

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_2_32
УДК 621.373.8

Скоростной усилитель яркости на парах металлов для систем визуального контроля и диагностики

^{1*} Мусоров И. С., ^{1,2} Евтушенко Г. С.

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

² *Научно-исследовательский институт — Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы Министерства науки и высшего образования*

e-mail: * musorov@tpu.ru, evtushenkogs@extech.ru

В работе представлен разработанный скоростной усилитель яркости на самоограниченных переходах в парах бромида меди с частотой следования импульсов усиления до 300 кГц. Описана структурная схема источника накачки, обеспечивающего накачку активной среды в режиме пониженного энергозатрата. Приведены результаты модельных и экспериментальных исследований. Показана роль пониженного энергозатрата в разряд при повышенных частотах следования импульсов излучения/усиления активных сред на парах металлов.

Ключевые слова: усилитель яркости, высокочастотный источник накачки, пониженный энергозатрат.

Введение

В связи с постоянным совершенствованием различных технологических процессов для их контроля, управления и изучения активно используют системы визуального контроля и диагностики. Данные системы помогают понять физику взаимодействий во время протекания процесса, а также позволяют повлиять на параметры его протекания. Однако, в современной индустрии большое количество технологий связаны с воздействием мощных потоков энергии на объект. Как правило, такие воздействия сопровождаются интенсивной широкополосной фоновой засветки, которая затрудняет визуальный контроль протекания этих процессов с помощью традиционных методов, включая метод лазерной подсветки [1]. Использование последнего, в сочетании с временной и спектральной фильтрациями, позволяет существенно ослабить фоновую засветку, но в случае мощной засветки эффективность лазерной подсветки низка. В таких случаях эффективным методом является визуальный контроль с использованием активных оптических систем – лазерных мониторов, построенных на усилителях яркости [2, 3]. Наиболее подходящей активной средой для построения высокочастотных (ВЧ) усилителей яркости является активная среда на самоограниченных переходах в парах бромида меди [4, 5]. Данная среда работает в видимой области спектра, обладает большим коэффициентом усиления, что позволяет за один проход получать большое усиление входного сигнала. Помимо этого, данная активная среда обладает хорошими фильтрационными свойствами, благодаря узкой спектральной полосе (единицы

пикометров), что необходимо для ослабления излучения фоновой засветки и усиления только полезного сигнала [6]. Для изучения быстропротекающих процессов, необходимо, чтобы активная оптическая система обладала и соответствующим временным разрешением, которое напрямую зависит от частоты следования импульсов (ЧСИ) излучения/усиления активной среды. Что также является важной особенностью импульсно-периодического характера излучения лазеров на парах металлов. Существует два ограничивающих фактора при повышении ЧСИ усилителей яркости на парах металлов: предимпульсная концентрация электронов и предимпульсная концентрация атомов в метастабильном состоянии [7, 8, 9]. С увеличением ЧСИ оба эти показателя растут, что ведёт к срыву генерации. В работе [10] с использованием кинетической модели авторами было показано, что негативное влияние указанных параметров плазмы импульсно-периодического разряда можно существенно снизить, благодаря введению в активную среду водородсодержащих добавок и снижению энергозатрат в импульс накачки. Требуемые величины активных добавок (в нашем случае – HBr), как показано в работе [11], малы (0,1...0,3 Тор) и остаточной концентрации водорода, в присутствии бромида меди, оказывается достаточной для образования в разряде малых добавок HBr.

Первый раздел: Техника эксперимента

1.1 Блок-схема ВЧ-усилителя яркости

Усилитель яркости включает газоразрядную трубку (ГРТ), с активной средой на парах бромида меди и буферным газом неоном при давлении 20...30 Тор, высокочастотный источник накачки, аппаратуру для регистрации параметров разряда и оптических характеристик (рис. 1). В работе использовалась ГРТ диаметром активной зоны 7 мм и длиной 40 см. Импульсы тока регистрировались датчиком Pearson Current Monitors 8450, напряжения – Tektronix P6015A, излучения – Thorlabs DET10A/M, и подавались на осциллограф Tektronix TDS3054C. Средняя мощность излучения в трёх режимах (сверхизлучения, однопроходowego усиления и генерации) регистрировалась с помощью датчика измерения мощности Ophir 30C-SH.

