

УДК 535:371.623

## Энергетические характеристики CuBr-лазера при низких частотах следования импульсов

В.А. Димаки, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий, Д.В. Шиянов\*

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

Поступила в редакцию 16.01.2018 г.

Показано, что использование для накачки CuBr-лазера источника питания с импульсным ступенчатым зарядом рабочей емкости позволяет обеспечить генерацию лазера в режиме «одиночных» импульсов с частотами следования от 330 Гц. Эффективный ввод энергии в активную среду лазера с рабочими емкостями от 6,8 до 20,4 нФ осуществляется за 5–11 ступеней заряда. Повышению импульсной энергии генерации до 3 мДж способствует увеличение рабочей емкости и зарядового напряжения.

*Ключевые слова:* CuBr-лазер, частота следования импульсов, импульсный заряд, ступенчатый заряд, импульсная энергия, энерговыход; CuBr laser, pulse repetition rate, pulse charge, step charge, pulse energy, input energy.

### Введение

Типичный режим работы лазеров на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) — импульсно-периодический с частотами следования импульсов (ЧСИ) в десятки килогерц [1–3]. В этом режиме одновременно происходят разогрев активной зоны лазера, диссоциация молекул галогенида металла и возбуждение металла. Однако некоторые практические задачи требуют генерации с частотами в единицы-сотни герц и высокими энергиями излучения. Вопрос повышения энергии излучения в ЛПГМ остается актуальным вследствие ограничения энергетики механизм создания инверсной населенности при газоразрядном возбуждении. Генерация на указанных частотах в ЛПГМ невозможна в режиме «одиночных» импульсов, так как за большой межимпульсный интервал среда успевает релаксировать, и молекулы галогенида металла эффективно восстанавливаются к приходу следующего импульса возбуждения. Поэтому используется режим сдвоенных импульсов накачки: первый импульс — диссоциирующий, а второй — возбуждающий. Кроме того, требуется подогрев активной зоны.

В таком режиме в самом эффективном из всех ЛПГМ CuBr-лазере на частотах 5–100 Гц с высокими энергиями возбуждения и напряжением импульсов накачки до 20 кВ получены энергия генерации 10 мДж и удельная энергия 45 мкДж/см<sup>3</sup> [4].

Но этим значениям соответствуют невысокая мощность излучения и КПД лазера. Этот результат получен в двухсекционной газоразрядной трубке (ГРТ) длиной 160 см с объемом активной зоны 0,8 л.

В режиме регулярных импульсов импульсная энергия растет за счет увеличения объема активной среды лазера и мощности накачки. Так, в CuBr-лазере с объемом рабочей зоны 5,6 л реализована энергия в импульсе ~7 мДж [5], т.е. при мощности накачки 5 кВт на частоте 17,5 кГц получена мощность генерации 120 Вт. В гибридном медном лазере с объемом рабочей зоны 19,5 л импульсная энергия составила 12,7 мДж, что соответствует мощности излучения 216 Вт, частоте 17 кГц и вкладываемой мощности более 7 кВт [6]. Дополнительное увеличение энергии генерации возможно за счет снижения ЧСИ ниже 10 кГц. В работе [7] получена энергия импульсов излучения ~7 мДж при мощности 64 Вт за счет уменьшения частоты до 9 кГц. В высокотемпературных лазерах на парах чистой меди с большим объемом активной зоны оптимальная ЧСИ составляет 4–5 кГц. Поэтому в ГРТ длиной 3,5 м, объемом 22,3 л при мощности накачки 50 кВт достигнута энергия порядка 100 мДж [8]. Как видно, такой способ повышения энергетики лазера требует больших затрат на обеспечение высокого энерговыхода в ГРТ.

