

09;15

## Усилитель яркости на переходах атома марганца с частотой следования импульсов до 100 kHz

© М.В. Тригуб<sup>1,2</sup>, Д.В. Шиянов<sup>1</sup>, В.Б. Суханов<sup>1</sup>, Т.Д. Петухов<sup>1,2</sup>,  
Г.С. Евтушенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: trigub@tpu.ru

Поступило в Редакцию 10 сентября 2018 г.

Представлены результаты разработки и исследования усилителя яркости изображений на переходах атома марганца для задач визуализации объектов в активных оптических системах. Показана принципиальная возможность использования разработанного активного элемента для визуализации объектов и процессов в двух спектральных диапазонах: видимом и ближнем ИК. Получены профили пучка излучения активного элемента при частоте следования импульсов до 100 kHz.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.24.47041.17523

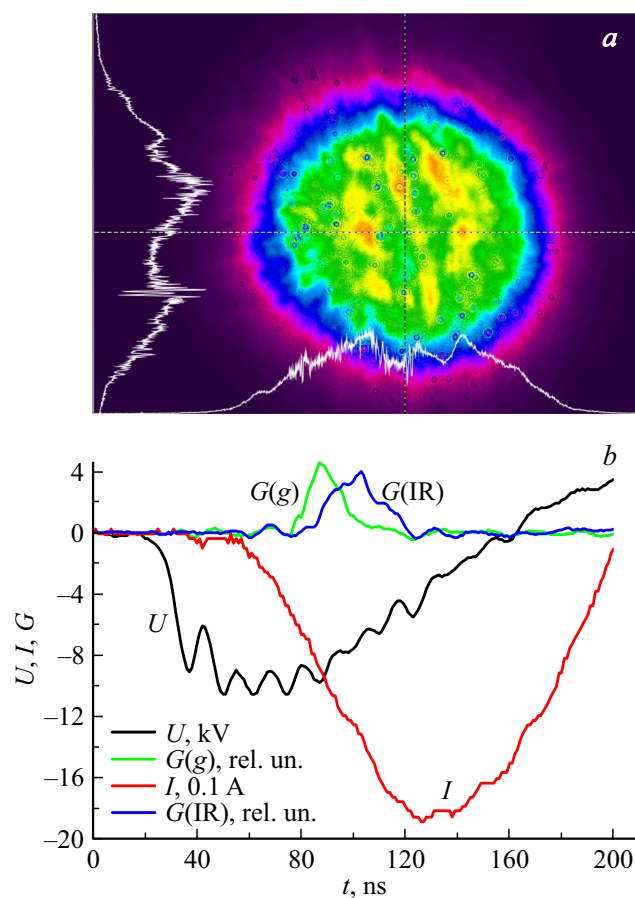
В последние годы интерес к активным средам на парах металлов обусловлен возможностью создания скоростных усилителей яркости (УЯ) видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра. Они используются для построения активных оптических систем (АОС) для визуализации объектов и быстропротекающих процессов в условиях мощной фоновой засветки — лазерных мониторов (ЛМ). Традиционный метод лазерной подсветки [1] при больших уровнях засветки может оказаться непригодным. В этом случае эффективно работают ЛМ с УЯ на переходах атома меди [2]. Расширение спектрального диапазона АОС предполагает разработку эффективных УЯ на переходах различных металлов. Такие исследования были проведены для различных сред, например железа [3], однако получить достаточный уровень сверхизлучения не удалось. Одной из перспективных сред для построения АОС, на наш взгляд, является среда на парах марганца, в которой усиление одновременно реализуется на переходах в видимой и ближней ИК-областях спект-

ра [4]. Это позволит производить визуализацию в данных спектральных диапазонах, а также преобразовывать изображения из ИК- в видимый диапазон. Метод преобразования основан на взаимодействии излучения в среде на двух связанных переходах атома марганца. Насыщение усиления на одном из связанных переходов приводит к значительной амплитудной модуляции усиления (излучения) на другом [5]. В отличие от меди природный марганец имеет один изотоп  $Mn^{55}$ , соответственно ширины компонент сверхтонкой структуры составляют менее 1 pm [6]. Это обеспечит узкополосное усиление сигнала, несущего информацию об объекте, при этом достигается глубокая фильтрация сигнала от излучения широкополосной засветки. Как известно, временное разрешение АОС ограничивается частотой следования импульсов (ЧСИ) УЯ, и лучшее значение ( $10^{-5}$  s) получено для активной среды на парах меди при частоте следования импульсов 100 kHz [2].

