

УДК 621.373.8

Увеличение длительности импульса генерации CuBr-лазера при работе в цуговом режиме

М.В. Тригуб¹, В.А. Димаки¹, В.О. Троицкий¹, Н.В. Карасев^{1,2*}

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

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 29.01.2021 г.

Представлены экспериментальные результаты оперативного увеличения длительности импульса излучения лазера на парах бромида меди более чем в 3 раза (до 250 нс) за счет изменения режима возбуждения. Метод позволяет увеличить длительность импульса в 2 раза (до 100 нс) с сохранением энергии излучения. Рассматривается возможность использования цуга импульсов для предварительной диссоциации молекулы бромида меди. Исследовано влияние количества импульсов в цуге и задержки между последним импульсом цуга и импульсом возбуждения на генерационные характеристики активного элемента на парах бромида меди.

Ключевые слова: длительность импульса, CuBr-лазер, усиление, управление генерацией; duration, CuBr-laser, amplification, continuous control.

Введение

Одной из технических задач при разработке систем на основе активных сред на самоограниченных переходах атомов металлов является реализация оперативного управления параметрами и режимами генерации (усиления) [1–3]. Управление энергией излучения востребовано в системах микрообработки материалов [4], в медицине [5] и других областях. Увеличение длительности импульса генерации может использоваться на практике для повышения качества пучка в МОР-системах [6] за счет уменьшения расходимости в задающем генераторе. Кроме этого, увеличение длительности импульса усиления активных сред на парах металлов необходимо для визуализации удаленных объектов и процессов в схеме моностатического лазерного монитора [7, 8]. Таким образом, поиск технических решений, позволяющих оперативно изменять длительность импульса излучения и усиления активных сред на парах металлов, представляет собой актуальную задачу прикладного характера.

В [7, 9] сообщается о получении длительности импульса излучения 100 нс при снижении частоты следования импульсов (ЧСИ) возбуждения до 3–5 кГц для лазеров на парах бромида меди. В [9] за счет ограничения разрядного тока и уменьшения ЧСИ была достигнута длительность импульса излучения 320 нс. На практике повышение длительно-

сти усиления импульсов для построения лазерных мониторов было впервые реализовано в [7]. Было показано, что увеличение длительности импульса сверхизлучения позволяет проводить визуализацию объектов, расположенных на значительном расстоянии (свыше 5 м) от регистрирующей аппаратуры. При этом за счет снижения ЧСИ наблюдалось изменение усилительной характеристики, которое выражалось в большей неоднородности профиля усиления. Для обеспечения возможности управления энергетическими параметрами среды, длительностью и формой импульса излучения (усиления) перспективно использование дополнительных импульсных источников возбуждения, что было продемонстрировано в ряде работ, например [4, 10–13]. Достаточно широкие возможности для изменения параметров генерации, а также для исследования кинетики процессов, протекающих в активной среде, дает цуговой режим возбуждения [1, 2, 14–17].

Цель настоящей работы – исследование возможности увеличения длительности импульса излучения термостатированного активного элемента на парах бромида меди за счет изменения режима возбуждения. Для диссоциации молекул CuBr используется цуг импульсов, излучение от которых гасится дополнительным импульсом преддионизации. После последнего импульса цуга с регулируемой задержкой формируется импульс возбуждения, обеспечивающий лазерную генерацию.

Техника эксперимента

В активных средах на парах галогенидов металлов импульс возбуждения обеспечивает не только

* Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru); Виктор Анатольевич Димаки (dimakiva@yandex.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@iao.ru); Николай Викторович Карасев (nkv@iao.ru).

возбуждение атомов металла, но и диссоциацию молекулы галогенида. При этом оценить распределение энергии импульса возбуждения между двумя этими процессами весьма затруднительно. Широкое распространение получил режим возбуждения сдвоенными импульсами [1–3, 18], когда диссоциация молекул бромида меди и возбуждение атома меди инициируются импульсами от двух источников. В рамках настоящей работы предварительная наработка атомов меди осуществлялась с помощью цуга импульсов, формируемого источником питания 1 (ИП1) (рис. 1). Следует обратить внимание