Таким образом, задача реализации минимальных ЧСИ в CuBr-лазере в режиме «одиночных» импульсов с высокими энергетическими характеристиками остается актуальной. Для ее решения необходимо обеспечить эффективную накачку активной среды лазера. Ранее в [9–14] описывался источник питания лазеров на парах металлов с импульсным зарядом рабочей емкости, способный работать

\* Виктор Анатольевич Димаки (qel@asd.iao.ru); Виктор Борисович Суханов (qel@asd.iao.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@iao.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru).

в режиме цугов, двояных и регулярных импульсов накачки. Эффективный ввод энергии в активную среду лазера осуществлялся за счет ступенчатого заряда рабочей емкости в зависимости от ее величины.

В настоящей работе приведены результаты исследования энергетических характеристик CuBr-лазера с длиной активной зоны 90 и диаметром 5 см, возбуждаемого таким источником.

### Техника эксперимента

Конструкция ГРТ исследуемого CuBr-лазера показана на рис. 1. Объем активной зоны ГРТ 1, выполненной из кварца, составляет 1,8 л (длина 90 см, диаметр 5 см). Рабочий канал ГРТ помещен в тепловую камеру 2. В качестве выходных окон используются кварцевые пластинки 3. Электроды 4 представляют собой кварцевые стаканы, наполненные медной стружкой, ввод в которые производится с помощью импульсных ламп ИФП 2000. ГРТ оснащена тремя контейнерами 5 для рабочего вещества (CuBr), вынесенными из тепловой камеры и размещенными в собственных нагревателях 6. В ГРТ встроен реверсивный генератор HBr 7 [14]. Концентрация галогеноводорода регулируется температурой нагревателя 6. Для предотвращения загрязнения выходных окон используются диафрагмы из пенокварца 4.

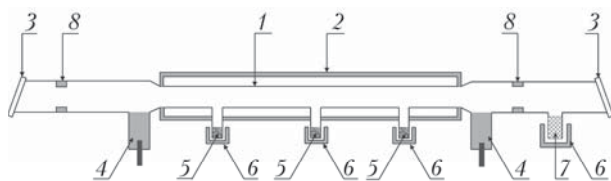


Рис. 1. Конструкция ГРТ CuBr-лазера: 1 – активная зона ГРТ; 2 – тепловая камера; 3 – выходные окна; 4 – электроды; 5 – контейнеры с CuBr; 6 – нагреватели; 7 – генератор HBr; 8 – диафрагмы

Схема накачки исследуемого лазера и ее работа подробно описаны в работе [15]. Стоит отметить, что источник питания лазера осуществлял импульсный заряд рабочей емкости  $C$  с ее последующим прямым разрядом через тиратрон ТГИ 1-1000/25 и газоразрядный промежуток активного элемента. Это создавало благоприятные условия для работы коммутатора. Кроме того, для полного накопления энергии емкости  $C$  с большим номиналом производился ее ступенчатый заряд – в нашей работе 3–11 ступеней для емкостей от 2 до 20,4 нФ. Источник питания обеспечивал энергию накачки до 2,3 Дж на низких ЧСИ (1–2 кГц).

В качестве буферного газа в экспериментах использовался неон. Электрические характеристики разряда измерялись с помощью датчика тока Pearson™ 8450, датчика напряжения Tektronics P6015A и осциллографа LeCroy Wave Jet 324. Импульсы излучения фиксировались приемником ФК-19. Мощность излучения определялась измерителем Orhir 20C-SH.

### Результаты эксперимента

Первые эксперименты по исследованию энергетических характеристик CuBr-лазера проводились с энергией накачки до 0,5 Дж. На рис. 2 видно, что при низких уровнях накачки с увеличением ЧСИ повышается энергия в импульсе. Энерговклад варьировался путем увеличения рабочей емкости от 1,1 до 3 нФ при фиксированном напряжении. Как и предполагалось, добавка HBr оказывает положительное влияние [16].

