

УДК 621.373.8

## Исследование высокочастотной активной среды на парах бромида меди в режиме сверхизлучения

С.Н. Торгаев<sup>1,2,3</sup>, И.С. Мусоров<sup>2</sup>, М.В. Тригуб<sup>1,2</sup>, Г.С. Евтушенко<sup>1,2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 10.01.2018 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований двух высокочастотных активных элементов разного размера CuBr-лазера в режимах генератора, однопроходового усиления и сверхизлучения. Впервые получена частота следования импульсов излучения 195 кГц при работе активного элемента в режиме сверхизлучения. С использованием метода экспресс-оценки радиального профиля показано, что в случае активного элемента с малым диаметром рабочей зоны профиль усиления практически не меняется при увеличении частоты следования импульсов до 195 кГц.

**Ключевые слова:** активная среда на парах бромида меди, лазерный монитор, частота следования импульсов, радиальный профиль, сверхизлучение; copper bromide active medium, laser monitor, pulse repetition rate, radial profile, superradiance.

### Введение

Создание и исследование высокочастотных (свыше 100 кГц) активных сред на парах металлов — достаточно актуальная задача в связи с возможностью их использования для построения активных оптических систем (АОС) с усилителями яркости [1]. Такие системы могут быть использованы для визуализации быстропротекающих процессов, экранированных фоновым излучением [2–8]. Усилитель яркости в АОС представляет собой активный элемент лазера на самоограниченных переходах в парах металлов, работающий в режиме сверхсветимости [1]. Частота следования импульсов (ЧСИ) сверхизлучения активного элемента определяет максимальное временное разрешение системы, а длительность импульса сверхизлучения — предельную дистанцию до объекта наблюдения [5, 9]. На сегодня ЧСИ генерации получены для сред на переходах атома стронция (830 кГц [10]) и атома меди (700 кГц [11]). В указанных работах активные среды были заключены в плоскопараллельный резонатор, что исключало возможность получения импульсов сверхизлучения, а значит и возможность использование таких сред в качестве усилителей яркости. Насколько нам известно, результаты исследования пространственно-

временных характеристик параметров сверхизлучения высокочастотных активных сред на парах металлов в печати отсутствуют. В данной статье представлены результаты экспериментов по изучению высокочастотной среды на парах бромида меди (ЧСИ свыше 100 кГц), радиальных профилей генерации и сверхизлучения при работе активного элемента на таких частотах.

### Техника эксперимента

Исследование высокочастотного режима работы усилителя яркости на парах бромида меди проводилось с использованием двух газоразрядных трубок (ГРТ). ГРТ1 диаметром 0,8 см с длиной активной зоны 25 см и ГРТ2 диаметром 1,0 см с длиной активной зоны 20 см. Конструкция ГРТ представлена на рис. 1.

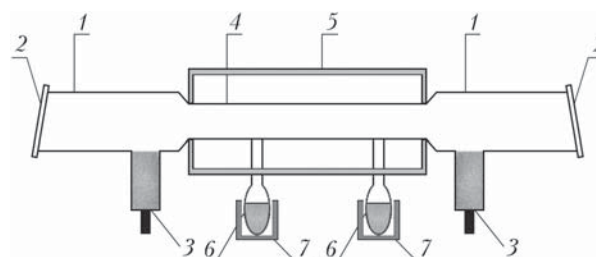


Рис. 1. Конструкция ГРТ: 1 — холодные зоны; 2 — выходные окна; 3 — электроды; 4 — активная зона ГРТ; 5 — печь; 6 — контейнер с рабочим веществом; 7 — нагреватели

\* Станислав Николаевич Торгаев (torgaev@tpu.ru); Илья Сергеевич Мусоров (musorov@yandex.ru); Максим Викторович Тригуб (trigub@tpu.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (evt@tpu.ru).