В настоящей работе представлены результаты исследования характеристик излучения и усиления активной среды  $MnCl_2$  в широком диапазоне ЧСИ накачки (от 10 до 100 kHz). Определен вклад линий видимого и ИК-диапазонов спектра в суммарную мощность излучения. Измерены радиальные профили излучения, определяющие поле зрения и качество получаемого изображения, проведена визуализация тест-объекта.

Использовался активный элемент на парах хлорида марганца с длиной активной зоны 30 см и диаметром 1 см, давление буферного газа (Ne) составляло 30 Torr. Возбуждение активной среды производилось по схеме прямого разряда накопительного конденсатора через импульсный трансформатор [7]. Измерение электрических характеристик разряда осуществлялось с помощью датчика тока Pearson Current Monitor 8450, датчика напряжения Tektronics P6015A и осциллографа LeCroy WJ-324. Коммутатором на низких частотах следования служил тиратрон ТГИ1-1000/25, на высоких — таситрон ТГУ1-1000/25. Для регистрации импульсов излучения применялись фотодиоды Thorlabs DET 10N/M (для ИК-диапазона) и DET 10A/M (для видимого диапазона).

Для диапазона частота от 10 до 20 kHz максимальная мощность генерации получена на ЧСИ 17 kHz. При этом емкость накопительного конденсатора составляла 500 pF, напряжение на выпрямителе устанавливалось 4.4 kV, ток 150 mA. Средняя мощность по всем линиям излучения составила 500 mW. Спектральные исследования показали, что в видимой области спектра излучения присутствуют линии 534.1 nm



**Рис. 1.** *a* — профиль генерации, *b* — осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ ( $U$ ), тока через ГРТ ( $I$ ), излучения на переходах видимого диапазона ( $G(g)$ ) и ИК-диапазона ( $G(IR)$ ).

и 542.0 nm, при этом ббльшая часть излучения сосредоточена на линии 534.1 nm. В ИК-области спектра зафиксированы линии 1290, 1330 и 1360 nm, имеющие общие нижние рабочие уровни с линиями видимого диапазона спектра. Следовательно, при визуализации объекта

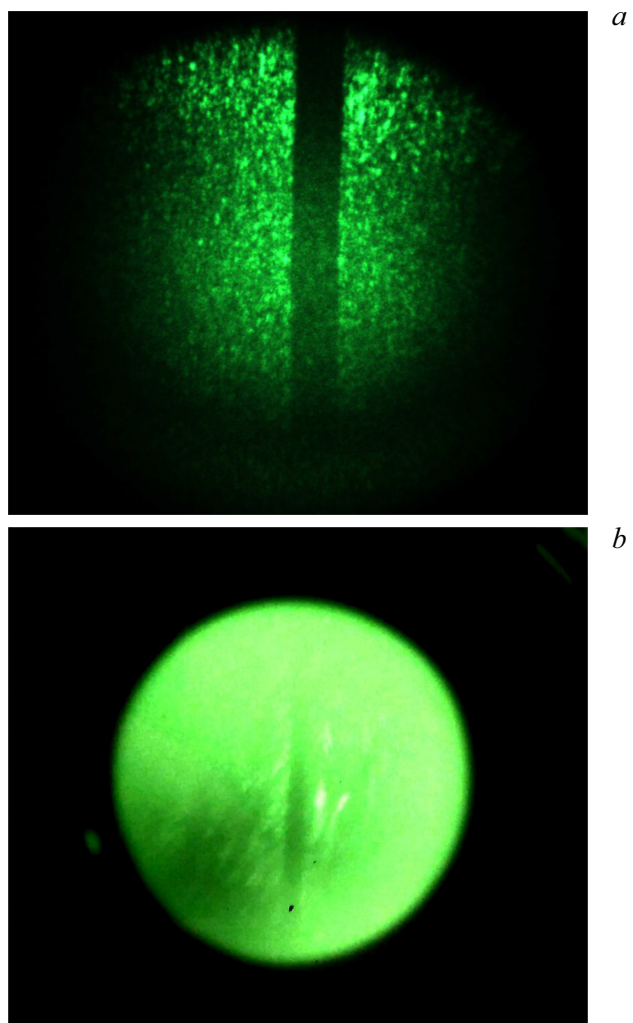
на основных ИК-линиях 1290 и 1330 nm возможно формирование негативного изображения в зеленом цвете.

