

УДК 535:371.623

## Низкочастотный CuBr-лазер

А.И. Федоров, Д.В. Шиянов\*

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

Поступила в редакцию 21.05.2015 г.

Проведены исследования и оптимизация параметров излучения CuBr-лазера с малым объемом активной зоны, работающего в режиме сдвоенных импульсов накачки с частотой повторения от 5 до 100 Гц. Показана возможность повышения средней мощности излучения CuBr-лазера за счет оптимизации удельной энергии диссоциирующего и возбуждающего импульсов накачки, а также временной задержки между ними. Максимальные средние мощности излучения получены при частотах повторения импульсов накачки ~ 100 Гц и задержках порядка 125 нс. При этом высокие энергии излучения достигнуты на низких частотах. На частоте повторения 5 Гц энергия излучения лазера составила 0,42 мДж с длительностью импульса генерации по полувысоте 30 нс и удельными энергиями диссоциирующего и возбуждающего импульсов 12 и 6 мДж/см<sup>3</sup> соответственно.

*Ключевые слова:* CuBr-лазер, режим сдвоенных импульсов накачки, энергия излучения, удельная энергия диссоциирующего и возбуждающего импульсов накачки; CuBr laser, double pulsed mode, output energy, dissociation and excitation energy density.

### Введение

В настоящее время самым эффективным из всех лазеров на парах металлов является лазер на парах меди и его низкотемпературные аналоги — лазеры на парах галогенидов меди (ЛПГМ), которым в последнее время уделяется все больше внимания. В этих лазерах удается реализовывать достаточно высокие удельные и средние мощности генерации [1–4].

Один из основных способов работы ЛПГМ — импульсно-периодический (десятки–сотни килогерц), при котором осуществляется нагрев активного элемента, диссоциация молекул CuBr и возбуждение атомов меди. Вместе с тем часто возникает потребность в таких лазерах, работающих с частотой единицы–сотни герц и большой энергией импульса излучения. Решением этой проблемы может стать переход к возбуждению активной среды ЛПГМ сдвоенными импульсами накачки, следующими в герцовом режиме при наличии внешнего нагревателя газоразрядной трубки (ГРТ). Такой режим типичен для данного класса лазеров [5–8]. Первый импульс является диссоциирующим, а второй — возбуждающим.

Особенности создания активной среды в лазерах этого класса и способы ее накачки позволяют получать высокие удельные энергии генерации в ГРТ с малым объемом активной зоны и выходные высокие значения энергий в ГРТ большого объема, так же как и удельные и средние мощности излучения в импульсно-периодическом режиме [1–4].

Так, наибольшие удельные энергии излучения в режиме сдвоенных импульсов 45 мкДж/см<sup>3</sup> получены в ГРТ с объемом активной зоны менее 10 см<sup>3</sup> [5], а максимальные значения энергии до 10 мДж реализованы в ГРТ с объемом свыше 500 см<sup>3</sup> [6, 7].

Все основные исследования характеристик ЛПГМ со сдвоенными импульсами возбуждения, таких как зависимость энергии излучения от энергий диссоциирующего и возбуждающего импульсов, задержка между ними, давление и род буферного газа и т.д., были выполнены в основном для CuI- и CuCl-лазеров. Однако в [8] проведено сравнение их характеристик с характеристиками CuBr-лазера в трубках с объемом 10 см<sup>3</sup> в частотном диапазоне 1–10 Гц и показано, что наилучшими удельными параметрами обладает именно CuBr-лазер (40 мкДж/см<sup>3</sup>).

Нами ранее проведены исследования низкочастотного CuBr-лазера с малыми удельными энергиями, вкладываемыми в разряд при частоте следования 50 Гц, когда в качестве коммутаторов использовались тиристор ТЧ-50 и разрядник РУ-62 [9]. Были определены оптимальные задержки между импульсами диссоциации и возбуждения для удельных энергий, не превышающих 0,7 мДж/см<sup>3</sup>. В [10] на этой же частоте 50 Гц были увеличены энергии диссоциирующего и возбуждающего импульсов до 1,4 мДж/см<sup>3</sup> за счет использования в возбуждающем каскаде тиратрона ТГИ1-1000/25 и полученный энергосъем позволил сделать вывод, что для его повышения требуется дальнейшее увеличение энергии диссоциирующего импульса. С учетом этого, проведя оптимизацию параметров импульсов накачки и эффективного ввода энергии возбуждающего импульса в активную среду лазера на частоте 50 Гц, мы смогли

\* Анатолий Игнатьевич Федоров (fedorov@asd.iao.ru);  
Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru).