В отличие от ГРТ1, в ГРТ2 присутствовал только один контейнер с рабочим веществом. Накачка ГРТ осуществлялась от высоковольтного источника напряжения с использованием гибридного высоковольтного коммутатора. Он выполнен на базе модуляторной лампы ГМИ-27Б, включенной по схеме с общей сеткой, и силового транзистора MOSFET, включенного в катодную цепь [11]. Используемый высокочастотный источник накачки позволяет формировать на ГРТ импульсы амплитудой до 5 кВ с ЧСИ  $f$  до 1,1 МГц. Он позволяет реализовать режим пониженного энергозатрата в разряд за счет работы в режиме частичного разряда емкости, что достигается путем укорочения импульса управления коммутатором. На основе экспериментальных данных было установлено, что во всех режимах работы вводимая в разряд мощность была не больше 160 Вт, энергозатрат в разряд не превышал 150 мкДж/см<sup>3</sup>, что является типичным значением для режима пониженных энергозатрат [12].

Температура стенки ГРТ поддерживалась на заданном уровне благодаря использованию внешнего теплоизолированного нагревателя. Давление буфер-

ного газа неона в обеих ГРТ составляло 20 торр. Импульсы тока и напряжения регистрировались датчиком тока Pearson Current Monitors 8450 и пробником напряжения Tektronix P6015A; импульсы генерации – с помощью высокоскоростной фотодиодной головки ThorLabs DET10A/m. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф LeCroy WJ324A. Схема эксперимента изображена на рис. 2.

## Результаты экспериментов

Экспериментальные исследования с использованием ГРТ1 осуществлялись в режиме генератора (с наличием обоих зеркал резонатора) при ЧСИ накачки от 150 до 195 кГц. На каждой частоте ГРТ выводилась на стационарный режим работы, при этом фиксировались импульсы тока через ГРТ, напряжения на аноде модуляторной лампы (напряжение на ГРТ) и генерации.

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения на ГРТ, тока через ГРТ и импульсы излучения при ЧСИ накачки 195 кГц.

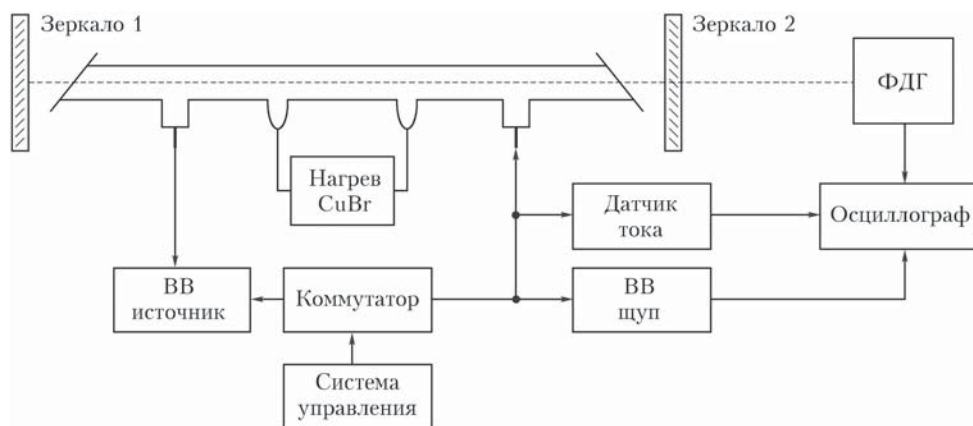


Рис. 2. Схема эксперимента: ФДГ – фотодиодная головка; ВВ щуп – высоковольтный щуп; ВВ источник – высоковольтный источник