Импульсы напряжения на газоразрядной трубке (ГРТ), тока через ГРТ и излучения показаны на рис. 1, *b*. Длительности импульсов излучения составляют 10–15 ns для линий видимого диапазона, 15–20 ns для ИК-линий. Профиль пучка генерации представлен на рис. 1, *a*. Можно отметить, что он достаточно однороден.

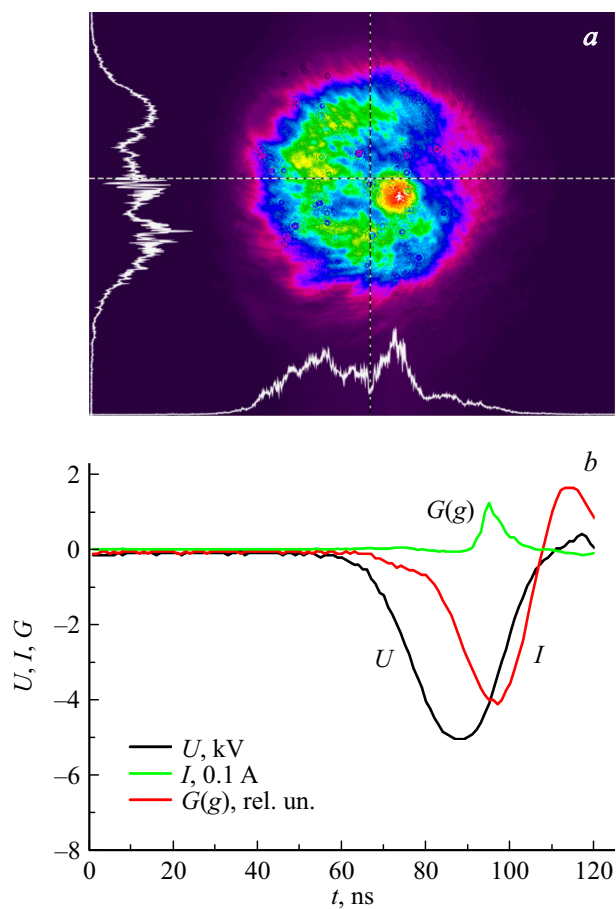
Результаты визуализации тестового объекта (щель монохроматора с максимальным раскрытием 4 mm) в схеме ЛМ [8] представлены на рис. 2. На рис. 2, *a* показано изображение, полученное в зеленом спектре усиления, на рис. 2, *b* — изображение в ИК-спектре усиления.

Можно отметить, что с точки зрения получения максимального контраста формируемого изображения существует оптимум, который отличается от условий, обеспечивающих максимальную мощность генерации. Наибольшая область зрения и контраст получаемого изображения достигаются при меньшей концентрации паров рабочего вещества. Аналогичные результаты были получены ранее для активной среды на переходах атома меди [2,8]. При повышении мощности накачки с 341 до 422 W происходило увеличение контраста. Дальнейшее повышение мощности накачки приводит к уменьшению области зрения АОС из-за уменьшения диаметра усиления среды. Низкий контраст изображений, формируемых на ИК-переходах УЯ, на наш взгляд, объясняется используемой регистрирующей аппаратурой. Использовался электронно-оптический преобразователь, с помощью которого формировалось изображение на экране. Для регистрации таких изображений целесообразно использовать SWIR-камеры.

