

11.3;13.4;09.2

## CuBr-усилитель яркости с частотой следования импульсов сверхизлучения/усиления до 200 kHz

© И.С. Мусоров<sup>1</sup>, С.Н. Торгаев<sup>2,3</sup>, Г.С. Евтушенко<sup>1,4</sup><sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия<sup>3</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия<sup>4</sup> Научно-исследовательский институт — Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы, Москва, Россия

E-mail: musorov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 26 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 20 мая 2021 г.

Принято к публикации 21 мая 2021 г.

Представлены результаты исследования и разработки скоростного усилителя яркости на основе активной среды на парах бромида меди с частотой следования импульсов до 200 kHz. Это стало возможным благодаря использованию режима пониженного энерговклада в разряд (менее  $60 \mu\text{J}/\text{cm}^3$  за импульс) за счет укорочения фронта высоковольтного импульса накачки до 20 ns и длительности (по полувысоте) до 30 ns.

**Ключевые слова:** активная оптическая система, усилитель яркости, лазерный монитор, частота повторения импульсов, пониженный энерговклад, бромид меди (CuBr).

DOI: 10.21883/PJTF.2021.17.51380.18842

Перспективным применением активных сред на парах металлов сегодня является их использование в активных оптических системах (АОС). Основным элементом таких систем служит усилитель яркости (УЯ) с высокой частотой следования импульсов сверхизлучения на самоограниченных переходах атомов металлов. АОС востребованы в первую очередь для визуальной диагностики различных технологических процессов, сопровождающихся мощной фоновой засветкой [1]. Первой реальной АОС стал лазерный проекционный микроскоп с УЯ на парах меди, который нашел применение в контроле производства изделий микроэлектроники и научных исследованиях [2]. Следующим шагом стало создание АОС нового поколения — лазерного монитора (также с УЯ на парах меди), способного производить визуальный контроль изделий и быстропротекающих процессов в условиях фоновой засветки в режиме реального времени [3–5]. Увеличение частоты следования импульсов сверхизлучения до 100 kHz за счет использования галогенидов металлов и пониженного энерговклада в разряд [6–9] позволило разработать скоростной CuBr-усилитель яркости и монитор на его основе с получением изображения в отдельно взятом импульсе и лучшим на данный момент временным разрешением  $10^{-5}$  s [10]. Вместе с тем максимальная частота следования импульсов генерации 700 kHz, достигнутая ранее в газоразрядной трубке малого диаметра, и результаты моделирования активной среды CuBr-лазера [6] позволяли надеяться и на реализацию режима сверхизлучения на частотах свыше 100 kHz. Рассмотреть возможность дальнейшего повышения частоты следования импульсов сверхизлучения активной среды на парах бромида меди,

создав скоростной усилитель яркости с частотой следования импульсов свыше 100 kHz, и было основной целью настоящей работы.

В работе активная среда на самоограниченных переходах атомов меди создавалась в газоразрядной трубке диаметром 0.7 см и длиной 40 см. В качестве рабочего вещества использовались пары бромида меди, а буферным газом служил спектрально чистый неон при давлении 30 Torr. Для обеспечения режима пониженного энерговклада в разряд использован специально разработанный по гибридной схеме генератор накачки [11]. Генератор позволяет формировать на разрядной трубке высоковольтные импульсы (амплитудой до 6 kV) с частотой следования до 1.1 MHz и регулируемой длительностью 30–100 ns, а также реализовать режим пониженного энерговклада. Для регистрации импульсов напряжения и тока в работе использованы пробник напряжения Tektronix P6015A и датчик тока Pearson Current Monitors 8450 соответственно. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф Tektronix TDS 3054C. Импульсы сверхизлучения и однопроходowego усиления фиксировались коаксиальным фотоэлементом ФК-22 и фотодиодом Thorlabs DET10A/M, а распределение интенсивности по радиусу — CCD-камерой и профилометром Spiricon Ophir SP 503U. Значения энергии излучения пересчитывались из измеренных средних значений мощности для соответствующих частот повторения импульсов.