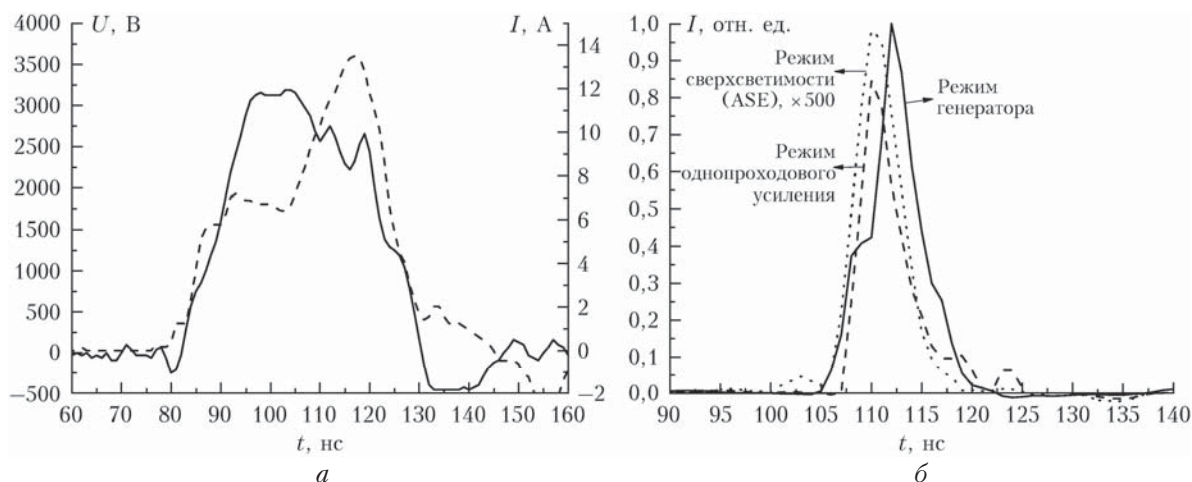


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ (сплошная линия) и тока через ГРТ (штриховая линия) (а); импульсы излучения в режимах ASE (пунктирная линия), однопроходового усиления (штриховая линия) и генератора (сплошная линия) (б);  $f = 195$  кГц

Затем радиальные профили излучения и однопроходового усиления измерялись с использованием методики экспресс-оценки профиля излучения [13]. На рис. 4 представлены радиальные зависимости излучения (в режиме генератора) и усиления (в режиме однопроходового усиления) при ЧСИ накачки 100, 150 и 195 кГц.

Из представленных на рис. 4 зависимостей видно, что с увеличением ЧСИ накачки характер пове-

дения радиальных профилей излучения и усиления практически не меняется. В частности, отсутствует «провал» профиля излучения / усиления в центре ГРТ, типичный для подобных активных сред при работе без водородосодержащих добавок [14–19]. Происходит только характерное сужение профиля. Сохранение достаточно равномерного радиального профиля усиления при повышенных ЧСИ, возможно, связано с малым диаметром активного элемента: в активном