Далее было проведено исследование возможности работы данного активного элемента при повышенных ЧСИ (до 100 kHz). Для этого схема накачки была модифицирована, в качестве коммутатора был использован таситрон ТГУ1-1000/25. На рис. 3 представлены осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ, тока через ГРТ, импульса генерации при ЧСИ 100 kHz, а также профиль пучка генерации при указанной ЧСИ. Средняя мощность излучения достигала 320 mW, а соотношение мощностей составляло 270 mW (ИК-диапазон) и 84 mW (видимый диапазон). Повышение частоты следования импульсов приводит к перераспределению мощности генерации в сторону ИК-спектра. Этот факт накладывает определенные ограничения на возможность использования высокочастотных УЯ на переходах атома марганца



**Рис. 2.** Визуализации щели монохроматора в ЛМ при использовании усиления на переходах видимого диапазона (*a*) и ИК-диапазона (*b*).



**Рис. 3.** *a* — профиль генерации при ЧСИ 100 kHz без добавки HCl, *b* — осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ ( $U$ ), тока через ГРТ ( $I$ ), излучения ( $G$ ).

для визуально-оптической диагностики быстротекающих процессов. Ограничение связано с доступной высокоскоростной регистрирующей аппаратурой. Наибольшее распространение имеют видеорегистраторы видимой области спектра.

Одним из способов улучшения частотно-энергетических и усилительных характеристик активных сред на парах металлов и их галогенидов является использование водородсодержащих добавок [9]. С учетом того, что в работе использовался хлорид марганца, в качестве добавки мы применили HCl. При ЧСИ 17 kHz добавка положительно повлияла на мощность и профиль излучения. Однако при ЧСИ 100 kHz добавка HCl в активную среду приводила к уменьшению мощности излучения и ухудшению однородности профиля пучка. Этот факт требует дополнительного исследования. Наиболее вероятно, что для получения положительного эффекта использования водородсодержащей добавки необходимо увеличивать энергозатраты в активную среду.

Таким образом, в ходе работы был изготовлен активный элемент на переходах атома марганца и проведено исследование его частотно-энергетических и усилительных характеристик, в том числе при высоких частотах следования импульсов накачки (до 100 kHz). Исследованы спектральный состав и распределение мощности излучения в видимой и ближней ИК-области спектра, которые демонстрируют возможность преобразования ИК-излучений в видимый диапазон за счет конкуренции по рабочим переходам УЯ. Профиль излучения (усиления) позволяет получать изображения с минимальными искажениями. На основе разработанного УЯ была реализована АОС, проведены первые эксперименты по визуализации тестового объекта. Выполненные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования данной среды в лазерных мониторах, построенных как по моностабильной [8], так и по бистабильной схеме [10].

Разработка скоростных усилителей яркости на переходах атомов металлов выполнена в рамках продолжения исследований по проекту Российского научного фонда № 14-19-00175, работа по созданию эффективных источников излучения видимого и ближнего ИК-диапазонов проведена в рамках ГЗ АААА А17-117021310150-0.

## Список литературы

- [1] *Webb C.E., Jones J.D.C.* Handbook of laser technology and applications. IOP Publishing, 2004. V. 3. 1180 p.
- [2] *Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Торгаев С.Н., Тригуб М.В., Шиянов Д.В.* Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов. Томск: STT, 2016. 245 с.

- [3] Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Тригуб М.В., Димаки В.А., Евтушенко Г.С. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 6. С. 84–89.
- [4] Little С.Е. Metal vapor lasers: physics, engineering & applications. Chichester: Willey, 1998. 620 p.
- [5] Земсков К.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. В. 6. С. 260–263.
- [6] Климовский И.И., Морозов А.В. // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. В 4. С. 828–830.
- [7] Тригуб М.В., Власов В.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Троцкий В.О. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. В. 12. С. 1069–1072.
- [8] Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савелов А.С., Саранцев С.А., Терехин А.Н. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. В. 5. С. 463–472.
- [9] Voichenko А.М., Evtushenko G.S., Torgaev S.N. // Phys. Wave Phenom. 2011. V. 19. N 3. P. 189–201.
- [10] Тригуб М.В., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Троцкий В.О., Шиянов Д.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 12. С. 51–56.