

УДК 621.375.8

PACS: 42.50.Gy

Активные оптические системы с усилителями яркости коротковолнового ИК-диапазона

М. В. Тригуб, Д. В. Шиянов, П. В. Храбров, И. Д. Бурлаков

Представлены результаты разработки активной оптической системы с усилителем яркости изображения на самоограниченных переходах атома марганца. Экспериментально показано, что усилитель яркости на парах хлорида марганца позволяет преобразовывать оптические сигналы (изображения) в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра с высоким временным разрешением (до 100 кГц), что открывает новые возможности для проведения визуально-оптического контроля. Показаны перспективы применения визуализации на ИК-переходах атома марганца (1289 нм и 1332 нм) с использование камер коротковолнового инфракрасного диапазона спектра на основе арсенида индия галлия (InGaAs) производства АО «НПО «Орион». Проведено сопоставление изображений, формируемых на видимых переходах (534,1 и 542 нм) с изображениями, полученными на ИК-переходах (1289 и 1332 нм). Показана возможность регистрации изображения, формируемого одним импульсом усиления (длительность 40 нс).

Ключевые слова: лазерный монитор, активная оптическая система, усилитель яркости, высокоскоростная визуализация, лазеры на парах металлов, коротковолновый ИК-диапазон, SWIR, InGaAs.

Ссылка: Тригуб М. В., Шиянов Д. В., Храбров П. В., Бурлаков И. Д. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 351.

Reference: M. V. Trigub, D. V. Shiyarov, P. V. Khrabrov, and I. D. Burlakov, Usp. Prikl. Fiz. 8 (5), 351 (2020).

Введение

Достижения в области фотоники находят применение в современных оптических приборах различного назначения. Одной из практических задач лазерной

физики является расширение эффективного спектрального диапазона оптико-электронных систем, в том числе создание источников и приемников излучения. Решение такой задачи для коротковолнового ИК-диапазона (1,2–2,2 мкм) является актуаль-

Тригуб Максим Викторович¹, с.н.с., к.т.н.

Шиянов Дмитрий Валерьевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Храбров Павел Владимирович², руководитель проектов.

Бурлаков Игорь Дмитриевич², зам. ген. директора по инновациям и науке, д.т.н.

¹ Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения РАН (ИОА СО РАН). Россия, 634055, г. Томск, площадь Академика

Зуева, 1.

E-mail: trigub@iao.ru; shiyarov73@mail.ru

² АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: khrabrov.p@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01 октября 2020 г.

© Тригуб М. В., Шиянов Д. В., Храбров П. В., Бурлаков И. Д., 2020

ным для достижения принципиально новых характеристик приборов визуально-оптического контроля. Визуально-оптические методы диагностики всецело используются для решения как фундаментальных (исследовательских), так и прикладных задач. Примером может служить задача визуализации процессов, протекающих в условиях интенсивных фоновых засветок различной природы. Сложность в визуально-оптической диагностике таких процессов обусловлена фоновым излучением, которое экранирует наблюдаемый объект. Традиционный метод лазерной подсветки [1] при больших уровнях засветки может оказаться непригодным. Одним из эффективных инструментов для визуализации в таких условиях являются активные оптические системы (АОС) с усилителями яркости (УЯ) изображения [2–4]. Отличительной особенностью лазерных мониторов является механизм формирования изображения. В лазерном мониторе изображение, формируемое оптической схемой, усиливается в активной среде усилителя яркости и лишь затем поступает на вход скоростного регистратора [5]. Расширение спектрального диапазона АОС предполагает разработку эффективных УЯ на переходах различных металлов. Среда на переходах атома марганца является весьма перспективной для построения АОС, функционирующих в коротковолновом ИК-диапазоне [6, 7]. Важной особенностью является доступность регистрирующих устройств, работающих в коротковолновом диапазоне спектра.

В работе представлены результаты разработки усилителя яркости изображения, работающего в видимом и коротковолновом ИК-диапазоне. Показана возможность построения лазерных мониторов. В качестве регистратора использована SWIR камера.

Камера коротковолнового ИК-диапазона

Впервые в России отечественное матричное фотоприемное устройство (МФПУ)

на основе гетероструктур InGaAs на подложке InP было разработано и освоено в производстве АО «НПО «Орион». Формат первого МФПУ был всего 320×256 элементов, с шагом фоточувствительных элементов 30 мкм. При изготовлении матрицы использовались гетероструктуры In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP также отечественного производства. Гибридная сборка, состоящая из матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ), состыкованной с кремниевой БИС считывания, расположена на двухкаскадном термоэлектрическом охладителе, работающем на эффекте Пельтье и установленным в корпусе МФПУ с оптическим окном (рис. 1). Термоэлектрический охладитель при этом используется для термостабилизации, а не для глубокого охлаждения. В настоящее время создано МФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм.