Использование режима пониженного энерговклада, как показано в работе [6], позволяет существенно уменьшить паразитное накопление основных параметров плазмы разряда (концентраций электронов и метастабиль-

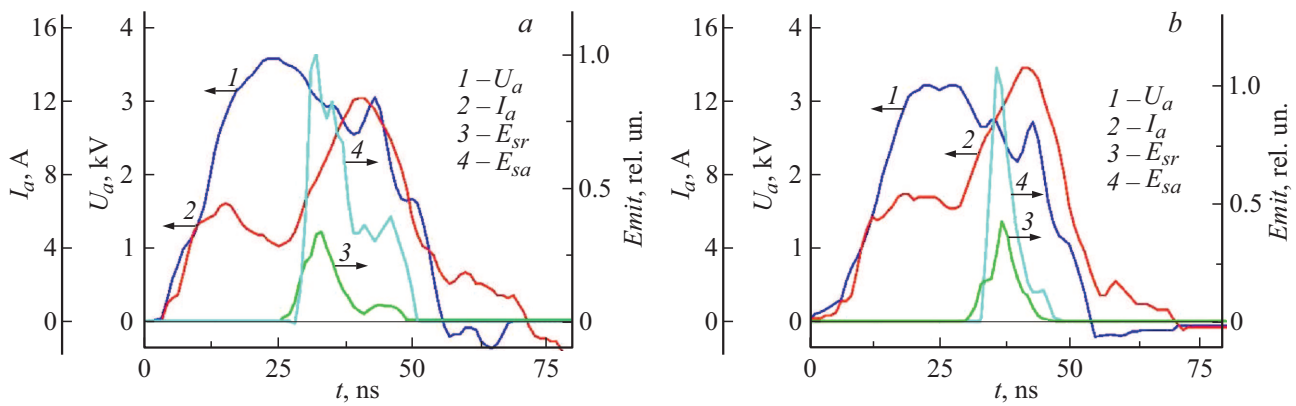


Рис. 1. Осциллограммы напряжения (1), тока (2), импульс излучения в режиме сверхизлучения (3) и однопроходового излучения (4) для частот повторения импульсов накачки 150 (а) и 195 kHz (b).

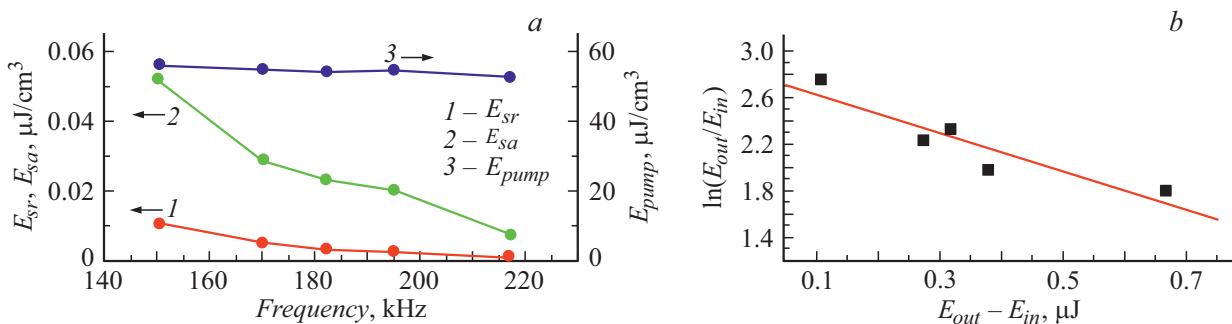


Рис. 2. а — удельные энергии сверхизлучения  $E_{sr}$  (1) и однопроходового излучения  $E_{sa}$  (2) и энерговклад в разряд за импульс  $E_{pump}$  (3). б — усиление CuBr-активной среды.

ных атомов), если вводимая за импульс энергия не превышает  $80\text{--}90\ \mu\text{J}/\text{cm}^3$ . А это в свою очередь приводит к существенному увеличению частот следования импульсов излучения. В настоящей работе реализация режима пониженного энерговклада в разряд достигнута за счет укорочения фронта импульса накачки до 20 ns и длительности (по полувысоте) до 30 ns. На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов накачки для частот 150 и 195 kHz, а также сверхизлучения и однопроходового излучения, которое запаздывает относительно сверхизлучения на 2–2.5 ns. При этом вводимая в разряд энергия в диапазоне частот 150–217 kHz не превышала  $60\ \mu\text{J}/\text{cm}^3$  за импульс (рис. 2, а), что и позволило реализовать режим сверхизлучения в указанном диапазоне частот. Энергия сверхизлучения уменьшается с увеличением частоты, но остается значительной, превышая более чем на порядок энергию спонтанного излучения на основной линии излучения 510.6 nm. Это важно, поскольку спонтанное излучение формирует собственный шум усилителя яркости [1,2,10], определяющий контраст передаваемого изображения, при работе УЯ в составе лазерного монитора [1].