получить кпд лазера по возбуждению 1,2% с энергией излучения 0,22 мДж [11].

Таким образом, открытыми оставались вопросы, связанные с определением оптимальных удельных энергий импульсов диссоциации, возбуждения, с временными задержками между ними в зависимости от частоты следования импульсов лазера.

Настоящая статья посвящена решению указанных задач с целью достижения высоких удельных параметров излучения CuBr-лазера со сдвоенными импульсами накачки на примере ГРТ с малым объемом активной зоны. При этом по сравнению с ранее проведенными исследованиями был расширен частотный диапазон между парами импульсов от 5 до 100 Гц и значительно увеличены удельные энергии диссоциирующего и возбуждающего импульсов.

## Техника эксперимента

Экспериментальная установка состояла из ГРТ, двух импульсных генераторов накачки, генератора импульсов задержек и системы регистрации параметров излучения. Конструкция ГРТ приведена в [12], а схема экспериментальной установки в [13]. Лазерная трубка имела внутренний диаметр 1 см и объем активной зоны 31,4 см<sup>3</sup>, которая нагревалась от внешней печи. На холодных концах трубки были расположены внутренние электроды и выходные окна. Резонатор состоял из алюминиевого зеркала и кварцевой пластины. К электродам прикладывались два импульса накачки, временная задержка  $t_d$  между которыми могла изменяться от 25 до 250 мкс. Первый диссоциирующий импульс накачки формировался высоковольтным источником питания, который позволял изменять его амплитуду напряжения до 20 кВ и ток разряда до 700 А за счет рабочей емкости  $C_d$ . Ее величина могла изменяться от 3,4 до 11,5 нФ. Источник питания мог вкладывать в разряд удельные энергии диссоциации  $E_d$  от 3 до 26 мДж/см<sup>3</sup>. Для возбуждения атомов меди использовался дополнительный высоковольтный источник питания, который формировал импульсы возбуждения с амплитудой до 10 кВ и током разряда до 400 А за счет рабочей емкости  $C_p$ . Ее величина могла изменяться от 1,1 до 9,4 нФ. Источник обеспечивал удельные энергии возбуждения  $E_p$  в активную среду от 2 до 12 мДж/см<sup>3</sup>. В качестве коммутаторов применялись тиратроны ТГИ1-1000/25. Лазер позволял работать с частотой повторения импульсов генерации от 5 до 100 Гц. Основные эксперименты нами были проведены с частотой следования импульсов генерации 50 Гц. В качестве буферного газа в активной среде использовался неон при давлении 25 торр.

Параметры разрядной плазмы и лазерного излучения регистрировались с помощью датчика тока Pearson Current Monitors 8450, пробника напряжения Tektronix P6015A, фотоприемника ФЭК-22-СПУМ, осциллографа LeCroy WJ-324 и calorиметра ИМО-2Н.

## Результаты экспериментов

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы импульсов диссоциации (а) и возбуждения (б) с частотой следования  $f = 50$  Гц. Это импульсы напряжения  $U$ , тока разряда  $I$  и генерации  $P_r$  для временной задержки 100 мкс между импульсами диссоциации и возбуждения. Генерация возникла на переднем фронте разрядного тока с задержкой относительно его начала 40 нс. Длительность импульса излучения на полувысоте соответствовала 30 нс, а по основанию 60 нс. Амплитуды напряжения диссоциирующего и возбуждающего импульсов были равны 13,5 и 8,5 кВ, а амплитуды токов разряда – 600 и 350 А соответственно.

