

УДК 621.373.8

Исследование процесса восстановления стационарного режима генерации CuBr-лазера

Н.А. Васнев^{1,2}, М.В. Тригуб^{1,2}, В.О. Троицкий¹,
В.А. Димаки¹, В.В. Власов^{1*}

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 7.12.2016 г.

Представлены результаты исследования процесса восстановления стационарного режима генерации лазера на парах бромида меди при работе в цуговом режиме. Исследования проводились на макете CuBr-лазера с компьютерным управлением и возможностью реализации импульсно-периодического, цугового и ждущего режимов. Показано, что длительность процесса восстановления стационарного режима генерации зависит от продолжительности паузы в цуговом режиме и накопительной емкости источника накачки; определены характерные временные интервалы процесса восстановления и их зависимость от длительности паузы. Показано существование временной задержки между началом подачи импульсов накачки после паузы и появлением импульсов генерации. В диапазоне длительности паузы от 0,2 до 10 мс наблюдается увеличение времени отсутствия генерации. При длительности паузы 10 мс и более время отсутствия генерации стабилизируется и составляет порядка 15 мс.

Ключевые слова: CuBr-лазер, цуговый режим, последовательность импульсов, лазерная генерация, накопительная емкость; CuBr laser, train of pulses, train mode, laser generation, storage capacity.

Введение

Отличительной особенностью лазеров на парах металлов (ЛПМ) является импульсно-периодический режим работы с высокой частотой следования импульсов и высокой импульсной мощностью генерации [1–3]. Благодаря своим уникальным характеристикам такие лазеры применяются в различных областях: микрообработка материалов, зондирование атмосферы, демонстрационные системы, визуализация быстротекущих процессов с мощной фоновой засветкой и т.д. [3–8].

Для ряда применений большой интерес представляет возможность работы ЛПМ в цуговом режиме [2]. Такой режим может быть использован для сообщения определенной дозы энергии обрабатываемому материалу. Кроме того, цуговый режим позволяет увеличить ресурс источников накачки лазеров. Например, в задачах визуально-оптического контроля с использованием лазерного излучения введение паузы в процесс накачки целесообразно при настройке оптической системы, которая может занимать весьма продолжительное время.

* Николай Александрович Васнев (vasnev.nicol@yandex.ru); Максим Викторович Тригуб (trigub@tpu.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@iao.ru); Виктор Анатольевич Димаки (DimakiVA@yandex.ru); Василий Васильевич Власов (DimakiVA@yandex.ru).

Цуговый режим работы ЛПМ может быть реализован за счет формирования импульсов возбуждения со спадом на переднем фронте импульса тока для подавления генерации [9]. В данной работе предложен вариант реализации цугового режима работы CuBr-лазера, при котором пауза между цугами формируется за счет перерывов подачи импульсов возбуждения активной среды лазера [10]. Поддержание температурного режима обеспечивается внешним нагревателем, работа которого не зависит от разряда. Перерывы подачи импульсов возбуждения способствуют уменьшению концентрации атомов меди в активном объеме, на переходах которой осуществляется генерация. Следовательно, длительные перерывы в подаче импульсов возбуждения могут способствовать увеличению времени выхода на стационарный режим генерации лазера по окончании паузы. Предложенный способ невозможен для лазеров, работающих в режиме саморазогрева, поскольку импульс накачки у таких лазеров служит не только для диссоциации молекул CuBr и возбуждения наработанных атомов меди, но и для обеспечения требуемого температурного режима среды.

Целью данной работы является исследование зависимости времени восстановления стационарного режима генерации CuBr-лазера от длительности паузы в цуговом режиме работы. Для этого были изучены переходные процессы, протекающие в активной среде лазера после паузы. Исследования проводились

на макете CuBr-лазера с независимыми нагревателями внешней стенки газоразрядной трубки (ГРТ), контейнеров с бромидом меди и генератором водорода.