1.2 Источник накачки, обеспечивающий режим пониженного энергозатрат в разряд

Для обеспечения работы высокочастотных усилителей яркости в режиме пониженного энергозатрат в разряд, был разработан источник накачки, подробно описанный в [12]. Основным преимуществом данного источника накачки является его работа в режиме частичного разряда накопительной ёмкости, за счёт гибридного ключа, состоящего из модуляторной лампы (в нашем случае ГМИ-27Б) и MOSFET транзистора, накопительная ёмкость разряжается через газоразрядную трубку (ГРТ) усилителя яркости только в момент, когда транзистор открыт. Данная структура позволяет управлять накачкой импульсами малой мощности, что упрощает конструкцию системы управления. Помимо этого, модуляторная лампа ограничивает ток в цепи разряда накопительной ёмкости, что обусловлено ограничением эмиссии электронов с катода лампы.

Характеристики усилителя яркости сильно зависят от параметров ГРТ, а на высоких ЧСИ необходимо обеспечить хорошее согласование источника накачки и нагрузки. Изготовление газоразрядных трубок технологически трудный процесс, а для подготовки конкретной ГРТ к работе необходимо много времени. В связи с этим для данного источника накачки была разработана Spice модель газоразрядного коммутатора и OrCAD модель схемы накачки, подробно описанные в [13]. Разработанная модель высокочастотного источника накачки позволяет осуществлять итерационный расчёт

напряжения на активном сопротивлении активной среды. За счёт использования модели источника накачки удалось оптимизировать процесс кинетического моделирования высокочастотных активных сред.