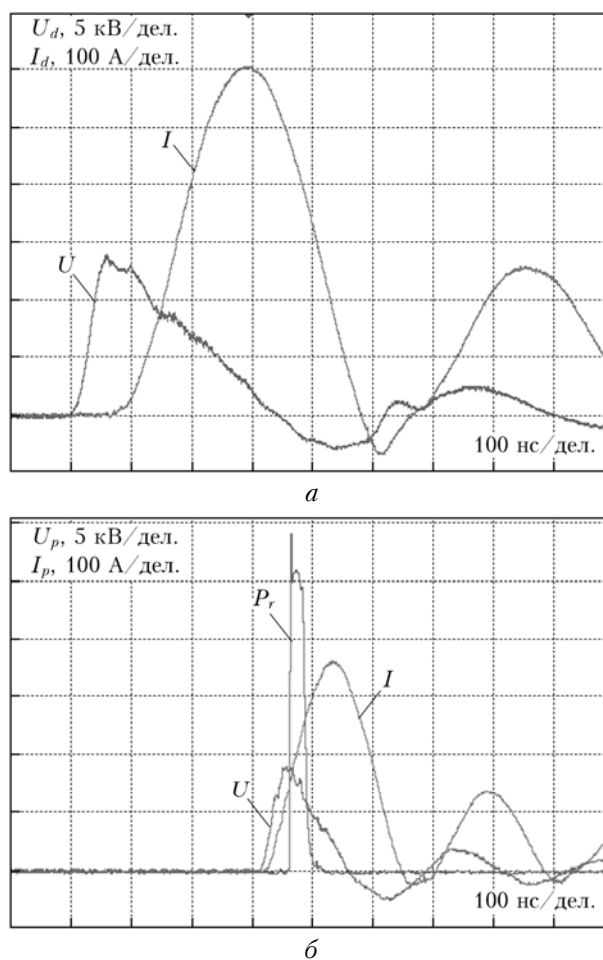


Рис. 1. Осциллограммы диссоциирующих импульсов накачки  $U$ ,  $I$  в лазерной трубке (а), возбуждения  $U$ ,  $I$  и генерации  $P_r$  (б) с  $f = 50$  Гц

Стоит отметить, что по оценкам [14] для создания необходимой концентрации паров атомов меди ( $N_{\text{CuBr}} = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) энерговклад должен превышать пороговый предел, равный 0,8 мДж/см<sup>3</sup>. Как видим, наш диссоциирующий источник питания позволял более чем на порядок превышать это значение.

Нами были проведены исследования зависимости средней мощности излучения от энергии диссоциации молекулы CuBr, которая могла изменяться

от величины  $C_d$  и рабочего напряжения, подаваемого на  $C_d$ . Тем самым можно было изменять как длительность, так и амплитуду диссоциирующих импульсов накачки. При этом энергия импульса возбуждения оставалась постоянной и могла подаваться в активную среду с изменяющейся временной задержкой.

На рис. 2 приведены зависимости средней мощности излучения  $P_{ср}$  от величины емкости источника диссоциирующего импульса накачки и временной задержки между ним и импульсом возбуждения с частотой повторения 50 Гц. Такие низкие значения мощностей характерны для герцового режима работы этих лазеров с малым рабочим объемом. Емкость источника возбуждения была постоянной (4,7 нФ) и обеспечивала  $E_p = 5$  мДж/см<sup>3</sup>. Как видно, максимальная средняя мощность излучения наблюдалась при  $C_d = 6,8$  нФ и  $t_d = 75 \div 200$  мкс.

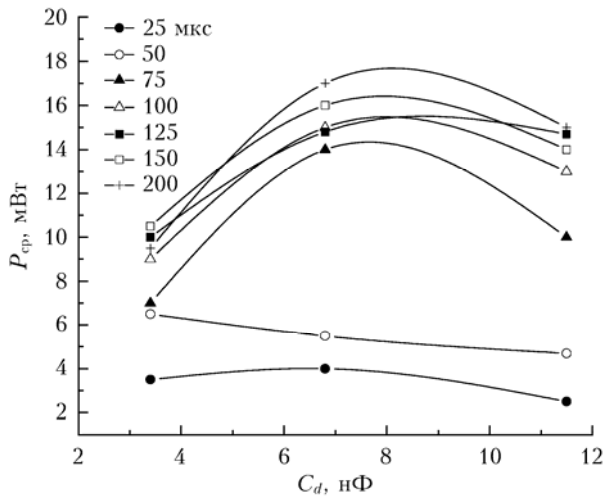


Рис. 2. Зависимости средней мощности излучения от величины емкости источника диссоциирующего импульса накачки и временной задержки между ним и импульсом возбуждения для  $C_p = 4,7$  нФ