Экспериментальная установка

На рис. 1 представлена экспериментальная установка. Накачка лазера осуществляется с помощью разряда накопительной емкости 1100 пФ на ГРТ 1 через тиратрон [2]. Частота повторения импульсов (ЧПИ) варьируется от 10 до 18 кГц. Глухое зеркало 2 и плоскопараллельная пластина 3 образуют оптический резонатор. Линза 4 используется для фокусировки пучка на чувствительных элементах датчиков: измерителя мощности Ophir 30C-SH 5 и ФЭК-22СПУ-М 6. Последний подключен к осциллографу 7 для регистрации импульсов генерации. Необходимую температуру внешней стенки ГРТ (~680 °С), контейнеров с CuBr (~500 °С) и контейнеров с HBr обеспечивает трехканальный блок управления температурой (БУТ).

Ранее была разработана система компьютерного управления (СУ) импульсно-периодическим, цуговым и ждущим режимами работы лазера на парах бромида меди [10]. Используемое в работе [10] программное обеспечение позволяет регулировать количество импульсов в цуге и частоту их повторения. Также предусмотрена регулировка паузы между цугами.

Рис. 2 иллюстрирует принцип действия используемой СУ. До момента времени t_0 CuBr-лазер работает в импульсно-периодическом режиме. В момент времени t_0 вводится пауза в процесс накачки активной среды, в результате чего импульсы генерации прекращаются. Длительность паузы (t_n) регулируется системой управления. В течение времени $t_0 \div t_1$ происходят уменьшение концентрации атомов меди и увеличение концентрации молекул CuBr в активном объеме.

В момент времени t_1 начинается генерация цуга длительностью t_n . Из рис. 2 видно, что энергия импульсов генерации в этот момент существенно меньше, чем при стационарном импульсно-периодическом режиме, однако с течением времени она растет и достигает своего исходного значения. Далее в момент времени t_2 цуг заканчивается и следует пауза (t_{n2}), длительность которой также задается системой управления. По истечении указанной паузы лазер переводится в стационарный режим.

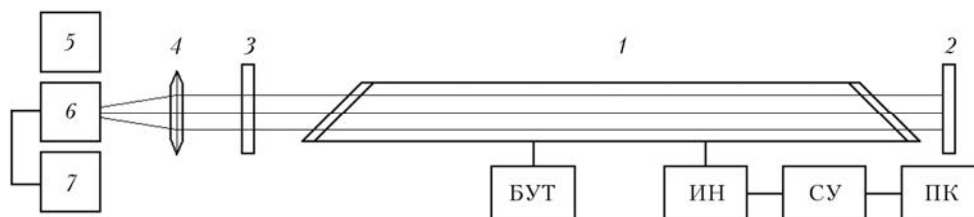


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – ГРТ; 2 – глухое зеркало; 3 – плоскопараллельная пластина; 4 – собирающая линза; 5 – измеритель мощности Ophir 30C-SH; 6 – фотоэлемент электрический коаксиальный (ФЭК-22СПУ-М); 7 – осциллограф; ПК – персональный компьютер; СУ – система управления; ИН – источник накачки; БУТ – трехканальный блок управления температурой

Результаты эксперимента

В большинстве случаев удалось выделить два характерных времени процесса восстановления. На рис. 3 эти времена обозначены как t_1 и t_2 . Как правило, к концу временного интервала t_2 амплитуда импульсов генерации достигает не менее 90% от амплитуды импульсов до перевода лазера в цуговый режим.

Исследования проводились при изменении продолжительности паузы t_n в диапазоне от 1 до 1000 мс. На рис. 4 показаны зависимости характерных временных интервалов t_1 и t_2 от длительности паузы. Если пауза длится от 1 до 500 мс, время восстановления стационарного режима работы увеличивается – чем больше пауза, тем большее количество импульсов возбуждения требуется для восстановления импульсно-периодического режима.

Такой характер поведения кривых $t_1 = f(t_n)$ связан, прежде всего, с тем, что в отсутствие разряда в активном объеме CuBr-лазера уменьшается концентрация атомов меди за счет процессов рекомбинации и их осаждения на стенке ГРТ [4].