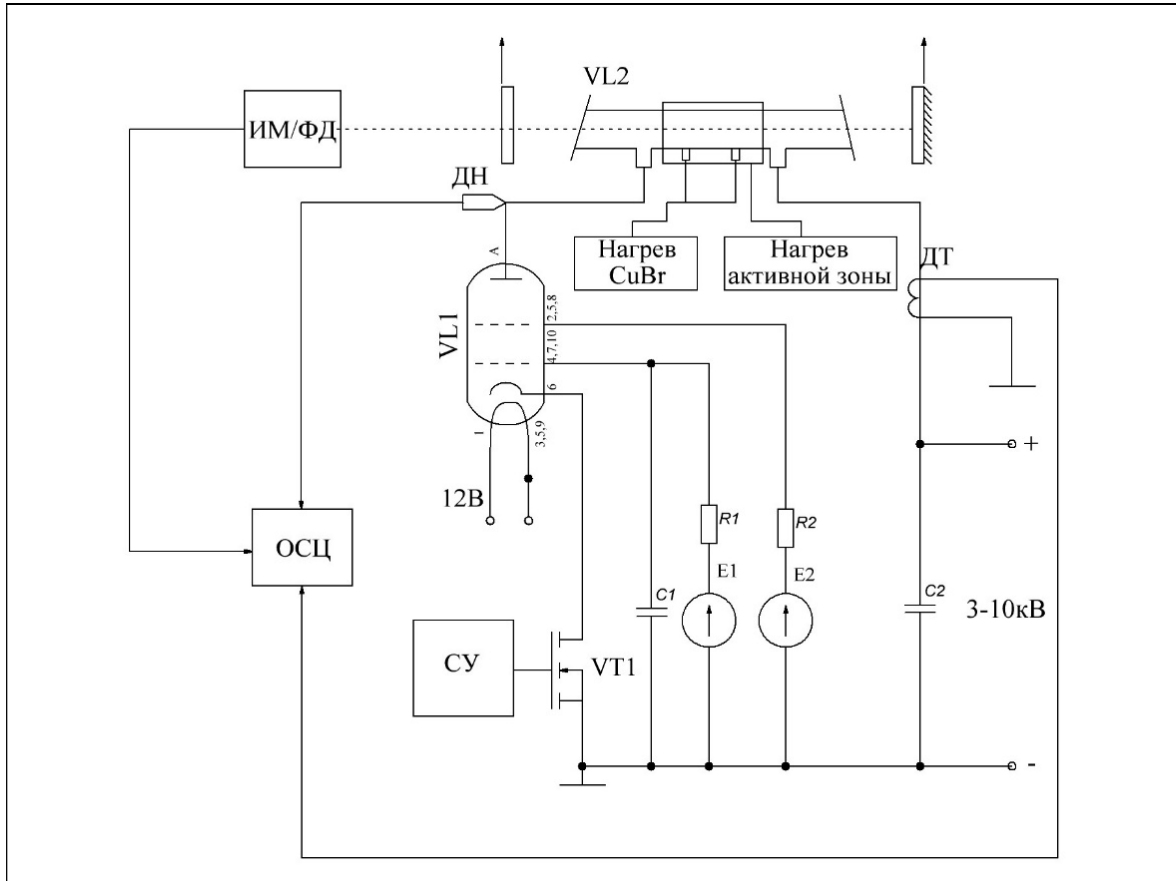


Рис. 1. Схема эксперимента: ИМ/ФД – измеритель мощности/фотодиод; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; ОСЦ – осциллограф; СУ – система управления.

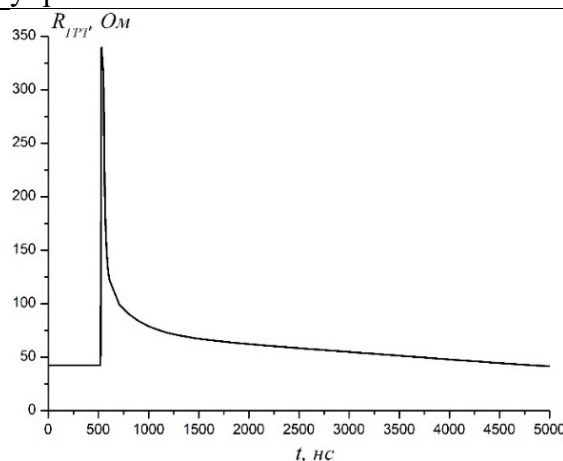


Рис. 2. Диаграмма активного сопротивления ГРТ при частоте следования импульсов накачки: 100 кГц

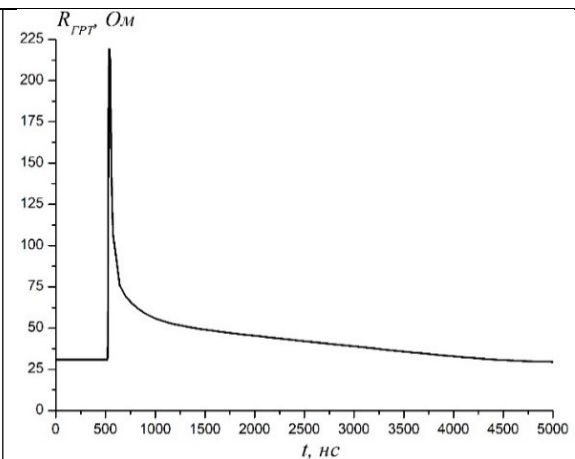


Рис. 3. Диаграмма активного сопротивления ГРТ при частоте следования импульсов накачки 150 кГц

На рис. 2 и 3 представлены диаграммы активного сопротивления газоразрядной трубки (ГРТ) при различных частотах следования импульсов 100 и 150 кГц, полученные посредством итерационного моделирования. Из данных диаграмм видно, что сопротивление активной среды уменьшается с ростом ЧСИ, вследствие роста предимпульсной концентрации электронов. А это препятствует эффективной накачке верхних рабочих уровней атомов меди.