Установлено, что увеличение емкости диссоциирующего источника накачки уменьшало величину зарядного напряжения на ней. Это приводило к снижению вкладываемой энергии в активную среду лазера. Так, для  $C_d = 6,8$  нФ при рабочем напряжении 15 кВ удельная энергия диссоциации равнялась 24 мДж/см<sup>3</sup>, а для емкости 11,5 нФ она соответствовала 12 мДж/см<sup>3</sup> с рабочим напряжением 8 кВ. При этом средняя мощность излучения не сильно отличалась для данных емкостей. Поэтому дальнейшие эксперименты нами проводились для емкости  $C_d = 1,5$  нФ, при которой емкость источника импульса возбуждения могла изменяться от 1,1 до 9,4 нФ.

На рис. 3 приведены зависимости средней мощности излучения от величины емкости источника импульса возбуждения и временной задержки между ним и диссоциирующим импульсом накачки с частотой повторения 50 Гц. Максимальные параметры излучения наблюдались с емкостью  $C_p = 1,1$  нФ для оптимальных временных задержек от 100 до 150 мкс.

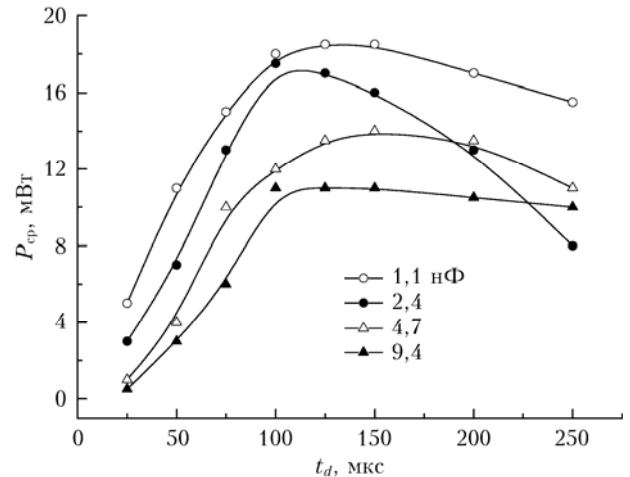


Рис. 3. Зависимости средней мощности излучения от величины емкости источника возбуждающего импульса и временной задержки между ним и импульсом от источника диссоциирующего импульса накачки для  $C_d = 1,5$  нФ

Они соответствовали средней мощности 18 мВт и энергии излучения 0,36 мДж. При этом амплитуда импульса напряжения равнялась 10 кВ, которой соответствовала оптимальная удельная энергия возбуждения 2 мДж/см<sup>3</sup>. Удельная мощность возбуждения  $W$  равнялась 18 кВт/см<sup>3</sup>. Она определялась, согласно [15], как  $W = E_c / (Vt)$ , где  $E_c$  — энергия, запасаемая в емкости  $C_p$ ;  $V$  — активный объем лазера;  $t$  — длительность по основанию первого полупериода импульса тока разряда. Для сравнения: при  $C_p = 9,4$  нФ средняя мощность излучения равнялась 10 мВт, т.е. была почти в 2 раза меньше, чем для емкости  $C_p = 1,1$  нФ. Хотя удельная энергия возбуждения была больше и равнялась 5 мДж/см<sup>3</sup>, удельная мощность возбуждения уменьшалась до 11 кВт/см<sup>3</sup>. Таким образом, удельную мощность возбуждения можно считать одним из основных параметров, влияющим на энергию излучения для режима двохвостых импульсов накачки.

На рис. 3 временные задержки между импульсами накачки можно разделить на две области. При временных задержках меньше 100 мкс средняя мощность излучения линейно возрастала независимо от величины удельной мощности возбуждения. А для временных задержек более 100 мкс она начинала уменьшаться с ростом удельной мощности возбуждения. Оптимальной задержкой между импульсами накачки в этом случае является временной интервал от 100 до 150 мкс. При этом оптимальная удельная энергия диссоциации в нашем случае равнялась 12 мДж/см<sup>3</sup>.