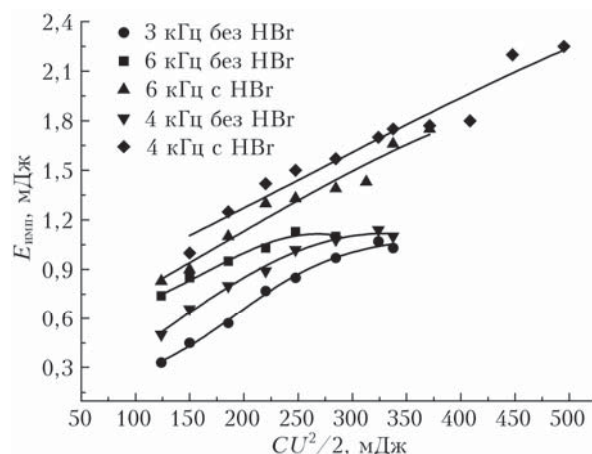


Рис. 2. Зависимость энергии излучения в импульсе CuBr-лазера от энерговклада

Рост энергии в импульсе может происходить за счет как напряжения, так и емкости (рис. 3). При фиксированной емкости 1,1 нФ импульсная энергия растет с увеличением напряжения от 8 до 15 кВ, дальнейший рост наблюдается при изменении емкости от 1,1 до 2,35 нФ.

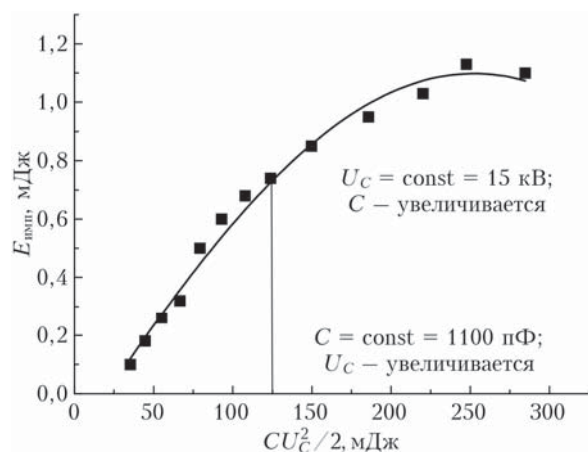


Рис. 3. Поведение импульсной энергии CuBr-лазера, работающего на частоте 6 кГц, при увеличении напряжения и рабочей емкости

Дополнительный рост импульсной энергии генерации возможен при переходе к более низким ЧСИ, поскольку появляется возможность повышения энерговклада за счет увеличения рабочей емкости до 20,4 нФ. На рис. 4 показано, как ведут себя

средняя мощность излучения и энергия генерации в импульсе при изменении ЧСИ (рабочая емкость равна 9 нФ). Оптимальная частота лежит в пределах 1–2 кГц. Заряд рабочей емкости  $C$  осуществлялся за 9 ступеней. Впервые была получена мощность генерации 150 мВт в режиме «одиночных» импульсов на частоте 330 Гц.

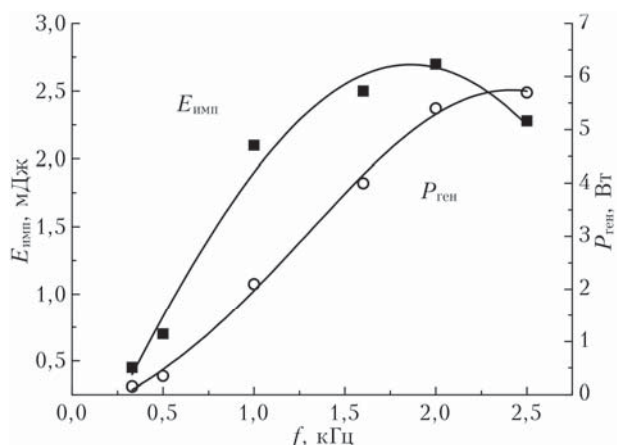


Рис. 4. Зависимость импульсной энергии и средней мощности излучения CuBr-лазера от частоты следования импульсов;  $C = 9$  нФ, напряжение на конденсаторе равно 15 кВ

На рис. 5 видно, как зависит энергия излучения от энерговклада, обеспечиваемого нашим источником накачки на ЧСИ 1 кГц. При емкости больше 6,8 нФ и фиксированном напряжении на ней 15 кВ происходит насыщение выходной энергии. Однако увеличивая напряжение с 15 до 20 кВ, можно достичь линейного роста энергии (напряжение ограничивается источником).