Типичной конструкцией активного элемента усилителей яркости на парах бромида меди является ГРТ с внутренними электродами. В связи с тем, что активная среда с парами брома является агрессивной, то продолжительный контакт газовой среды с электродами ведёт к их деградации и выходу из строя. Для увеличения срока службы усилителя яркости возможно использование ГРТ с внешними (ёмкостными) электродами [14]. В этом случае величина рабочей ёмкости будет определяться ёмкостью электродов. На рис. 3 представлены результаты моделирования работы схемы на ГРТ с ёмкостными электродами, расположенными вне разрядного канала, с внешней стороны ГРТ. На диаграммах показаны импульс тока ГРТ (рис. 4), соединённого с лампой, напряжение анода лампы (рис. 5 сплошная линия) и напряжение на стоке транзистора VT1 (рис. 5 пунктирная линия). В момент открытия транзистора потенциал на аноде лампы становится равен потенциалу общей шины, электродные емкости начинают разряжаться и через ГРТ протекает ток. Обратный ток, после закрытия MOSFET транзистора обусловлен зарядом электродных ёмкостей ГРТ.

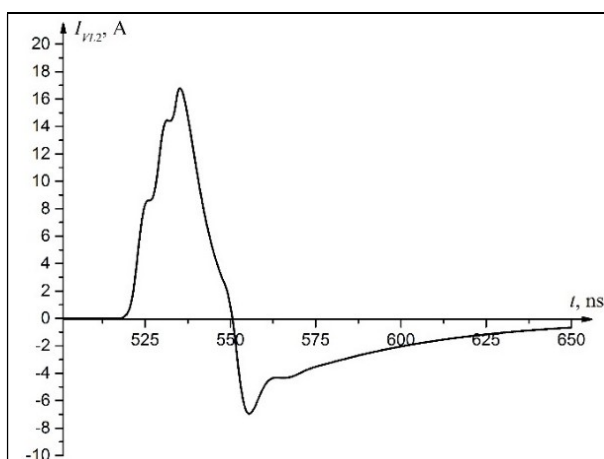


Рис. 4. Осциллограммы моделирования работы источника накачки на ГРТ с ёмкостными электродами: тока ГРТ, соединённого с лампой

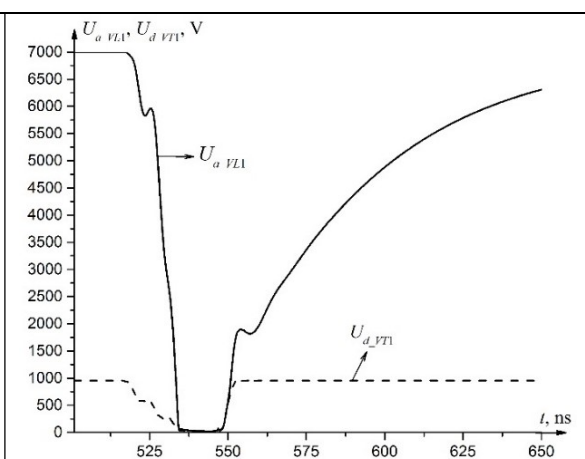


Рис. 5. Осциллограммы моделирования работы источника накачки на ГРТ с ёмкостными электродами: напряжение анода лампы (сплошная линия) и напряжение на стоке транзистора (штриховая линия)

Разработанная модель позволяет проверять работоспособность источника накачки при различных нагрузках (ГРТ различных размеров и типов: с внутренними – типичными и внешними – емкостными электродами) и определить основные параметры для выбора элементов его принципиальной схемы, в частности, силового транзистора.

Используемая в источнике накачки комбинация электровакуумной лампы и полупроводникового ключа позволяет получить надежный и стабильный коммутатор, обладающий высоким быстродействием и малой мощностью управления. С

использованием такого коммутатора реализован генератор импульсов возбуждения с пониженным энерговыделением в разряд (менее 100 мкДж/см^3).

Реализация режима пониженного энерговыделения в разряд реализовывалась в работе за счёт уменьшения длительности высоковольтного импульса накачки (t_i). На рис. 6 и 7 в качестве иллюстрации приведены осциллограммы, отражающие роль понижения энерговыделения на генерационные характеристики CuBr-активной среды.

