

УДК 535:371.623

Высокий КПД CuBr-лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки

А.И. Федоров¹, Д.В. Шиянов^{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 24.09.2016 г.

Приведены результаты исследований характеристик CuBr-лазера, работающего в режиме сдвоенных импульсов накачки с частотой повторения импульсов генерации 50 Гц. Рассмотрены возможности повышения эффективности лазера за счет оптимизации параметров импульса возбуждения и его согласования с импедансом плазмы активной среды, образуемой диссоциирующим импульсом накачки. Получен КПД лазера 2,56% по импульсу возбуждения со средней мощностью 16 мВт и временной задержкой между импульсами диссоциации и возбуждения 150 мкс. Удельная энергия диссоциирующего импульса составила 22 мДж/см³, возбуждающего – 0,4 мДж/см³. Введение в схему возбуждения дросселя насыщения позволило получить максимальный КПД 2,7%.

Ключевые слова: CuBr-лазер, средняя мощность излучения, режим сдвоенных импульсов накачки, импульс диссоциации, удельная энергия, КПД лазера; CuBr laser, average output power, double-pulsed excitation, dissociation pulse, energy density, laser efficiency.

Лазеры на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) примечательны тем, что способны работать в широком частотном диапазоне от единиц герц до сотен килогерц [1, 2]. На практике при решении конкретных задач с использованием этих лазеров к ним предъявляются определенные требования, в том числе по частоте следования импульсов. При этом требуются не только высокие мощности излучения, но и энергии либо их удельные значения.

В настоящее время самым эффективным из всех ЛПГМ является лазер на парах бромида меди. В CuBr-лазере реализованы максимальные удельные (1,4 Вт/см³) и средние (120 Вт) мощности генерации в газоразрядных трубках (ГРТ) с малым и большим объемом соответственно, а также КПД более 3% [3, 4]. Причем эти параметры получены в импульсно-периодическом режиме на частотах 15–25 кГц. В этом режиме совмещены функции разогрева активной зоны лазера, диссоциации молекул галогенида металла и возбуждения атомов металла. Максимальная энергия 10 мДж и удельная энергия генерации 45 мкДж/см³ реализованы в низкочастотном режиме сдвоенных импульсов накачки 5–100 Гц также в ГРТ с большим и малым объемом [5–7]. Первый импульс является диссоциирующим, а второй возбуждающим, при этом необходим подогрев активной зоны. Однако в этом режиме максимальный КПД ЛПГМ по

возбуждению не превышал 1%. Таким образом, вопрос повышения эффективности лазеров, работающих в режиме сдвоенных импульсов накачки, остается актуальным.

Ранее в работах [8, 9] нами была проведена оптимизация параметров возбуждения CuBr-лазера и получен КПД 1,5% за счет согласования импедансов источника накачки и плазмы активной среды, которое, в свою очередь, осуществлялось с помощью выбора оптимального напряжения возбуждающего импульса и его временной задержки относительно импульса диссоциации.

В настоящей работе проведена дальнейшая оптимизация условий возбуждения активной среды CuBr-лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки с целью повышения КПД за счет модификации схемы накачки и определения оптимальной энергии диссоциирующего импульса для разных напряжений импульса возбуждения.

Техника эксперимента и конструкция ГРТ подробно описана в [8, 9]. В отличие от схемы накачки CuBr-лазера, описанной в указанных работах, для согласования сопротивления источника накачки и ГРТ между емкостью возбуждающего источника C_p и ГРТ вводился дроссель насыщения, собранный на ферритовых кольцах марки М2000Н 60×25×10 мм (рис. 1). Емкость импульса возбуждения равнялась 1 нФ, частота следования между парами импульсов – 50 Гц, а задержка между импульсами диссоциации (t_d) и возбуждения – 150 мкс. В [8, 9] было установлено, что этим параметрам соответствует максимальный КПД

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

лазера. Ко времени проведения эксперимента ГРТ лазера, не являясь отпаянной конструкцией, отработала более 500 ч. В связи с этим был проведен восстановительный цикл рабочей смеси. Давление буферного газа Ne составило 30 торр.

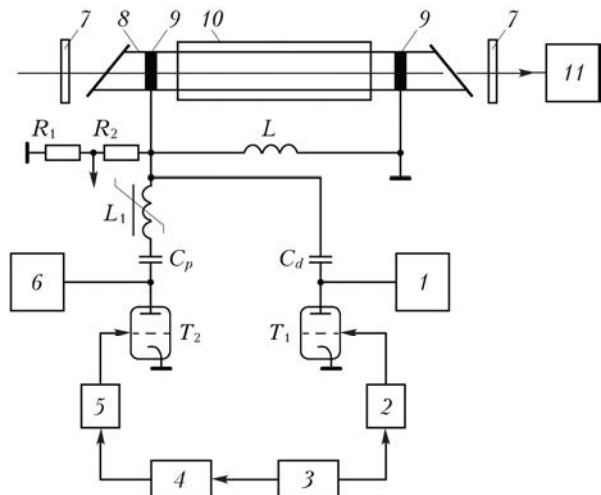


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Источник, собранный на тиратроне T_1 , обеспечивает диссоциацию, источник, собранный на тиратроне T_2 , осуществляет возбуждение; 1, 6 – источник импульсного заряда емкости; 3, 4 – линии задержки; 2, 5 – блоки запуска тиратрона; 7 – зеркала резонатора; 8 – канал ГРТ; 9 – электроды; 10 – нагревательный элемент; 11 – измеритель мощности; C_p – емкость возбуждающего источника; C_d – емкость диссоциирующего источника; R_1, R_2 – делители напряжения; L_1 – дроссель насыщения; L – шунтирующая индуктивность