Рис. 1. МФПУ на основе гетероструктуры InGaAs, в корпусе, без входного окна.

МФЧЭ выполнена на основе *n*Vp-структуры с барьерным и пассивирующим широкозонным слоем [8]. Данное решение позволило улучшить параметры МФПУ по сравнению с выполненными ранее по планарной и мезотехнологии. На основе созданного МФПУ формата 640×512 элементов разработана малогабаритная камера коротковолнового ИК-диапазона (рис. 2), которая была использована в составе активной оптической системы. Основные характеристики камеры коротковолнового ИК-диапазона спектра приведены в таблице.

Таблица

Параметры камеры

Наименование параметра	Значение, величина
Спектральный диапазон работы	900–1700 нм
Формат	640×512
Время накопления	30 мкс – 1000 мс
Кадровая частота	1–200 Гц
Разрядность АЦП	14 бит
Интерфейс	USB 2.0
Потребляемая мощность (без ТЭО)	0,3 А × 5 В
Максимальная потребляемая мощность ТЭО (при термостабилизации)	0,8 А × 12 В
Размеры, без объектива (В×Ш×Г)	62 мм × 56 мм × 60 мм
Вес	250 г
Крепление для объектива	C-mount



Рис. 2. Камера коротковолнового ИК-диапазона спектра.

Усилитель яркости на переходах атома марганца

Для оценки возможности построения лазерных мониторов коротковолнового ИК-диапазона был разработан усилитель яркости на парах хлорида марганца [9]. Длина разрядного канала газоразрядной трубки (ГРТ), составляла 50 см, диаметр 2 см. Для возбуждения активной среды использовался источник с импульсным зарядом рабочей емкости [10] с последующим ее разрядом на ГРТ. В качестве разрядников использовались тиратрон ТГИ1-1000/50 и таситрон ТГУ1-1000/50. На рис. 3 приведена схема энергетических уровней атома марганца с обозначением известных лазерных переходов.

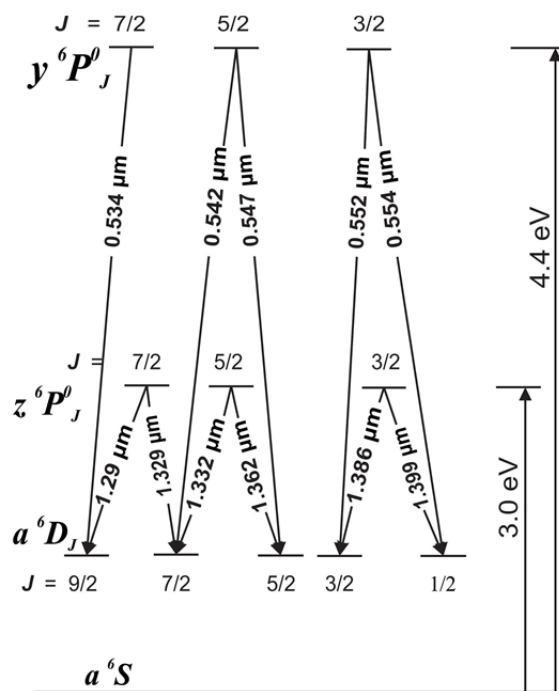


Рис. 3. Схема энергетических уровней атома марганца.

Отличительной особенностью УЯ на переходах атома марганца является возможность получения усиленных изображений одновременно в нескольких спектральных диапазонах. На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов возбуждения и излучения.

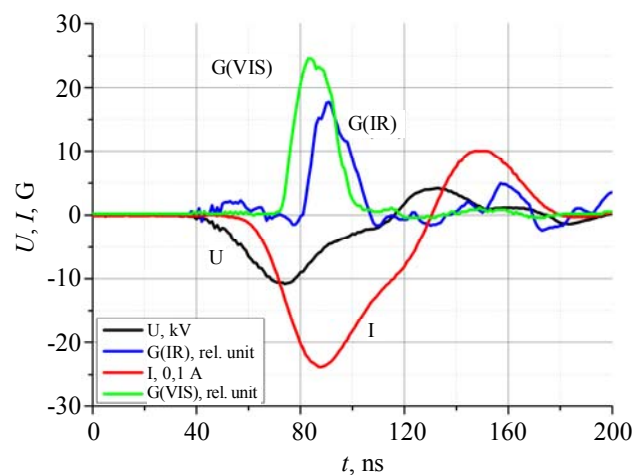


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения (U), тока (I) импульсов генерации видимого и ИК-диапазонов $G(VIS)$ и $G(IR)$ соответственно.