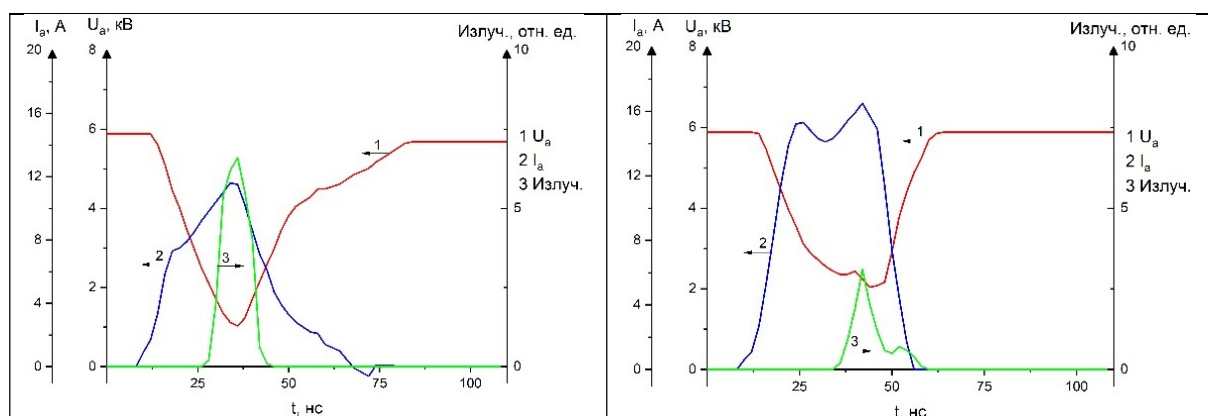


Рис. 6. Осциллограммы экспериментального исследования пониженного энерговыделения: 1 канал – напряжение на аноде лампы, 2 канал – импульс тока разряда, 3 канал – излучение активной среды в режиме генератора (лазера); $f = 130 \text{ кГц}$ ($E_{\text{вх}} = 70 \text{ мкДж/см}^3$). $t_i = 28 \text{ нс}$

Рис. 7. Осциллограммы экспериментального исследования пониженного энерговыделения: 1 канал – напряжение на аноде лампы, 2 канал – импульс тока разряда, 3 канал – излучение активной среды в режиме генератора (лазера); $f = 130 \text{ кГц}$ ($E_{\text{вх}} = 100 \text{ мкДж/см}^3$). $t_i = 32 \text{ нс}$

Таким образом, проведённые испытания устройства на модельную и реальную нагрузку показали, что разработанный высоковольтный генератор можно использовать в качестве источника накачки активных сред лазеров и усилителей яркости на парах металлов с высокой ЧСИ (до 1,1 МГц), в том числе, с обеспечением режима пониженного разряда в разряд.

Второй раздел: CuBr-усилитель яркости с частотой следования импульсов до 300 кГц

Измерения характеристик вынужденного излучения при высоких частотах следования импульсов накачки проводились для трёх режимов работы активной среды: сверхизлучения (в отсутствие зеркал резонатора), однопроходowego усиления (при установке одного плотного зеркала) и генерации (при наличии плотного зеркала и плоскопараллельной пластинки, в качестве второго – выходного). В таблице приведены параметры, а на рис. 8 осциллограммы импульсов излучения для всех трёх режимов, при частоте следования импульсов накачки 300 кГц.