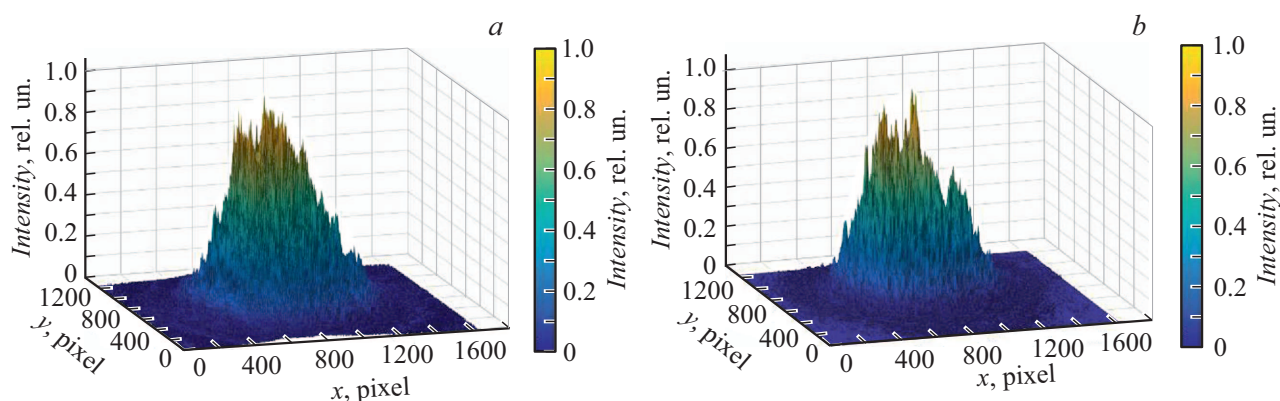
Располагая данными по мощностям (и энергиям) сверхизлучения и однопроходового излучения, мы провели экспериментальную оценку усилительных характе-

ристик высокочастотной CuBr-активной среды, воспользовавшись для этого графическим методом определения коэффициента усиления, предложенным в работе [12] для активной среды с парами меди. Указанный метод предполагает построение зависимости

$$\ln G = g_0 l - (E_{out} - E_{in}).$$

Для нашего эксперимента  $E_{in} = 0.8E_{sr}$ , где  $E_{in}$  — энергия импульса сверхизлучения ( $E_{sr}$ ), возвращенная от зеркала в усилитель яркости с учетом потерь на отражение.  $E_{out}$  — усиленное после одного прохода через УЯ излучение ( $E_{sa}$  — однопроходовое излучение). Соответственно  $G = E_{out}/E_{in}$  есть эффективный коэффициент усиления активной среды. Построенный полулогарифмический график  $\ln G = g_0 l - (E_{out} - E_{in})$  дает для  $(E_{out} - E_{in}) = 0$  значение  $g_0 l$ , где  $g_0$  — коэффициент ненасыщенного усиления,  $l$  — длина активной среды. Построение такого графика для частот повторения импульсов накачки 150–217 kHz дает значение  $g_0 = 0.07 \pm 0.01\ \text{cm}^{-1}$  с учетом погрешности эксперимента (рис. 2, б). Это значение сопоставимо с усилением CuBr-активной среды ( $0.07\ \text{cm}^{-1}$ ) с бóльшим объемом и меньшей частотой следования импульсов накачки (20 kHz) [13].

Важными характеристиками активной среды УЯ для качественной передачи изображения являются профили



**Рис. 3.** Профили (3D-изображения) однопроходового излучения. Частота следования импульсов 150 (a) и 195 kHz (b). По осям  $x$  и  $y$  отложено расстояние, по оси  $z$  — интенсивность излучения.

(3D-изображения) сверхизлучения и усиления. Проведенные измерения профиля (3D-распределения) однопроходового излучения показали, что при прохождении отраженного от зеркала сверхизлучения усиление реализуется как на оси газоразрядной трубки, так и по всей апертуре (рис. 3). С увеличением частоты следования импульсов накачки от 100 до 200 kHz профиль меняется незначительно. При установленном времени экспозиции CCD-камеры 0.1 ms каждый кадр формировался 15–20 импульсами излучения. Реализуемых значений энергии сверхизлучения (десятые доли  $\mu\text{J}$ ) и усиления ( $0.07\text{ cm}^{-1}$ ) достаточно для визуализации объектов и быстропротекающих процессов, в том числе в условиях засветки. Максимально достигнутое значение частоты, при которой еще наблюдается сверхизлучение, составило 217 kHz.