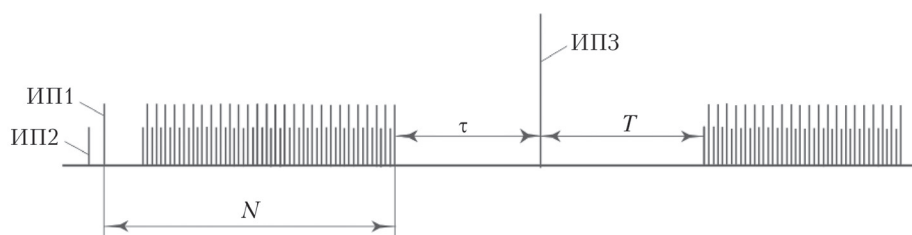


Рис. 1. Алгоритм работы источников возбуждения

на то, что анализ особенностей возбуждения в цуговом режиме и его влияние на энергетические характеристики активной среды на парах бромида меди не исследовались в нашей работе. Амплитуда напряжения, до которой заряжался накопительный конденсатор ИП1, составляла 14 кВ. Источник питания 2 (ИП2) формировал импульсы для полного гашения излучения от диссоциирующих импульсов. Параметры импульсов подбирались экспериментально для полного гашения излучения в ходе эксперимента [14]. Количество импульсов в цуге (N) варьировалось от 50 до 400. После последнего импульса цуга с регулируемой задержкой (τ) следовал импульс возбуждения, формируемый источником питания 3 (ИП3). Емкость накопительного конденсатора ИП3 составляла 1650 пФ, максимальное напряжение, до которого заряжалась емкость, – 14 кВ.

После импульса ИП3 следовала пауза (T), во время которой происходил заряд накопительных емкостей ИП1 и ИП2, и процесс повторялся. Длительность паузы в условиях эксперимента составляла 40 мкс. Гашение импульсов излучения от ИП1 использовалось для более точного измерения мощности генерации от ИП3. Внешняя термостабилизация активного элемента позволяла сохранять тепловой режим при изменении количества импульсов в цуге. Следует отметить, что ЧСИ ИП3 зависит от N и τ . ЧСИ цуга составляла 10 кГц. При необходимости она может быть увеличена до 20 кГц. Частота следования импульсов возбуждения ИП3 составляла 25,6 Гц при 400 импульсах в цуге и 202 Гц при 50 импульсах.

Все источники представляют собой схему с импульсным зарядом рабочей емкости. Взаимное

влияние источников не вносило искажения в получаемые результаты. Активный элемент на парах бромида меди представляет собой газоразрядную трубку (ГРТ), длина активной зоны – 90 см, диаметр активной зоны – 5 см, давление буферного газа неона – 30 торр. Температурный режим стабилизировался с помощью ПИД-регуляторов с точностью $\pm 2^\circ$. В ходе эксперимента температура внешней стенки составляла 750°C , температура контейнеров с бромидом меди устанавливалась исходя из максимума мощности генерации в импульсно-периодическом режиме. В ходе эксперимента

максимум мощности генерации наблюдался при температуре 450°C .

Импульсы возбуждения регистрировались с помощью датчика тока Pearson TM 8450, датчика напряжения Tektronics P6015A и осциллографа LeCroy Wave Jet 324. Импульсы излучения регистрировались коаксиальным фотоэлементом ФК-19. Мощность излучения измерялась с помощью Ophir ZA-PF-12. Длительность импульса тока и генерации измерялась по осциллограммам по уровню 0,1 от амплитудного значения измеряемой величины.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов тока I и напряжения U накачки ИП3 и излучения G при различных значениях τ для случая 400 импульсов в цуге.

Из осциллограмм видно, что увеличение τ приводит к росту длительности импульса излучения G . При этом наблюдается увеличение амплитуды напряжения U на ГРТ, снижение амплитуды и рост длительности импульса тока I . Увеличение задержки приводит к уменьшению предимпульсной концентрации электронов, что увеличивает сопротивление плазмы [1, 3]. При этом на осциллограмме импульса тока начинает проявляться гармоническая составляющая, что связано, по нашему мнению, с изменением добротности колебательного контура, образованного ГРТ и разрядным контуром ИП3. Аналогичная ситуация наблюдается и при меньшем количестве импульсов в цуге. На рис. 3 приведены осциллограммы, полученные для случая 100 импульсов в цуге.