Энергия диссоциации молекул CuVg определяется емкостью диссоциирующего источника накачки (C_d). На рис. 2 приведены зависимости средней мощности излучения и КПД лазера от величины C_d и напряжения импульса возбуждения для емкости $C_p = 1$ нФ без включения дросселя насыщения. При максимальном напряжении возбуждения 15 кВ средняя мощность излучения резко возрастала с увеличением диссоциирующей емкости C_d до 6,8 нФ и соответствовала 37 мВт, а затем медленно уменьшалась до 35 мВт при $C_d = 11,5$ нФ. Для КПД лазера наблюдалось его медленное нарастание до максимального значения 0,7% с увеличением диссоциирующей емкости до 6,8 нФ, а затем медленный спад; КПД лазера рассчитывался по мощности, запасенной в рабочей емкости C_p , как $CU^2f/2$. Погрешность измерений составила 5%.

Согласованный режим ввода энергии возбуждения осуществлялся при напряжении 5 кВ на плазме активной среды. В этом режиме зависимости средней мощности излучения и КПД лазера сильно отличались от режима максимального напряжения 15 кВ. Средняя мощность излучения нарастала с ростом диссоциирующей емкости от 1,1 до 3,3 нФ, а затем оставалась почти постоянной на уровне 6,5 мВт при увеличении емкости до 9 нФ. Она резко возрастала до 16 мВт при емкости 11,5 нФ. Аналогичная картина наблюдалась для КПД лазера, который был

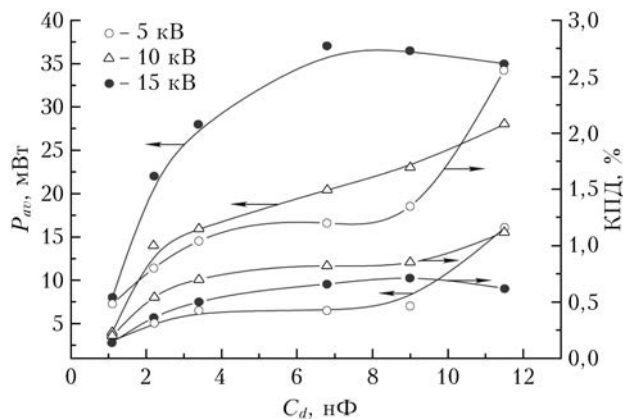


Рис. 2. Зависимости средней мощности излучения и КПД лазера от величины рабочей емкости источника диссоциирующих импульсов накачки и напряжения импульса возбуждения для $C_p = 1$ нФ и $t_d = 150$ мкс

максимальным (2,56%) для емкости 11,5 нФ. Такое поведение говорит о том, что оптимальные условия образования плазмы активной среды наблюдались при удельной энергии диссоциирующего импульса 22 мДж/см³ и возбуждающего импульса 0,4 мДж/см³.

Дальнейшее увеличение КПД до 2,7% стало возможным за счет включения в цепь возбуждения насыщающего дросселя L_1 . При оптимальной индуктивности дросселя 30–40 мкГн улучшалось согласование импедансов плазмы активной среды и источника накачки. При этом оптимальная C_d составила 6,8 нФ, а оптимальные значения C_p и напряжения импульса возбуждения оставались на уровне 1 нФ и 5 кВ соответственно.

Таким образом, максимальный КПД лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки наблюдается при пониженном напряжении импульса возбуждения, что и определяет режим согласованного ввода энергии за счет уменьшения послеимпульсных осцилляций тока, но при этом сопровождается снижением средней мощности излучения. Для ГРТ с объемом активной зоны 31,4 см³ при напряжении возбуждения 5 кВ за счет оптимизации параметров энергии диссоциирующего импульса и модификации схемы возбуждения был достигнут максимальный на сегодняшний день КПД CuVg -лазера со сдвоенными импульсами возбуждения 2,7%.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Молодых Э.И., Климовский И.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
2. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. 2-е изд. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. 276 с.
3. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. A CuBr-laser with 1.4 W/cm³ average output power // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30, N 6. P. 3158–3160.
4. 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.

5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *Федоров А.И., Шиянов Д.В.* Низкочастотный CuBr-лазер // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 9. С. 859–863.
9. *Федоров А.И., Шиянов Д.В.* Особенности получения высокого КПД CuBr-лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 1035–1040.

A.I. Fedorov, D.V. Shiyanov. **High-efficiency double-pulsed CuBr laser.**

Results of research of the CuBr laser operating characteristics working in the double-pulse excitation mode with a pulse repetition rate of 50 Hz are given. The possibilities of increasing the efficiency by optimizing the parameters of the excitation pulse and matching with the impedance of the plasma formed by a dissociating pulse are considered. Laser efficiency of 2.56% at an excitation pulse with average power of 16 mW and time delay between dissociation and excitation pulses of 150 μ s is received. Specific energy of the dissociating pulse reached 22 mJ/cm³; and of the exciting, 0.4 mJ/cm³. Introduction of saturation inductance into the excitation circuit provides for the maximum efficiency of 2.7%.