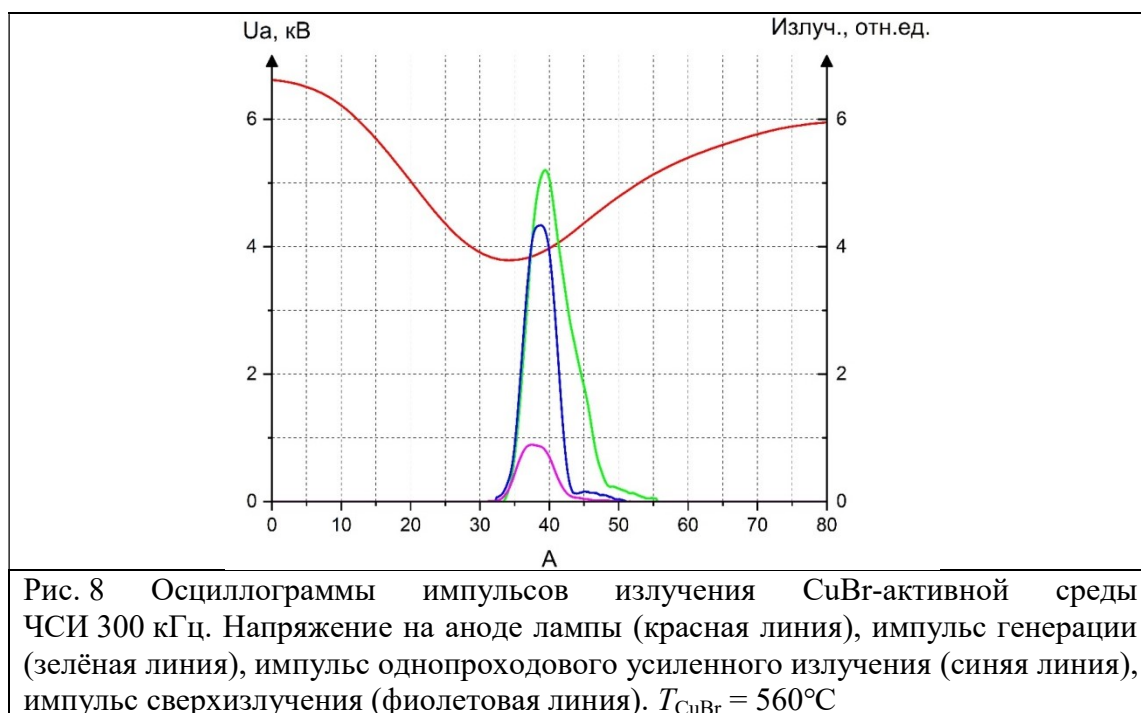
Первые два режима наиболее важны, поскольку определяют эффективность работы активной среды в режиме усилителя яркости.

Анализ полученных данных свидетельствует, что уменьшением длительности импульса возбуждения до 20 нс, при амплитуде напряжения 6 кВ реализован режим пониженного энерговыделения в активную среду на парах бромида меди (100 мкДж/см^3), что позволило в работе [15] повысить частоту следования импульсов сверхизлучения и усиления до

200 кГц, а в настоящей до 300 кГц (за счёт оптимизации схемы накачки). При этом, как показали проведённые ранее оценки и эксперименты по визуализации объектов при частотах до 100 кГц [3], энергии сверхизлучения (E более $0,045 \text{ мкДж/см}^2$) в одном импульсе и величины усиления ($K_{\text{эфф}} = 2...4$) будет достаточно для получения изображения объекта, в том числе в условиях фоновой засветки.

Основные входные и выходные параметры УЯ

T_{CuBr} , °С	$P_{\text{ген}}$, мВт	$P_{\text{однопрох}}$, мВт	$P_{\text{сверх}}$, мВт	U_a , кВ	t_i , нс	$K_{\text{эфф}}$
545	460	370	60	6	40	6.17
550	470	415	80	6	40	5.19
555	530	450	100	6	40	4.5
560	575	470	105	6,5	40	4.48
565	565	505	120	6,5	40	4.21
570	550	525	135	6,5	40	3.89



Заключение

С использованием специально разработанного источника накачки, обеспечен режим пониженного в разряд ВЧ CuBr-усилителя яркости, что позволило увеличить частоту повторения импульсов излучения/усиления до 300 кГц. На основе проведенных исследования создан лабораторный макет скоростного усилителя яркости, предназначенный для работы в составе лазерного монитора с временным разрешением менее 5 мкс.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Шиянову Д. В. за участие в подготовке эксперимента и признательность Торгаеву С. Н. и Кулагину А. Е. за интерес к работе и полезную дискуссию. Разработка скоростного усилителя яркости для лазерного монитора проведена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10096).