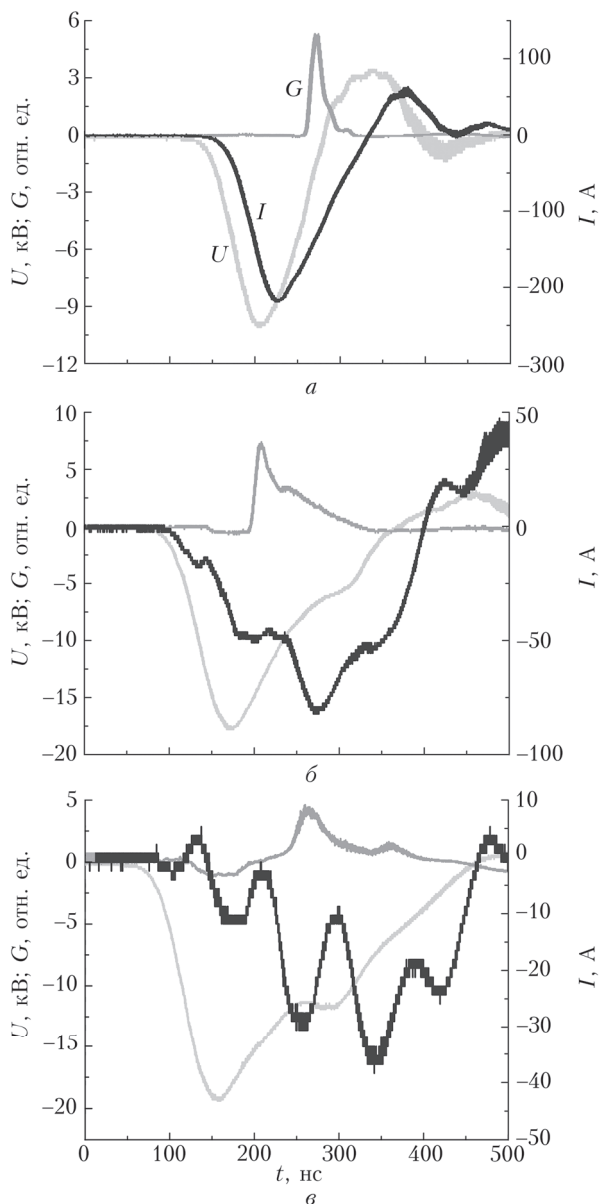


Рис. 2. Импульсы напряжения, тока и генерации при задержке: *a* – 5; *б* – 1000; *в* – 2000 мкс, для $N = 400$

На осциллограмме тока также наблюдается гармоническая составляющая, при этом период колебаний остался неизменным и не зависит от количества импульсов в пучке и временной задержки τ . Это свидетельствует о неизменной величине реактивных компонентов, формирующих разрядный контур.

Далее было установлено влияние τ на параметры импульсов возбуждения и излучения при различном количестве импульсов в пучке. На рис. 4 показана зависимость амплитуды напряжения на ГРТ от τ .

Рост τ приводит к увеличению амплитуды напряжения на ГРТ, что связано с релаксацией плазмы в межимпульсный период, так как уменьшается предимпульсная концентрация электронов. Аналогичная ситуация наблюдалась при работе в ждущем