При длительности паузы 500 мс и более большинство кривых $t_1 = f(t_n)$ начинает монотонно снижаться (рис. 4, а). Исключением из данной закономерности является зависимость при частоте повторения импульсов (ЧПИ) 14 кГц. На наш взгляд, это связано с тем, что эффективность энерговклада ниже из-за характеристик разрядного контура. Характерное время t_2 (рис. 4, б) с увеличением паузы стремится к некоторому стационарному значению. Особенно хорошо это видно при ЧПИ 14 и 16 кГц. При возрастании длительности паузы выделить характерное время t_2 становится значительно труднее. Поэтому для построения зависимостей, представленных на рис. 4, была использована аппроксимация полученных данных.

Анализ экспериментальных данных также показал, что после паузы t_n наблюдается интервал времени, когда цуг импульсов возбуждения активного объема уже начался, а импульсы генерации по-прежнему отсутствуют ($t_{ог}$). Вероятно, в перерывы подачи импульсов возбуждения концентрация атомов меди становится настолько мала, что не преодолевается порог генерации. Следовательно, общее время ($t_{общ}$), требуемое для наработки атомов меди и их возбуждения в активном объеме, будет складываться из трех характерных времен – $t_{ог}$, t_1 , t_2 (рис. 5, а).

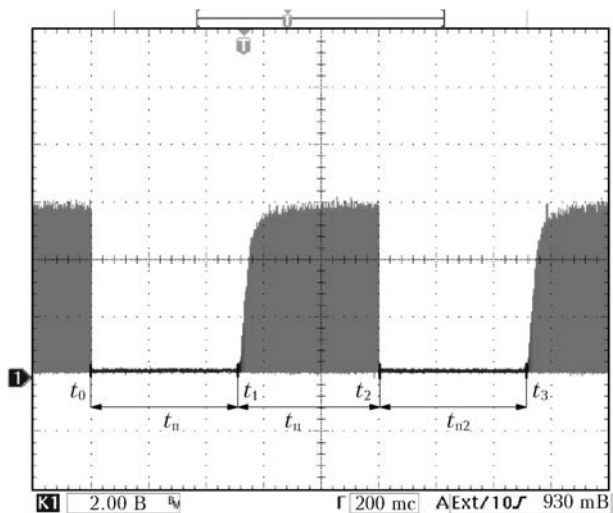


Рис. 2. Амплитуда импульсов генерации в импульсно-периодическом и цуговом режимах

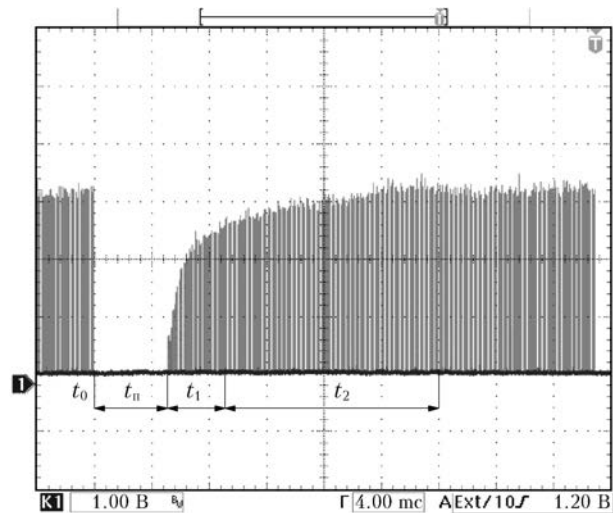


Рис. 3. Влияние паузы на амплитуду импульсов генерации с выделенными характерными интервалами времени t_1 и t_2