Список литературы

1. Colin E. Webb, Julian D. C. Jones. Handbook of Laser Technology: Applications // IoP Publishing. 2004. 1180 p.
2. Batenin V. M., Klimovskii I. I., Selezneva L. A. Research of surfaces of electrodes of a carbon arc during its burning // Doklady Akademii Nauk, 1988, Vol. 303, No 4, pp. 857–860.
3. Methods and Instruments for Visual and Optical Diagnostics of Objects and Fast Processes. Ed. Gennadiy Evtushenko, Nova Publishers, 2018, 236 p.
4. Astadjov 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 // Soviet J. Quantum Electron., 1988, Vol. 15, No 4, pp. 716–719.
5. Evtushenko G. S., Trigub M. V., Gubarev F. A., Evtushenko T. G., Torgaev S. N., Shiyanov D. V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Review of Scientific Instruments, 2014, Vol. 85, Issue 3, Article number 033111. pp. 1–5.
6. Пасманик Г. А., Земсков К. И., Казарян М. А. Оптические системы с усилителями яркости. г. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. 173 с.
7. Petrash G. G. The Processes Limiting the Pulse Repetition Rate in Pulsed Metal and Metal Compound Vapor Lasers // Laser Phys., 2000, Vol. 10, No 5, 994.
8. Бохан П. А., Силантьев В. Н., Соломонов В. И. О механизме ограничения частоты следования импульсов генерации в лазере на парах меди // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 6, с. 12.
9. Бохан П. А., Закревский Д. Э. О предельных частотах следования импульсов генерации в лазерах на парах меди. Журнал технической физики. 1997. Т. 67. № 5. С. 54–60.
10. Boichenko A. M., Evtushenko G. S., Nekhoroshev V. O., Shiyanov 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 // Physics of Wave Phenomena, 2015, Vol. 23. – Issue 1. – pp. 1–13.
11. Шиянов Д. В., Суханов В. Б., Евтушенко Г. С., Андриенко О. С. Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера // Квантовая электроника, 2004, Т 34, № 7, с. 625–629.
12. Торгаев С. Н., Евтушенко Г. С., Ярославцев Е. В., Нехорошев В. О., Мусоров И. С., Тригуб М. В. Генератор импульсов возбуждения для лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов // Патент РФ № 23721804, 2018 г.
13. С. Н. Торгаев, Д. Н. Огородников, И. С. Мусоров, А. Е. Кулагин, Г. С. Евтушенко. Высокочастотный источник накачки активных сред на парах металлов // ПТЭ, 2020, Т. 63, № 1, с. 69–74.
14. F. A. Gubarev, V. B. Sukhanov, G. S. Evtushenko, V. F. Fedorov, and D. V. Shiyanov. Capacitively Coupled Longitudinal Discharge CuBr-Laser // IEEE J. Quantum Electronics, 2009, Vol. 45, No 2, pp. 171–177.

Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Том № 02. № 02 (06)
<https://lasers-measurement-information.ru>

15. Мусоров И. С., Торгаев С. Н., Евтушенко Г. С. CuBr-усилитель яркости с частотой следования импульсов сверхизлучения/усиления до 200 kHz // Письма в ЖТФ, 2021, том 47, вып. 17, с. 18–21.

High-speed metal vapor brightness amplifier for visual inspection and diagnostic systems

^{1*} Musorov I. S., ^{1,2} Evtushenko G. S.

¹ *National research Tomsk polytechnic university*

² *Scientific Research Institute, Federal Research Center for Project Evaluation and Consulting Services*

The paper presents the developed high-speed brightness amplifier based on self-terminating transitions in copper bromide vapor with a repetition rate of amplification pulses up to 300 kHz. A block diagram of a pump source providing pumping of the active medium in the mode of reduced energy input is described. The results of modeling and experimental studies are presented. The role of the reduced energy input into the discharge at increased repetition rates of radiation/amplification pulses of active media on metal vapors is shown.

Keyword: brightness amplifier, high-frequency pump source, reduced input energy.