Для детектирования оптических импульсов использовались коаксиальный фотоприемник ФЭК-22 и PIN-фотодиод DET10N/M. Видно, что импульс излучения (усиления) на видимых переходах опережает импульс на ИК-переходах. Длительность импульса излучения на ИК-переходе на 5 нс меньше, чем для видимого.

Важной особенностью для усиления оптических сигналов является распределение энергии излучения между диапазонами и, следовательно, усиления на них. Распределение мощности излучения (усиления) между ИК-переходами и переходами в видимой области спектра зависит от условий возбуждения и концентрации паров рабочего вещества. В частности, на частоте 100 кГц усилитель обеспечивает формирование сигналов на длинах волн 534,1 и 542,0 нм [9]. Основная доля излучения сосредоточена на переходе 534,1 нм. Также регистрируется усиление на трех длинах волн ИК-диапазона: 1289, 1332, 1362 нм, соотношение интенсивности 3:2:1 соответственно. На рис. 5 показана зависимость мощности в каждом спектральном диапазоне (VIS и IR), а также суммарной мощности (Total) при различной концентрации паров рабочего вещества, определяемой температурой контейнеров с хлоридом марганца. Излучение форми-

ровалось плоскопараллельным резонатором. Коэффициент отражения глухого зеркала составлял 82 %, в качестве выходного зеркала использовалась кварцевая плоскопараллельная пластина.

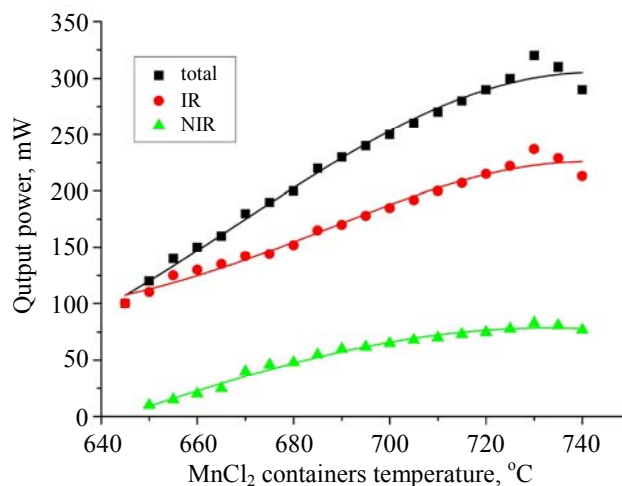


Рис. 5. Зависимость мощности излучения от концентрации паров рабочего вещества.

Видно, что при возбуждении с частотой 100 кГц большая часть энергии запасается на верхних рабочих уровнях ИК-переходов (Zp), что свидетельствует о большем усилении на этих переходах. Снижение частоты до 17 кГц приводит к перераспределению мощности излучения: 1,4 Вт на видимых переходах и 0,5 Вт на ИК. На рис. 5 приведены зависимости мощности излучения с плоскопараллельным резонатором в каждом спектральном диапазоне при различной температуре контейнеров с рабочим веществом. Исходя из этой зависимости была определена оптимальная температура – 730 °С.

Лазерный монитор видимого и коротковолнового ИК-диапазонов спектра

Далее была реализована АОС. На рис. 6 представлена схема лазерного монитора, позволяющая регистрировать изображения, сформированные одиночным импульсом усилителя яркости. Усилитель яркости

(1), усиливает изображение тестового объекта (2), сформированного с помощью объектива (3).

После этого изображение регистрируется с помощью цифровой камеры (4). Для спектральной селекции изображений использовались цветные фильтры (5 и 5') – СЗС-25 и ИКС-1, которые обеспечивали фильтрацию от ИК- и видимого излучения соответственно. Входной сигнал формировался с помощью объектива Индустар-51, в качестве объекта применялась щель монохроматора МДР-23. Для синхронизации

работы усилителя яркости (1) и цифровой камеры (4) использовалась схема синхронизации (7).