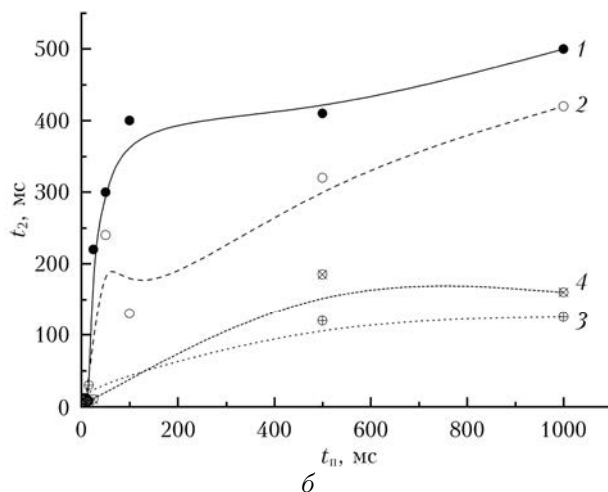
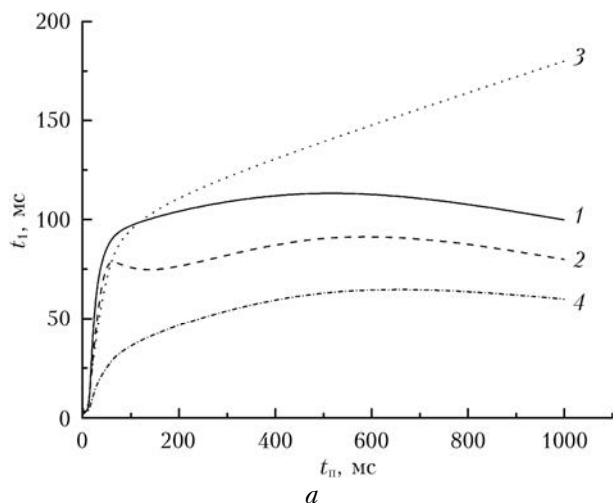


Рис. 4. Зависимости $t_1 = f(t_{n1})$ (а) и $t_2 = f(t_{n2})$ (б) для ЧПИ $f = 10$ (1), 11 (2), 14 (3), 16 кГц (4)

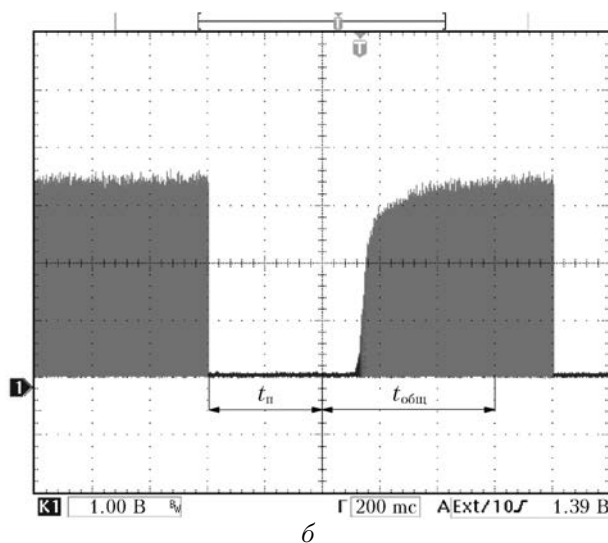
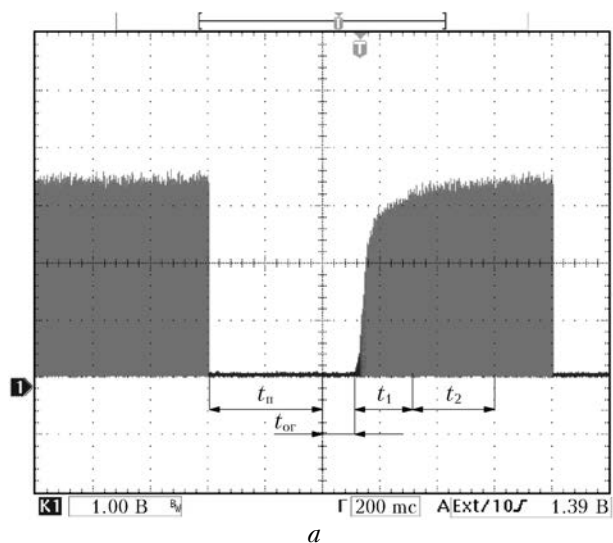