Таким образом, нами разработан макет скоростного усилителя яркости с частотой следования импульсов сверхизлучения до 200 kHz, основными элементами которого являются активный элемент на парах бромида меди малого объема и оригинальный генератор высоковольтных импульсов накачки. За счет уменьшения фронта импульса накачки до 20 ns и длительности импульсов возбуждения до 30 ns (по полувысоте) реализован режим пониженного энергозатрата в CuBr-активную среду (менее  $60\ \mu\text{J}/\text{cm}^3$  за импульс), что привело к повышению частоты следования импульсов сверхизлучения до 217 kHz. При этом коэффициент усиления на длине волны 510.6 nm в диапазоне частот 150–200 kHz составил порядка  $0.07\text{ cm}^{-1}$ . Исследование профиля однопроходового усиления показало, что усиление реализуется как на оси, так и по всей апертуре газоразрядной трубки и практически не изменяется при увеличении частоты следования импульсов 100–200 kHz. Разработанный усилитель яркости предназначен для работы в составе лазерного монитора с временным разрешением до  $5 \cdot 10^{-6}\text{ s}$ . В дальнейшем интерес к усилителям яркости будет определяться как улучшением временного разрешения, так и возможностью визуального контроля объектов и быстропротекающих высокоэнергетических

процессов (в условиях фоновой засветки) не только в видимой, но и ближней ИК-области спектра [1,14–16].

### Благодарности

Авторы выражают благодарность К.И. Земскову (ФИ РАН) за интерес к работе и полезные замечания.

### Финансирование работы

Разработка скоростного УЯ для лазерного монитора проведена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10096), исследования по получению экспериментальных данных и их анализу выполнены в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 075-00907-21-00.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes*, ed. G.S. Evtushenko (Nova Science Publ., N.Y., 2018), p. 1–164.
- [2] *Оптические системы с усилителями яркости*, отв. ред. Г.Г. Петраш, труды ФИАН. (Наука, М., 1991), т. 206, с. 3–149.
- [3] Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, И.И. Климовский, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев, Квантовая электроника, **36** (6), 569 (2006).
- [4] Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, И.И. Климовский, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев, Опт. журн., **74** (8), 73 (2007).
- [5] A.P. Kuznetsov, K.L. Gubskii, A.S. Savjolov, S.A. Sarantsev, A.N. Terekhin, R.O. Buzhinskij, Plasma Phys. Rep., **36** (5), 428 (2010). DOI: 10.1134/S1063780X10050090
- [6] A.M. Boichenko, G.S. Evtushenko, V.O. Nekhoroshev, D.V. Shiyanov, S.N. Torgaev, Phys. Wave Phenom., **23** (1), 1 (2015).

- [7] N.V. Sabotinov, AIP Conf. Proc., **2075**, 190002 (2019). DOI: 10.1063/1.5091425
- [8] И.П. Илиев, С.Г. Гочева-Илиева, Квантовая электроника, **40** (6), 479 (2010).
- [9] I.P. Iliev, S.G. Gocheva-Ilieva, J. Comput. Electron., **19** (9), 1187 (2020). DOI: 10.1007/s10825-020-01490-w
- [10] M.V. Trigub, G.S. Evtushenko, S.N. Torgaev, D.V. Shiyanov, T.G. Evtushenko, Opt. Commun., **376** (10), 81 (2016). DOI: 10.1016/j.optcom.2016.04.039
- [11] С.Н. Торгаев, Д.Н. Огородников, И.С. Мусоров, А.Е. Кулагин, Г.С. Евтушенко, ПТЭ, **63** (1), 69 (2020).
- [12] R.S. Hargrove, R. Grove, T. Can, IEEE J. Quant. Electron., **15** (11), 1228 (1979). DOI: 10.1109/JQE.1979.1069930.
- [13] S. Mohammadpour Lima, Laser Phys., **30** (3), 035003 (2020). DOI: 10.1088/1555-6611/ab7013.
- [14] М.В. Тригуб, В.В. Власов, Н.А. Васнев, Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, **18** (3), 827 (2018).
- [15] М.В. Тригуб, Д.В. Шиянов, В.Б. Суханов, Т.Д. Петухов, Г.С. Евтушенко, Письма в ЖТФ, **44** (24), 135 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.24.47041.17523
- [16] Ф.А. Губарев, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, Л. Ли, А.И. Федоров, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов, Письма в ЖТФ, **47** (7), 38 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50798.18593