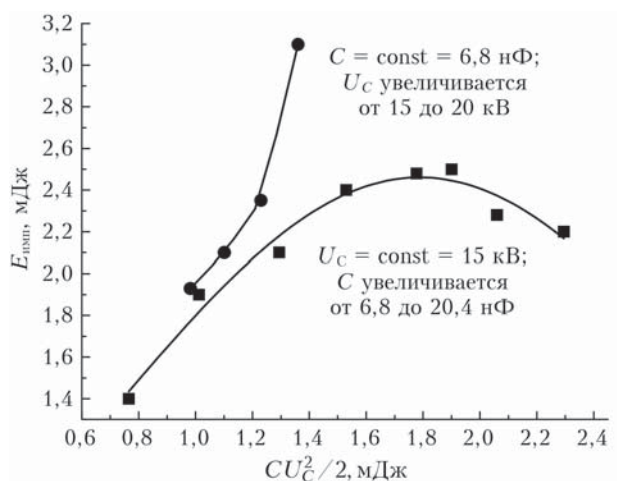


Рис. 5. Зависимость импульсной энергии CuBr-лазера, работающего с частотой 1 кГц, от энерговклада при увеличении рабочей емкости и напряжения на ней

Как отмечалось во введении, достижение высоких импульсных энергий генерации в ЛППГМ требует работы на низких частотах или в режиме сдвоенных импульсов накачки [6, 7]. Это автоматически приводит к снижению КПД лазера. В то же

время максимальную эффективность такие лазеры демонстрируют в диапазоне частот 17–25 кГц [5]. Рис. 6, а демонстрирует такое поведение КПД исследуемого лазера при изменении рабочей частоты от 0,5 до 6 кГц. На графике приведены оптимальные значения КПД для каждой ЧСИ при изменении рабочей емкости и напряжения на ней.

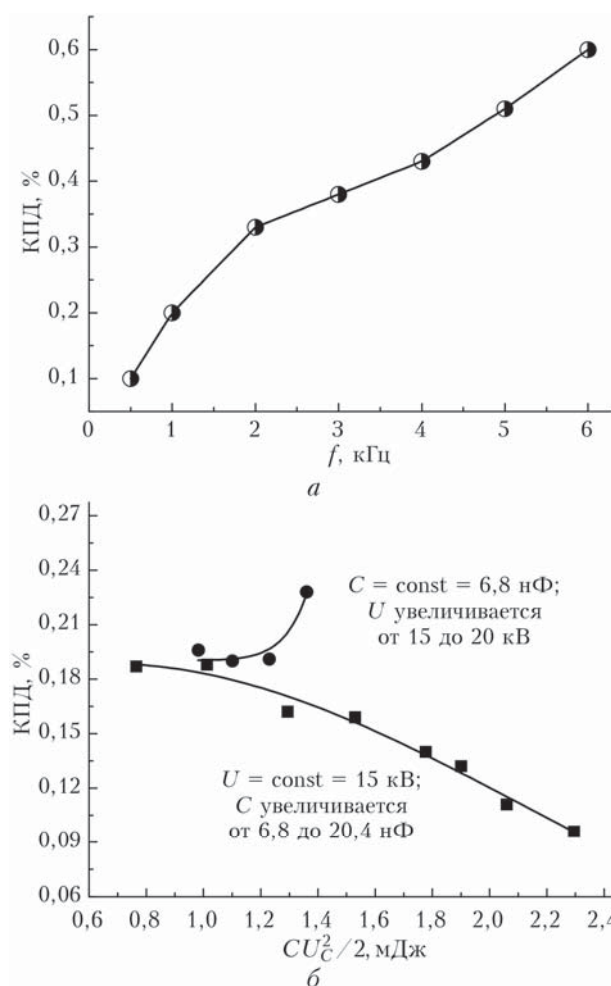


Рис. 6. Зависимость КПД CuBr-лазера от частоты следования импульсов (а) и энерговклада при ЧСИ 1 кГц (б)