Рис. 5. Процесс восстановления стационарного режима генерации: а – с выделенными характерными интервалами времени $t_{ор}$, t_1 и t_2 ; б – с выделенным общим промежутком времени $t_{общ}$, требуемым для восстановления стационарного импульсно-периодического режима генерации

Задержка может быть также вызвана необходимостью достижения определенной концентрации электронов, необходимых для возбуждения атомов меди, концентрация которых уменьшается при отсутствии разряда. Следует отметить, что при проведении эксперимента не регистрировались диаграммы импульсов тока и напряжения в момент времени $t_{ор}$, которые позволили бы провести более детальный анализ процессов в начальный момент. Данная задача не ставилась в настоящей работе, однако может быть весьма полезна для изучения кинетики активной среды.

На рис. 6 представлены зависимости $t_{ор} = f(t_{п})$ для различных ЧПИ и накопительной емкости. Следует ожидать, что с ростом продолжительности паузы процессы релаксации активной среды будут протекать более интенсивно, но это справедливо лишь для весьма узкого диапазона длительности $t_{п}$: от 0,2 до 10 мс. При дальнейшем увеличении паузы время отсутствия генерации ($t_{ор}$) стабилизируется и составляет в среднем 15 мс. Для проведения сравнительного анализа зависимостей $t_{ор} = f(t_{п})$ были аппроксимированы экспериментальные данные. Следует полагать,

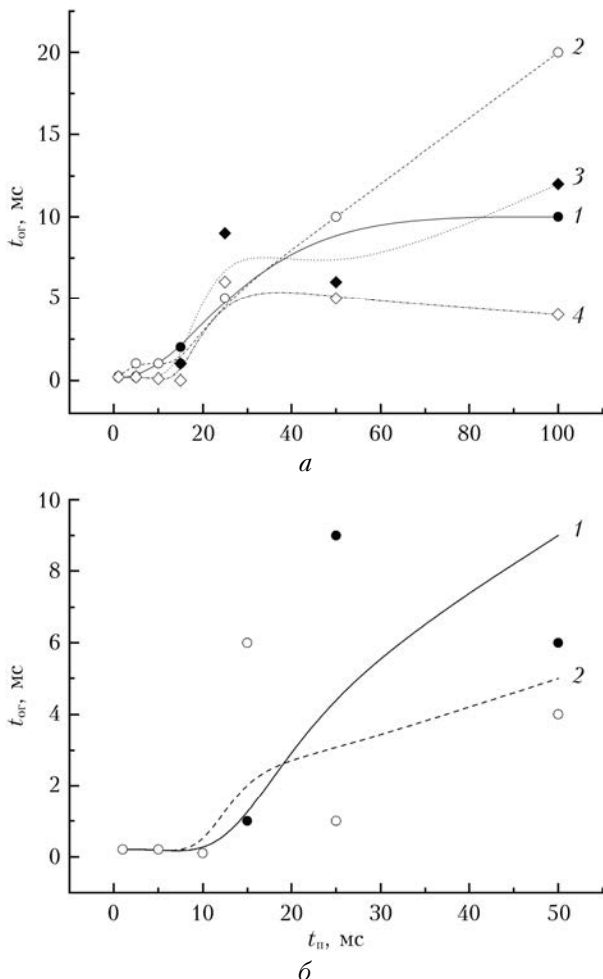


Рис. 6. Зависимости $t_{ор} = f(t_{п})$: *a* – при одинаковой накопительной емкости $C = 1100$ пФ и различных значениях ЧПИ: $f = 10$ (1), 11 (2), 14 (3), 16 кГц (4); *б* – при ЧПИ $f = 14$ кГц и накопительной емкости $C = 1100$ (1), 1320 пФ (2)

что на процесс восстановления активной среды должны оказывать влияние такие факторы, как давление паров CuVg и концентрация добавок NbV в ГРТ. Однако в проведенных исследованиях эти зависимости не рассматривались.