Результаты визуализации представлены на рис. 7. Как видно, контраст изображений практически идентичен (88 и 82 %), что говорит о высокой эффективности работы преобразователя оптического сигнала (УЯ) как в видимом, так и в ИК-диапазонах спектра. Энергия сигнала, несущего изображения, составляла 40 и 20 мкДж для видимого и ИК-диапазонов соответственно.

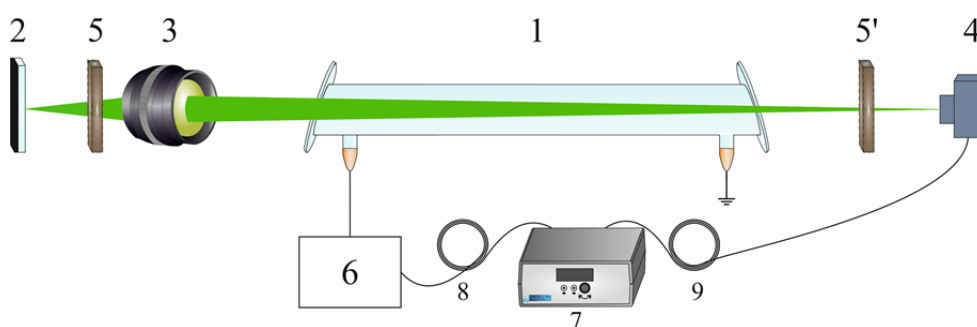
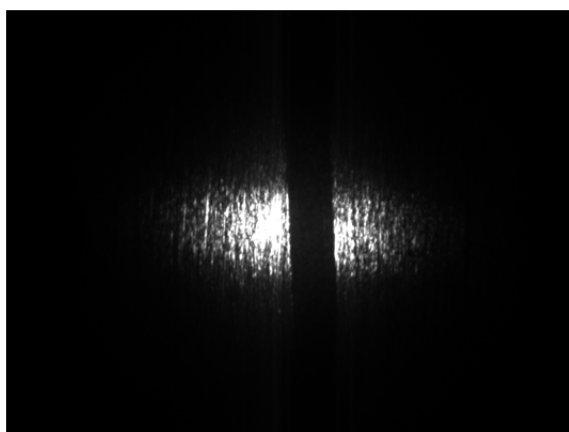
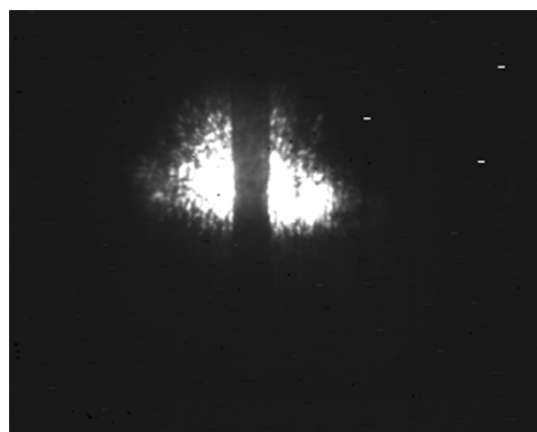


Рис. 6. Схема лазерного монитора.



а



б

Рис. 7. Результаты формирования изображения в видимом диапазоне спектра (а) и в ИК (б).

Заключение

В работе показана возможность использования разработанного функционального преобразователя оптических сигналов (усилителя яркости) на переходах атома марганца для формирования усиленных изображений в схеме построения лазерных мониторов. При использова-

нии камеры коротковолнового инфракрасного диапазона спектра (англ. short-wavelength infrared, сокращённо SWIR) удалось зарегистрировать изображение, сформированное одиночным импульсом усиления на переходах 1289, 1332, 1362 нм. Контраст получаемых изображений достаточен для проведения математического анализа и получения численных показате-