В условиях нашего эксперимента, при работе на частоте 1 кГц, максимальный КПД составил 0,23%. На рис. 6, б показана зависимость КПД от энерговклада при увеличении  $C$  и напряжения на ней для случая, представленного на рис. 5.

### Заключение

Исследование энергетических характеристик CuBr-лазера с накачкой источником питания с импульсным зарядом рабочей емкости показало, что ступенчатая зарядка впервые позволила в условиях нашего эксперимента реализовать генерацию CuBr-лазера в режиме «одиночных» импульсов на частоте 330 Гц. Установлено, что высокая энергия генерации (3,1 мДж) в таком режиме реализуется на низкой частоте следования импульсов в единицы

герц, причем энергия импульса зависит от напряжения и величины рабочей емкости. На этих частотах КПД лазера достигает 0,23%. Источник питания обеспечил длительную стабильную работу коммутатора и всей системы в целом.

Работа выполнена в рамках базового бюджетного проекта № 0368-2018-0004 (№ АААА-А17-117021310150-0) и при частичной поддержке РФФИ, проект № 14-19-00175.

1. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester: John Willey & Sons, 1998. 620 p.
2. Батенин В.М., Бохан П.А., Бучанов В.В., Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Карпухин В.Т., Климовский И.И., Маликов М.М. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. В 2 т. Т. 1. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
3. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. 2-е издание. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. 276 с.
4. 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.
5. Astad'jov 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.
6. Le Guyadec E., Coutance P., Bertrand G., Peltier C. A 280-W average power Cu-Ne-HBr laser amplifier // IEEE J. Quantum Electron. 1999. V. 35, N 11. P. 1616–1622.
7. 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.
8. Kimura H., Aoki N., Kobayashi N., Konagai C., Seki E., Abe M., Mori H. Development of high power copper vapor laser system // Proc. SPIE. 2000. V. 3886. P. 550–561.
9. 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. 119–122.
10. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Лазер на парах бромиде меди со стабилизацией температуры стенок активного объема // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2009. Т. 315, № 4. С. 152–155.
11. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование цугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромиде меди // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2009. Т. 314, № 4. С. 111–114.
12. 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.
13. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режимами работы со средней мощностью генерации 20 Вт // Приборы и техн. эксперим. 2012. № 6. С. 95–99.
14. Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Реверсивный источник НВг для лазера на парах бромиде меди // Приборы и техн. эксперим. 2013. № 3. С. 112–115.
15. Троицкий В.О., Димаки В.А., Филонов А.Г. Источник питания для лазера на парах бромиде меди // Приборы и техн. эксперим. 2016. № 3. С. 57–60.
16. Андриенко О.С., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Шиянов Д.В. Экспериментальное исследование влияния добавок НВг на генерационные характеристики CuBr-лазера // Квант. электрон. 2004. Т. 34, № 7. С. 1–5.

*V.A. Dimaki, V.B. Sukhanov, V.O. Troitskii, D.V. Shiyonov. Energy characteristics of a CuBr laser at low pulse repetition rates.*

It is shown that the use of a power supply with a pulsed step charge of the working capacitance for a CuBr laser excitation allows lasing in the single pulse mode with repetition frequencies from 330 Hz. The effective energy input into the laser medium with operating capacitances from 6.8 to 20.4 nF occurs in 5–11 charge stages. An increase in the pulse lasing energy to 3 mJ is facilitated by increases in the working capacitance and charge voltage.