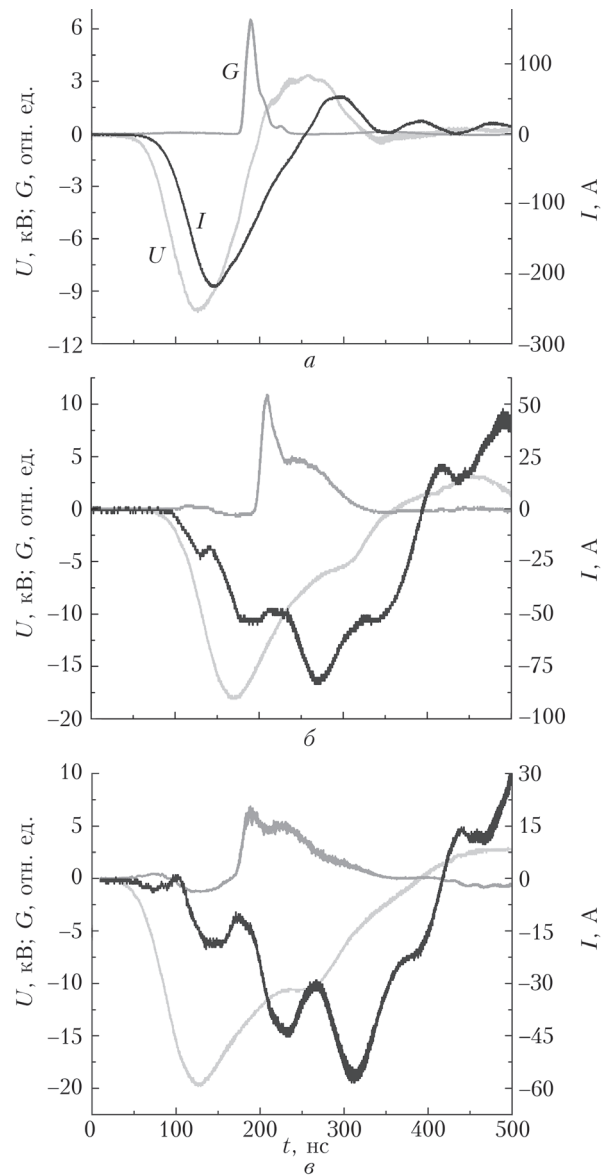


Рис. 3. Импульсы напряжения, тока и генерации при задержке: *a* – 5; *б* – 1000; *в* – 2000 мкс, для $N = 100$

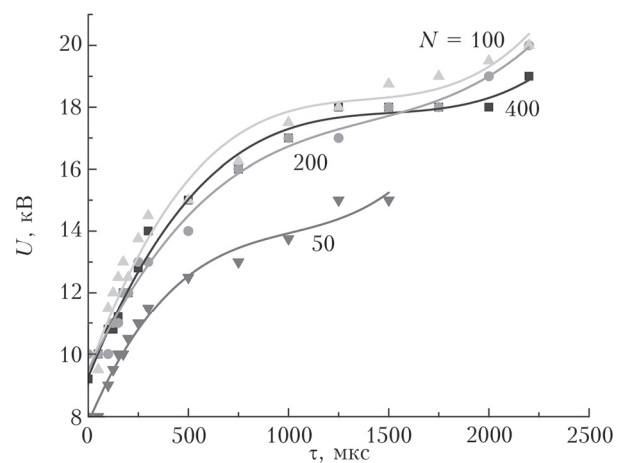


Рис. 4. Зависимость амплитуды напряжения на ГРТ от временной задержки

режиме [17]. При варьировании τ амплитуда импульса напряжения на ГРТ практически не меняется при изменении количества импульсов в цуге от 100 до 400. При уменьшении N до 50 происходит снижение амплитуды напряжения. На наш взгляд, это может быть связано с меньшей концентрацией атомов меди и, как следствие, большей концентрацией электронов к моменту поступления импульса ИПЗ по сравнению с большим числом импульсов в цуге. Этот вопрос требует дополнительного исследования с помощью методов математического моделирования кинетики плазмы активного элемента [19].

На рис. 5, *a* и *б* представлены зависимости энергии импульса излучения и его длительности от τ .