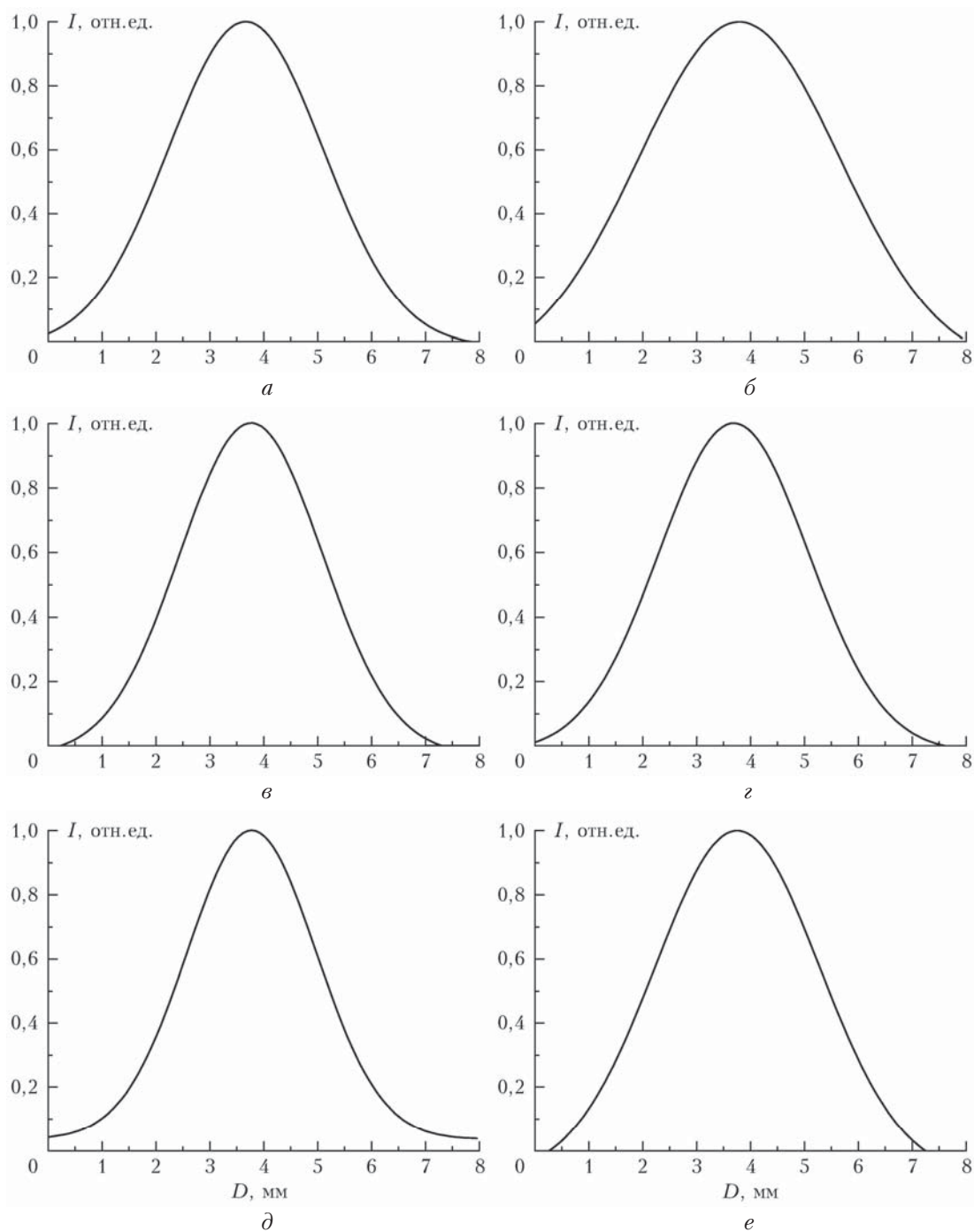


Рис. 4. Радиальные профили излучения/усиления при работе в режимах генератора (а, в, д) и однопроходового усиления (б, г, е): 100 (а, б); 150 (в, г); 195 кГц (д, е);  $D$  – диаметр

элементе малого объема / диаметра отсутствуют ярко выраженные радиальные неоднородности компонентов плазмы, определяющих профиль усиления (в первую очередь, концентраций электронов и атомов рабочего вещества).

С целью создания высокочастотного усилителя яркости с диаметром активной зоны 1 см и более была разработана ГРТ2. Экспериментальное исследование данного активного элемента проводилось на частотах 100 и 140 кГц при различных напряжениях источника накачки  $U_s$ . На рис. 5 показаны осциллограммы тока через ГРТ и напряжения на ГРТ при различных условиях работы.

