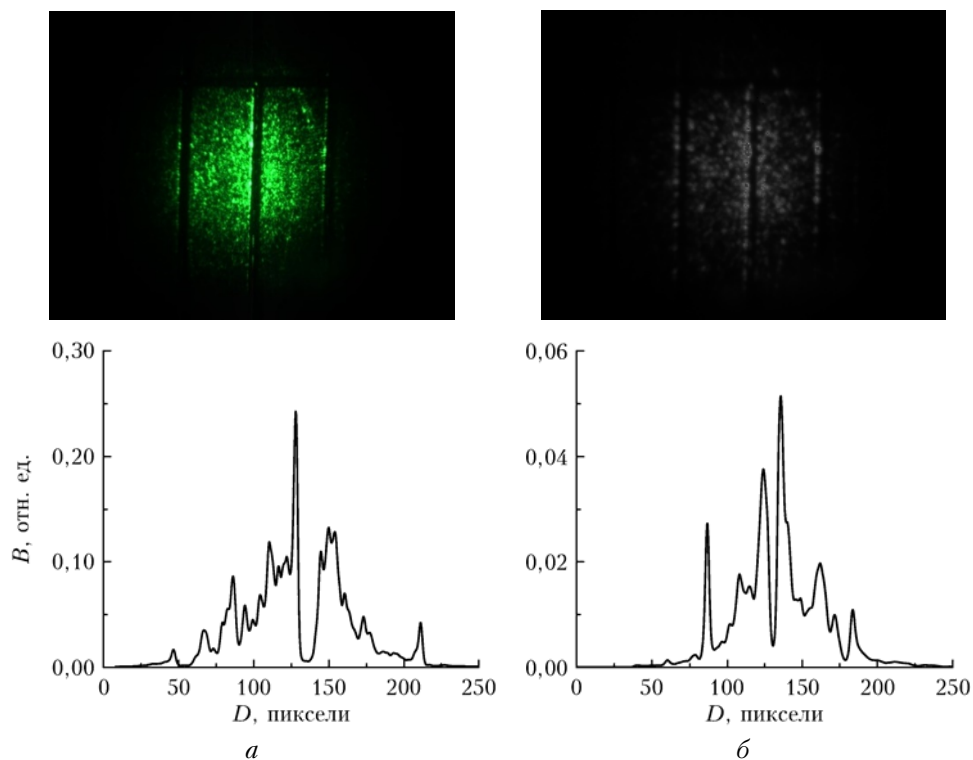


Рис. 4. Изображения тестового объекта (металлической линейки) в видимой (*а*) и ближней (*б*) ИК-областях, а также распределение интенсивности по указанной линии (B — яркость, D — дистанция по горизонтали)

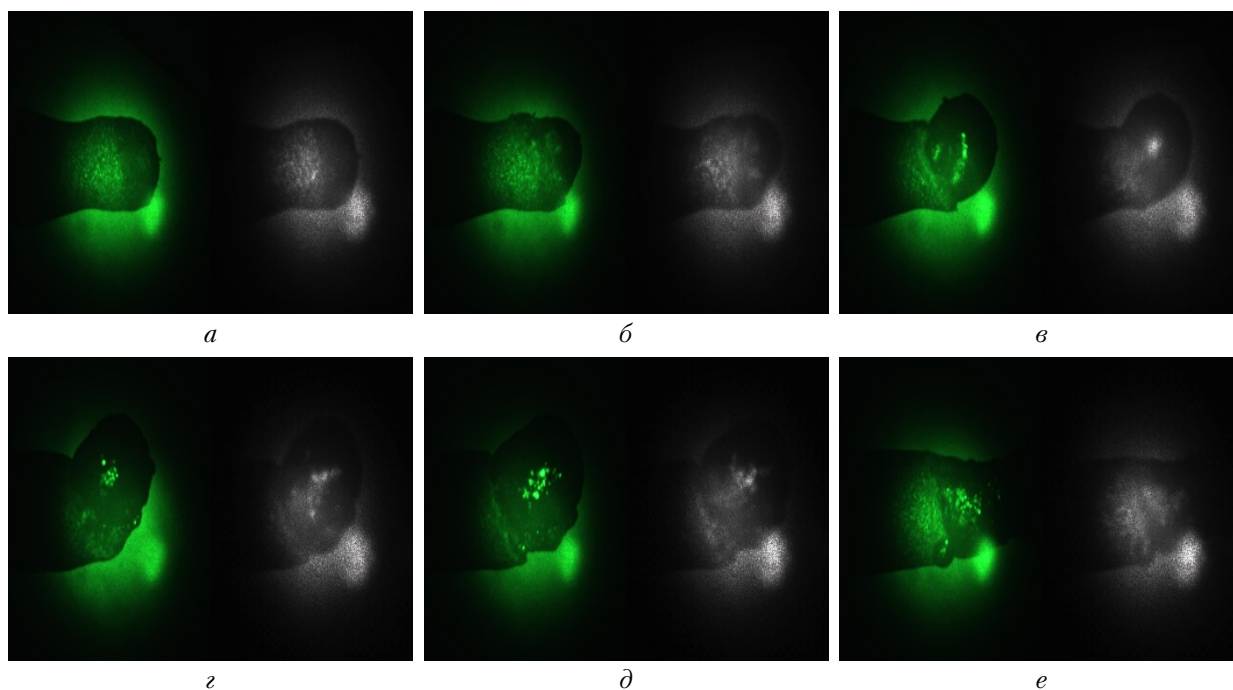


Рис. 5. Визуализация процесса горения бенгальской свечи в видимой и ИК-областях: исходный образец (*а*); момент начала горения (*б*); горение объекта (*в–е*)