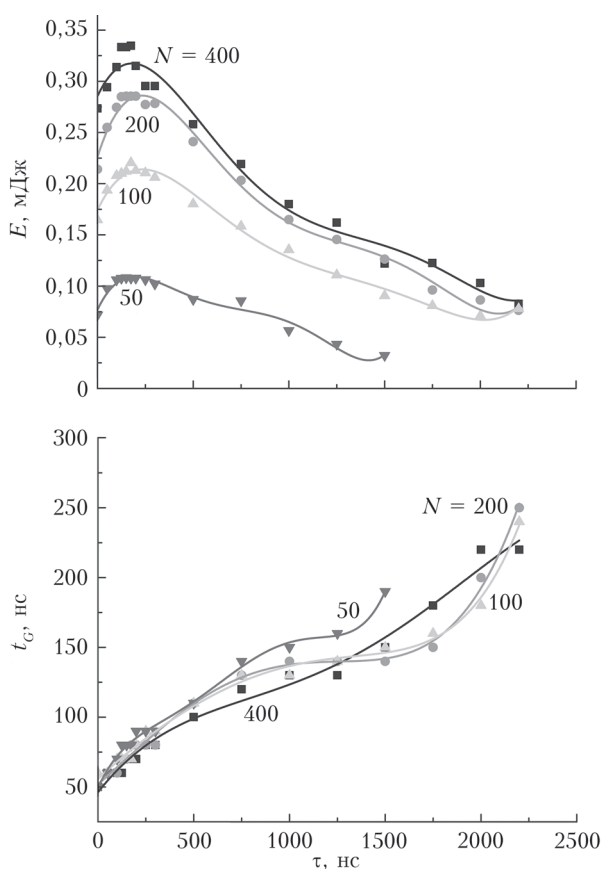


Рис. 5. Зависимость: *a* – энергии генерации; *б* – длительности импульса генерации от временной задержки

Из зависимостей на рис. 5 видно, что энергия импульса излучения имеет явно выраженный максимум при задержке 175 нс, что, вероятнее всего, связано со временем восстановления молекулы брома меди [16]. Этот факт будет детально изучен методом математического моделирования. Зависимость энергии импульса от задержки имеет идентичный характер в исследованном диапазоне количества импульсов в цуге. Увеличение задержки до 500 нс приводит к увеличению длительности импульса в 2 раза относительно исходного значения. При этом энергия импульса принимает значе-

ние, равное энергии излучения при нулевой задержке. Следует заметить, что увеличение импульсов в цуге с 200 до 400 приводит к меньшему росту энергии излучения, чем увеличение от 50 до 100 и от 100 до 200 импульсов. Это косвенно говорит об обеспечении стационарной концентрации атомов меди в основном состоянии при $N > 200$.

Длительность импульса генерации монотонно растет с увеличением задержки и слабо зависит от количества импульсов в цуге. При нулевой задержке этот параметр составляет порядка 50 нс и достигает 150 нс при задержке 1500 мкс. Его значения практически одинаковые (расхождение не превышает 10%) при количестве импульсов в цуге от 100 до 400. В случае, когда количество импульсов в цуге составляет 50, длительность импульса достигает значения 150 нс при задержке 1000 мкс.

С учетом того, что за указанные интервалы времени (до 2000 мкс) температура газа почти не меняется, можно заключить, что основной вклад в увеличение длительности импульса излучения может вносить предимпульсная концентрация электронов. Увеличение задержки ведет к ее уменьшению, что, в свою очередь, приводит к изменению параметров импульсов возбуждения: росту длительности импульса тока возбуждения, уменьшению скорости его нарастания, росту амплитуды напряжения на ГРТ. Это хорошо согласуется с другими работами [7, 9], в которых увеличение длительности импульса излучения наблюдается при снижении частоты импульсов возбуждения. Этот факт предполагается детально изучить с использованием методов математического моделирования на основании полученных экспериментальных результатов.

Заключение

В работе исследованы возможности увеличения длительности импульса излучения активного элемента на парах брома меди за счет изменения режима возбуждения. Разработана система, включающая в себя три источника питания, алгоритм работы которых независимо изменяется программными средствами. Использование трех источников возбуждения для наработки металла рабочего вещества, гашения генерации и возбуждения атомов металла позволяет независимо изменять параметры плазмы и энергию возбуждения в широком частотном диапазоне. Для создания требуемой концентрации атомов меди (диссоциации молекулы CuBr) использовался цуг импульсов, параметры которых (ЧСИ и энергия, запасаемая в накопительном конденсаторе) были приближены к импульсно-периодическому режиму работы активного элемента. Экспериментально показано, что в диапазоне количества импульсов в цуге от 50 до 400 зависимость длительности импульса излучения от задержки после последнего импульса цуга до импульса возбуждения носит идентичный характер. Отличия заключаются в значении энергии импульса генерации, что, на наш взгляд, связано с большей

концентрацией атомов меди в случае большего количества импульсов в цуге. Экспериментально показана возможность увеличения импульса излучения в 2 раза (до 100 нс) при сохранении его энергии. Максимально достигнута длительность импульса 230 нс, при этом энергия излучения уменьшается в 3 раза относительно исходного значения.