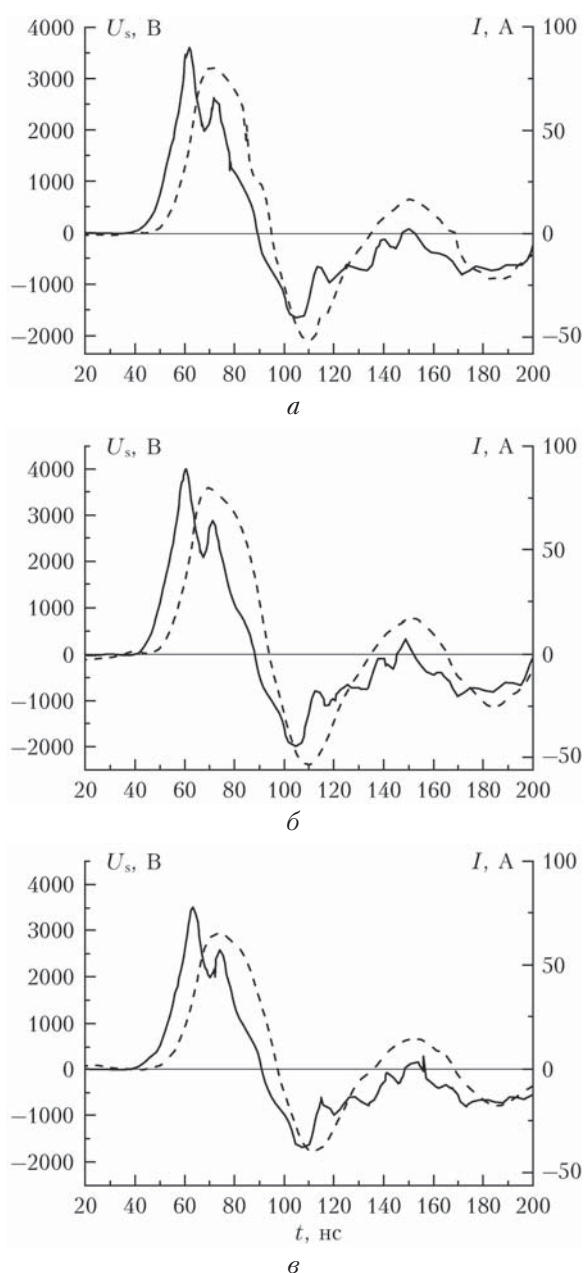


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на ГРТ (сплошная линия) и тока через ГРТ (штриховая линия) при  $f = 100$  кГц,  $U_s = 3,3$  кВ (а);  $f = 100$  кГц,  $U_s = 3,5$  кВ (б);  $f = 140$  кГц,  $U_s = 3$  кВ (в)

Из осциллограмм видно, что с увеличением диаметра ГРТ происходит значительный рост амплитуды тока по сравнению с ГРТ меньшего диаметра (рис. 3). В экспериментах с данным активным элементом было получено излучение на частотах до 140 кГц, при этом активный элемент работал в режиме генератора. Для обеспечения режима сверхизлучения (усилителя яркости) нужно повышать напряжение накачки и обеспечивать режим пониженного энерговклада в разряд (уменьшать фронт импульса напряжения и его длительность). С этой целью необходимо модифицировать применяемый высокочастотный источник накачки.

## Заключение

Анализируя полученные в экспериментах результаты, можно отметить, что в режиме пониженного энерговклада в разряд в ГРТ малого диаметра с увеличением частоты следования импульсов накачки выше 100 кГц характер поведения радиальных профилей излучения и усиления практически не меняется. В частности, отсутствует «провал» на оси ГРТ, характерный для подобных активных сред при работе без водородосодержащих добавок; наблюдается только сужение радиального профиля.

Впервые для активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов реализована работа активного элемента на парах бромида меди в режиме усилителя яркости до частоты следования импульсов излучения (усиления) 195 кГц.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 14-19-00175.

1. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. Оптические системы с усилителями яркости. Горький: ИПФ АФ СССР, 1988. 173 с.
2. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85, iss. 3. P. 1–5.
3. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савелов А.С., Саранцев С.А., Терехин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // Физика плазмы. 2010. Т. 36, № 5. С. 463–472.
4. Torgaev S.N., Trigub M.V., Evtushenko G.S., Evtushenko T.G. High PRF metal vapor laser active media for visual and optical monitoring // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 671. P. 012060. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012060.
5. 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. P. 141–155.
6. Труzub М.В., Платонов В.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С., Осипов В.В. CuBr-лазер в задачах визуализации процессов получения наноматериалов // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 249–253; Trigub M.V., Platonov V.V., Fedorov K.V., Evtushenko G.S., Osipov V.V. CuBr laser for nanopowder production visualization // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 4. P. 376–381.