Зависимости $t_{общ} = f(t_{п})$ представлены на рис. 7. С увеличением ЧПИ при одинаковой накопительной емкости ($C = 1100$ пФ) время восстановления стационарного режима генерации лазера уменьшается (рис. 7, *a*). Также из приведенных зависимостей видно, что увеличение накопительной емкости при одинаковой ЧПИ способствует более интенсивному протеканию процесса восстановления (рис. 7, *б*).

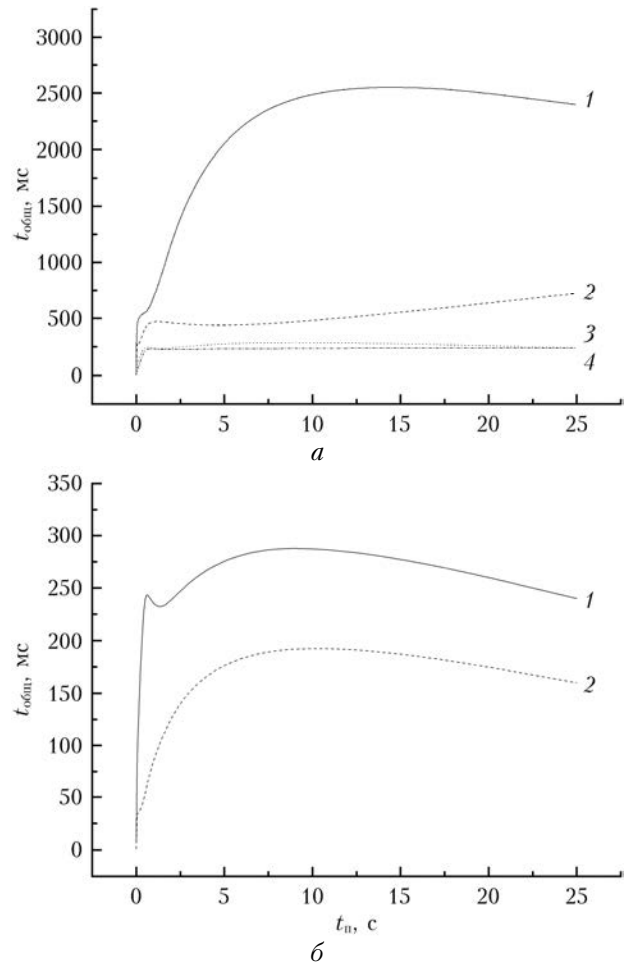


Рис. 7. Зависимости $t_{общ} = f(t_{п})$: *a* – при одинаковой накопительной емкости $C = 1100$ пФ и различных значениях ЧПИ: $f = 10$ (1), 11 (2), 14 (3), 16 кГц (4); *б* – при ЧПИ $f = 14$ кГц и накопительной емкости $C = 1100$ (1), 1320 пФ (2)

Зависимости на рис. 7 приведены для паузы длительностью от 1 мс до 25 с. Дальнейшее увеличение паузы приводит к существенному изменению характера протекания процесса восстановления – амплитуда импульсов генерации начинает изменяться согласно другим законам, для которых не характерны временные интервалы t_1 , t_2 и $t_{общ}$. Пример изменения амплитуды импульсов генерации при более длительной паузе приведен на рис. 8.

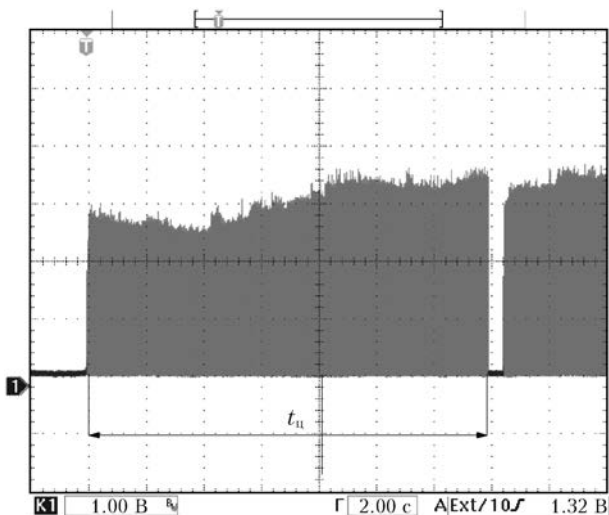


Рис. 8. Влияние паузы длительностью больше 25 с на амплитуду импульсов генерации в цуговом режиме

Определение закономерностей, по которым протекает процесс восстановления после паузы в десятки и сотни секунд, требует отдельных исследований.