Исследование возможности увеличения длительности импульса излучения выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-79-10096).

Система возбуждения на основе тиратрона изготовлена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* – 2. В 2 т. / под ред. В.М. Батенина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. Т. 2. 616 с.
2. Little C.E. *Metal vapor lasers: Physics, Engineering & Application*. Chichester: John Wiley&Sons Ltd., 1998. 620 p.
3. *Pulsed metal vapor laser*: Proc. NATO Advanced Research Workshop on Pulsed Metal Vapor Lasers – Physics and Emerging Applications in Industry, Medical and Science / C.E. Little, N.V. Sabotinov (eds.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. 479 p.
4. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 312 с.
5. Ключарева С.В., Пономарев И.В., Пушкарева А.Е. Лечение сосудистых мальформаций кожи с применением лазеров на парах меди и импульсного лазера на красителе // *Вестн. дерматологии и венерологии*. 2018. Т. 94, № 1. С. 65–75.
6. Kazaryan M.A., Lyabin N.A., Zharikov V.M. Technological systems based on copper vapour laser designed for measurement and material processing // *Proc. SPIE*. 2002. V. 4900, iss. 2. P. 1094–1098.
7. Trigub M.V., Vlasov V.V., Torgaev S.N., Evtushenko G.S. An image-brightness amplifier based on copper bromide vapor for operation at increased superradiance pulse duration // *Tech. Phys. Lett.* 2017. V. 43, iss. 9. P. 828–830. DOI: 10.1134/S1063785017090280.
8. 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. DOI: 10.15372/AOO20150911.

9. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Федоров К.В., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Лазер на парах бромида меди с длительностью импульса генерации до 320 нс // *Квант. электрон.* 2016. Т. 46, № 1. С. 57–60.
10. Kazaryan M.A., Lyabin N.A., Soldatov A.N., Yudin N.A. Role of the density of lower laser levels in the control of generation parameters of a copper vapor laser // *J. Rus. Laser Res.* 2005. Т. 26, № 5. С. 373–379
11. Димаки В.А., Суханов В.Б., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Секционированный лазер на парах бромида меди с управляемой формой импульса генерации // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 5. С. 460–464.
12. Полуни Ю.П., Юдин Н.А. Управление характеристиками излучения лазера на парах меди // *Квант. электрон.* 2003. Т. 33, № 9. С. 833–835.
13. Тригуб М.В., Троицкий В.О. CuBr-лазер большого объема с возможностью непрерывного управления энергией генерации // *Письма в журн. технич. физики*. 2020. Т. 46, вып. 8. С. 40–43. DOI: 10.1134/S106378502004029X.
14. Гордон Е.Б., Егоров В.Г., Павленко В.С. Возбуждение лазеров на парах металлов цугами импульсов // *Квант. электрон.* 1978 г. Т. 5, № 2. С. 452–454
15. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование цугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромида меди // *Изв. Том. политех. ун-та*. 2009. Т. 314, № 4. С. 111–114
16. Торгаев С.Н., Губарев Ф.А., Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В. Восстановление молекул бромида меди в плазме CuBr-лазера в межимпульсный период // *Изв. вузов: Физика*. 2011. Т. 201, № 2. С. 81–84
17. Васнев Н.А., Тригуб М.В., Троицкий В.О., Димаки В.А. Исследование процесса восстановления стационарного режима генерации CuBr-лазера // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 3. С. 259–263.
18. Федоров А.И., Шиянов Д.В. Особенности получения высокого кдд CuBr-лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 11. С. 1035–1040.
19. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Torgaev S.N. Simulation of a CuBr laser // *Laser Phys.* 2008. V. 18, iss. 12. P. 1522–1525.

M.V. Trigub, V.A. Dimaki, V.O. Troitskii, N.V. Karasev. Increase in the CuBr-laser pulse duration in the pulse train mode.

The experimental results of the influence of excitation mode on the CuBr active element pulse duration are presented. One of the distinctive features of the research is the use of the train pulses for copper bromide molecules dissociation. The influence of train pulse number and delay time between the last pulse in a train and the excitation pulse on the laser pulse parameters is investigated. It is shown that the variation in the delay time allows one to change the duration of lasing pulse by more than 3 times.