7. Белоплотов Д.В., Тригуб М.В., Тарасенко В.Ф., Евтушенко Г.С., Ломаев М.И. Визуализация газодинамических процессов при импульсно-периодическом разряде, инициируемом убегающими электронами, в воздухе атмосферного давления с помощью лазерного монитора // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 2. С. 157–161; *Beloplotov D.V., Trigub M.V., Tarasenko V.F., Evtushenko G.S., Lomaev M.I.* Laser monitor visualization of gas-dynamic processes under pulse-periodic discharges initiated by runaway electrons in atmospheric pressure air // *Atmos. Osean. Opt.* 2016. V. 29, N 4. P. 371–375.
8. *Astadzhov D.N., Vuchkov N.K., Zemskov K.I., Isaev A.A., Kazaryan M.A., Petrash G.G., Sabotinov N.V.* Active optical systems with a copper bromide vapor amplifier // *Sov. J. Quantum Electron.* 1988. V. 18, N 4. P. 457–459.
9. *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.
10. *Soldatov A.N., Yudin N.A., Vasilieva N.A., Kolmakov E.A., Polunin Yu.P., Kostyrya I.D.* Strontium vapour laser with a pulse repetition rate of up to 1 MHz // *Quantum Electron.* 2012. V. 42, N 1. P. 31–33.
11. *Nekhoroshev V.O., Fedorov V.F., Evtushenko G.S., Torgaev S.N.* Copper bromide vapour laser with a pulse repetition rate up to 700 kHz // *Quantum Electron.* 2012. V. 42, N 10. P. 877–879.
12. *Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Nekhoroshev V.O., Shiyonov D.V., Torgaev S.N.* CuBr-Ne-HBr laser with a high repetition frequency of the lasing pulses at a reduced energy deposition in the discharge // *Phys. Wave Phenom.* 2015. V. 23, iss. 1. P. 1–13.
13. *Тригуб М.В., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В.* Методика экспресс оценки радиального профиля излучения CuBr-лазера // Лазеры на парах металлов (ЛПМ-2012): сб. тр. симпоз., посвященного памяти Г.Г. Петраша. Сочи, 24–28 сентября 2012 г. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2012. С. 82.
14. *Кулагин А.Е., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Тригуб М.В.* Кинетика активной среды усилителя яркости на парах меди // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 11. С. 122–127.
15. *Васнев Н.А., Тригуб М.В., Троицкий В.О., Димаки В.А., Власов В.В.* Исследование процесса восстановления стационарного режима генерации CuBr-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 259–263.
16. *Gubarev F.A., Trigub M.V., Troitsky V.O., Sukhanov V.B.* Gain characteristics of large volume CuBr laser active media // *Opt. Commun.* 2011. V. 284, iss. 10–11. P. 2565–2568.
17. *Gubarev F.A., Trigub M.V., Klenovskiy M.S., Li L., Evtushenko G.S.* Radial distribution of radiation in a CuBr vapor brightness amplifier used in laser monitors // *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* 2016. V. 122, iss. 1. P. 1–7.
18. *Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyonov D.V., Evtushenko T.G., Kulagin A.E.* High-speed CuBr brightness amplifier beam profile // *Opt. Commun.* 2017. V. 383. P. 148–152.
19. *Тригуб М.В., Бурков М.В., Любутин П.С., Торгаев С.Н.* Исследование искажений, вносимых усилителем яркости на парах бромиды меди, в формируемые лазерным монитором изображения // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 10. С. 850–854.

*S.N. Torgaev, I.S. Musorov, M.V. Trigub, G.S. Evtushenko. Study of a high-frequency copper bromide vapor active medium in the superradiance mode.*

Results of experimental studies of two different-size high-frequency active elements of a CuBr laser operating in generator, single-pass amplification, and superradiance modes are presented. A pulse repetition rate of 195 kHz is attained for the first time in the superradiance mode. Using the method of express estimation of the radial profile, it is shown that the gain profile does not change significantly throughout a wide pulse repetition rate range (up to 195 kHz) in the case of a small-diameter active element.