Далее нами были проведены исследования частотно-энергетических характеристик лазера. На рис. 4 показаны зависимости средней мощности излучения от временной задержки между диссоциирующим и возбуждающим импульсами накачки для разных частот следования при  $C_d = 11,5$  нФ и  $C_p = 2,4$  нФ (а) и энергии излучения от частоты следования с оптимальной задержкой 150 мкс (б). Наиболее явная тенденция возрастания мощности генерации от временной задержки наблюдалась для частоты

повторения 25 Гц. Средняя мощность излучения существенно возрастала при частоте повторения 50 и 100 Гц. При этом область оптимальных задержек составляла 100–150 мкс. Максимальная средняя мощность излучения 20 мВт была зарегистрирована при частоте повторения импульсов генерации 100 Гц. Максимальная энергия излучения за импульс 0,42 мДж наблюдалась при частоте повторения 5 Гц, которая резко спадала с ее возрастанием до 25 Гц, а затем энергия медленно уменьшалась до 0,19 мДж при частоте повторения 100 Гц. При этом оптимальная удельная энергия диссоциации для данных частотных режимов равнялась 12 мДж/см<sup>3</sup>, а удельная энергия возбуждения соответствовала 2–6 мДж/см<sup>3</sup>.

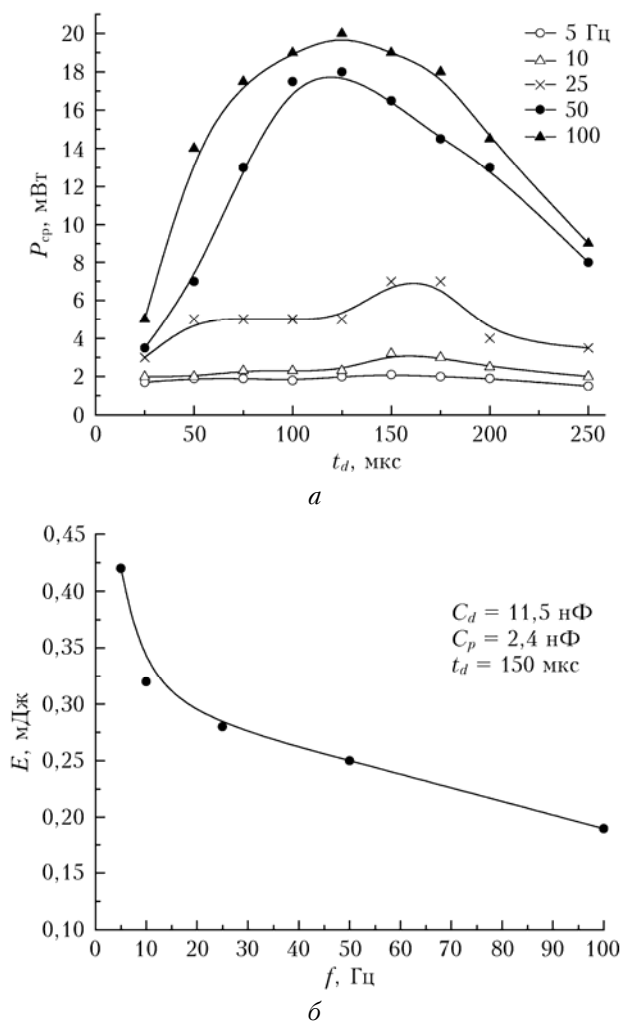


Рис. 4. Зависимости средней мощности (а) и энергии излучения  $E$  (б) от частоты повторения импульсов накачки и временной задержки между ними для оптимальных емкостей  $C_d = 11,5$  нФ и  $C_p = 2,4$  нФ источников питания

Дальнейшее увеличение параметров CuBr-лазера со сдвоенными импульсами накачки должно быть связано с оптимизацией импульсов возбуждения. Основная задача заключается в уменьшении паразитной энергии, вкладываемой в разряд после окончания импульса генерации. Решением этой проблемы

может стать применение специальных линий сжатия, уменьшающих длительность импульсов тока и напряжения или проходных емкостей, срезающих их задние фронты. Наряду с этим необходимо использовать активные добавки ( $H_2$ ,  $HBr$ ), способные повышать выходные характеристики таких лазеров в 2 раза и более [16].