Заключение

С использованием CuBr-лазера с компьютерным управлением импульсно-периодическим, цуговым и ждущим режимами были исследованы процессы восстановления стационарного режима работы лазера после отключения импульсов возбуждения на различное время. По результатам проведенных исследований можно заключить, что после паузы длительностью менее 1 с восстановление стационарного режима генерации занимает от десятков до сотен миллисекунд. Общее время ($t_{\text{общ}}$), необходимое для наработки атомов меди и их возбуждения в активном объеме, складывается из трех характерных времен $t_{\text{ог}}$, t_1 , t_2 . При этом больший практический интерес представляет переходный процесс после более длительных пауз, от десятка секунд до нескольких минут, требуемых для отладки оптической системы в задачах визуально-оптической диагностики. За это время в активной среде лазера начинают преобладать молекулы галогенида металла, на диссоциацию которых тратится дополнительная энергия.

На основе проведенных экспериментов была выдвинута гипотеза о возможности реализации цугового режима работы CuBr-лазера, при котором в цуге генерируется один или несколько импульсов дли-

тельностью в единицы миллисекунд, а пауза между цугами составляет единицы секунд. Таким образом, во время цугового режима работы активной среде будет сообщаться количество энергии, требуемое для поддержания в ней необходимой концентрации чистой меди и эффективного восстановления стационарного импульсно-периодического режима. Реализация такого режима работы позволит сократить время, когда лазер работает вхолостую, и увеличить срок его эксплуатации. Учитывая актуальность проблемы, необходимо провести ряд дополнительных исследований и оценить реальную возможность реализации описанного режима работы лазера.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 14-19-00175.

1. Foster P.G. Industrial applications of copper bromide laser technology: Ph.D. Thesis. Australia, Adelaide, University of Adelaide, 2005. 308 p.
2. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
3. 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, N 20. P. 141–155.
4. 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. 376–380.
5. Rybka D.V., Trigub M.V., Sorokin D.A., Evtushenko G.S., Tarasenko V.F. Corona discharge in atmospheric pressure air when using modulated voltage pulses // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 582–586.
6. Trigub M.V., Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Shiyanov D.V., Evtushenko T.G. Copper bromide vapor brightness amplifiers with 100 kHz pulse repetition frequency // Opt. Commun. 2016. V. 376. P. 81–85.
7. Trigub M.V., Shiyanov D.V., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S. MnBr vapor active medium with a built-in reactor at 100-kHz pulse repetition frequency // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 5. P. 458–462.
8. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Курдяшкин А.И. Визуализация процесса СВС с использованием активных сред CuBr-лазеров // Ползунов. вестн. 2012. № 2/1. С. 181–184.
9. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Тригуб М.В. Управление генерацией CuBr-лазера // Изв. Том. политехн. ун-та. 2009. Т. 315, № 4. С. 147–151.
10. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г., Шестаков Д.Ю. Лазер на бромиде меди с компьютерным управлением импульсно-периодического, цугового и ждущего режимов // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 6. С. 1–4.

N.A. Vasnev, M.V. Trigub, V.O. Troitskii, V.A. Dimaki, V.V. Vlasov. Recovery of steady-state lasing in CuBr laser.

The recovery of steady-state lasing in a CuBr laser operating in the train mode is studied with the use of a computer-based control system. The control system provided the repetitively-pulsed, train, and waiting modes. The dependences of the recovery time on the pause duration and the storage capacitor are derived. The specific recover times are determined; their dependences on the pause duration in the train mode are analyzed. A time delay between the start of pump pulses and appearance of lasing pulses is shown. The time where lasing is absent increases in the pause duration range from 0.2 to 10 ms; this time is set to about 15 ms if a pause is equal or longer than 10 ms.