лей качества. Наличие фонового излучения не искажает качество получаемых изображений.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментов Соковикову В. Г., а также Евтушенко Г. С. за интерес к работе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-10096. Исследование спектральных характеристик активного элемента выполнено в рамках Гос. задания ИОА СО РАН, проект № АААА-А17-117021310150-0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Webb C. E., Jones J. D. C. Handbook of Laser Technology: Applications.* – IoP Publishing, 2004.
2. *Земсков К. И., Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 1. С. 14.*
3. *Бункин Ф. В., Земсков К. И., Казарян М. А., Кондратьев М. А., Логачев Ф. А., Петраш Г. Г., Прохоров А. М., Савранский В. В., Сисакян И. Н., Ситников Г. А. // ДАН СССР. 1978. Т. 243. № 6. С. 1568.*
4. *Абросимов Г. В., Польский М. М., Саенко В. Б. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 4. С. 850.*
5. *Trigub M. V., Platonov V. V., Osipov V. V., Evtushenko T. G., Evtushenko G. S. // Vacuum. 2017. Vol. 143. P. 486.*
6. *Bokhan P. A., Burlakov V. D., Gerasimov V. A., Solomonov V. I. // Sov. J. Quantum Electron. 1976. Vol. 6. № 6. P. 672.*
7. *Trigub M. V., Shiyanov D. V., Sukhanov V. B., Evtushenko G. S. // Atmospheric and oceanic optics. 2014. Vol. 27. № 5. P. 458.*
8. *Хамидуллин К. А., Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О., Полесский А. В., Бурлаков И. Д., Чепурнов Е. Л., Гусарова Н. И., Попов С. В. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 95.*
9. *Тригуб М. В., Шиянов Д. В., Суханов В. Б., Петухов Т. Д., Евтушенко Г. С. // Письма в ЖТФ. 2018. Вып. 24. С. 135.*
10. *Ogorodnikov D. N., Trigub M. V., Torgaev S. N., Vasnev N. A., Evtushenko T. G. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016 June. Vol. 124. Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012030*

PACS: 42.50.Gy

Active optical systems with brightness amplifiers in the short-wave IR range

M. V. Trigub¹, D. V. Shiyanov¹, P. V. Khrabrov², and I. D. Burlakov²

¹ V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS)
1 Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russia

² Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received October 01, 2020

The results of the development of an active optical system with an image brightness amplifier based on self-limited transitions of the manganese atom are presented. It has been experimentally shown that a manganese chloride vapor brightness amplifier can convert optical signals (images) in the visible and near-IR spectral ranges with a high temporal resolution (up to 100 kHz), which opens up new possibilities for visual-optical control. The prospects for the use of visualization at the IR transitions

of the manganese atom (1289 nm and 1332 nm) with the use of short-wave infrared cameras based on indium gallium arsenide (InGaAs) produced by JSC “SPA “Orion” are shown. A comparison of images formed at visible transitions (534.1 and 542 nm) with images obtained at IR transitions (1289 and 1332 nm) has been carried out. The possibility of recording an image formed by one amplification pulse (duration 40 ns) is demonstrated.

Keywords: laser monitor, active optical system, brightness amplifier, high speed imaging, metal vapor lasers, shortwave infrared, SWIR, InGaAs.

REFERENCES

1. C. E. Webb and J. D. C. Jones, *Handbook of Laser Technology: Applications* (IoP Publishing, Britain, 2004).
2. K. I. Zemskov, A. A. Isaev, M. A. Kazaryan, and G. G. Petrash, *Sov J Quantum Electron* **4** (1), 14 (1974).
3. F. V. Bunkin, M. A. Kazaryan, M. A. Kondrat'ev, G. G. Petrash, A. M. Prokhorov, V. V. Savransky, I. N. Sisakyan, G. A. Sitnikov, and K. I. Zemskov, *Microscopica Acta* **82** (3), 229 (1979).
4. G. V. Abrosimov, M. M. Pol'skii, and Yu. V. Saenko, *Sov J Quantum Electron* **18** (4), 544 (1988), DOI: QE1988v018n04ABEH012099
5. M. V. Trigub, V. V. Platonov, V. V. Osipov, T. G. Evtushenko, and G. S. Evtushenko, *Vacuum* **143**, 486 (2017).
6. P. A. Bokhan, V. D. Burlakov, V. A. Gerasimov, and V. I. Solomonov, *Sov. J. Quantum Electron* **6** (6), 672 (1976).
7. M. V. Trigub, D. V. Shiyanov, V. B. Sukhanov, and G. S. Evtushenko, *Atmospheric and oceanic optics* **27** (5), 458 (2014).
8. K. A. Khamidullin, D. L. Baliev, P. S. Lazarev, K. O. Boltar, A. V. Polesskiy, I. D. Burlakov, E. L. Chepurnov, N. I. Gusarova, and S. V. Popov, *Applied Physics*, No. 6, 95 (2017).
9. M. V. Trigub, D. V. Shiyanov, V. B. Sukhanov, T. D. Petukhov, and G. S. Evtushenko, *Technical Physics Letters* **44** (12), 1180 (2018), DOI: 10.1134/S106378501812057X
10. D. N. Ogorodnikov, M. V. Trigub, S. N. Torgaev, N. A. Vasnev, and T. G. Evtushenko, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **124** (1), (June 2016), DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012030