## Заключение

Исследования и оптимизация параметров излучения CuBr-лазера для режима двойных импульсов накачки с частотой повторения от 5 до 100 Гц показали возможность повышения средней мощности излучения CuBr-лазера, работающего в режиме сдвоенных импульсов накачки за счет оптимизации удельной энергии диссоциирующего и возбуждающего импульсов накачки и временной задержки между ними. Максимальные средние мощности излучения получены при частотах 100 Гц и временных задержках до 125 мкс. Для частот повторения 5–25 Гц оптимальными оказались временные задержки 150–175 мкс, а для частот повторения 50–100 Гц они соответствовали 100–150 мкс. Получены импульсы генерации длительностью на полувысоте 30 нс с энергией излучения 0,42 мДж при частоте повторения 5 Гц для удельных энергий диссоциирующего импульса 12 мДж/см<sup>3</sup> и возбуждающего 6 мДж/см<sup>3</sup>.

1. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. A CuBr-laser with 1.4 W/cm<sup>3</sup> average output power // IEEE J. Quantum. Electron. 1994. V. 30, N 6. P. 3158–3160.
2. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Copper Bromide Laser of 120-W Average Output Power // IEEE J. Quantum. Electron. 1997. V. 33, N 5. P. 705–709.
3. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. CuBr-лазер со средней мощностью генерации свыше 100 Вт // Оптика атмосф. и океана. 1989. Т. 2, № 11. С. 1228–1230.
4. Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. Саморазогревный CuBr-лазер // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 11. С. 1053–1055.
5. Liu C.S., Feldman D.W., Pack J.L., Weaver L.A. Kinetic processes in continuously pulsed copper halide lasers // IEEE J. Quantum. Electron. 1977. V. 13, N 9. P. 744–751.
6. Nerheim N.R., Vetter A.A., Russel G.R. Scaling a double-pulsed copper chloride laser to 10 mJ // J. Appl. Phys. 1978. V. 49, N 1. P. 12–15.
7. Dimaki V.A., Troitskii V.O., Shiyanov D.V. The low frequency CuBr laser with generation energy of 3 mJ // XI Int. Conf. "Atomic and Molecular Pulsed Lasers". Abstracts. 2013. Tomsk, Russia. September, 16–20. P. 47.
8. Абросимов Г.В., Васильцов В.В., Волошин В.Н., Корнеев А.В., Письменный В.Д. Импульсная генерация на самоограниченных переходах атома меди в парах галогенидов меди // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2, вып. 9. С. 417–420.
9. Федоров А.И., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В. Исследование характеристик низкочастотного CuBr-лазера // Докл. V Всерос. конф. «Взаимодействие высококон-

- центрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». Новосибирск: Параллель, 2013. Т. 1. С. 263–265.
10. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Федоров К.В., Евтушенко Г.С. Режим одиночных импульсов генерации CuBr-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1107–1111.
  11. Федоров А.И., Шиянов Д.В. Возможности повышения эффективности CuBr-лазера в режиме двоек импульсов накачки // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 14. С. 98–104.
  12. Андриенко О.С., Губарев Ф.А., Димаки В.А., Иванов А.И., Левицкий М.Е., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Федоров В.Ф., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Лазеры на парах бромида меди нового поколения // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 999–1009.
  13. Федоров А.И., Федоров В.Ф., Димаки В.А. Возможности оперативного управления параметрами излучения CuBr-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 198–202.
  14. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В. CuBr-лазер с пониженным энергозатратом в разряд // Квант. электрон. 2000. Т. 30, № 5. С. 406–408.
  15. Федоров А.И. ХеСl-лазер низкого давления с продольной накачкой // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 10. С. 898–902.
  16. Андриенко А.С., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Суханов В.Б., Шиянов Д.В. Влияние добавок HBr в активную среду лазеров на парах меди и галогенида меди // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 2–3. С. 112–118.

*A.I. Fedorov, D.V. Shivanov. Low-frequency CuBr laser.*

Investigation and optimization of radiation parameters of the double-pulsed CuBr laser with a small active volume with repetition rate of 5 to 100 Hz were made. The possibility of increasing the average output power of CuBr laser by optimizing the specific energy of the dissociation and excitation pulses and their time delay between them is shown. Maximum average output power were received at a pulse repetition frequency 100 Hz and delay time 125  $\mu$ s. However, high energy radiation are achieved at low frequencies. The laser energy was 0.42 mJ with a pulse duration of 30 ns FWHM when dissociating and exciting energy density was 12 and 6 mJ/cm<sup>3</sup>, respectively.