

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535:371.623

Режим одиночных импульсов генерации CuBr-лазера

Ф.А. Губарев^{1,2}, В.Ф. Федоров¹, К.В. Федоров², Г.С. Евтушенко^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

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

Поступила в редакцию 21.08.2012 г.

Реализован низкочастотный режим генерации CuBr-лазера (50 Гц) с использованием вдвоенных импульсов возбуждения: подготовительного (диссоциирующего) и основного. Главным отличием используемой схемы накачки является применение тиристорного генератора для формирования подготовительных импульсов. Исследована зависимость энергии в импульсе генерации от параметров основного и подготовительного импульсов.

Ключевые слова: лазер на парах металла, CuBr-лазер, низкая частота, вдвоенные импульсы; metal-vapor laser, copper-bromide laser, low frequency, double-discharge excitation.

Введение

Лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов (ЛПМ) находят применение в решении ряда практических задач, таких как микрообработка материалов, импульсное воздействие на среду, передача информации и другие [1–3]. ЛПМ, в частности лазеры на парах бромида меди, позволяют получать высокую энергию в импульсе генерации (единицы мДж), что делает их востребованными в задачах дистанционного зондирования атмосферы.

Типичным режимом работы лазеров на парах металлов является импульсно-периодический режим с частотой следования импульсов (ЧСИ) возбуждения 10–50 кГц. При такой ЧСИ реализуются саморазогревной режим работы высокотемпературных ЛПМ и стационарный режим наработки металла в низкотемпературных лазерах на парах галогенидов металлов (меди) [4]. Для таких частот характерно наличие сильных кумулятивных эффектов в активной среде лазера. При ЧСИ порядка 50–100 Гц этими эффектами можно пренебречь и считать такой режим режимом одиночных импульсов. Для получения генерации в парах бромида меди в режиме одиночных импульсов необходимо, с одной стороны, обеспечить требуемый температурный режим, а с другой стороны – возбудить активную среду вдвоенными импульсами. Первый – для диссоциации (подготовительный), второй – для возбуждения атомов меди (основной).

Режим вдвоенных импульсов являлся первым режимом, в котором была получена генерация в парах галогенидов металлов [5–8]. Причем в первых работах основное внимание уделялось CuI- и CuCl-лазерам, а CuBr-лазер оставался несколько

в стороне. После получения импульсно-периодической генерации в CuBr-лазере [9] практический интерес к режиму вдвоенных импульсов существенно ослаб, и он стал использоваться, главным образом, для изучения временных характеристик активных сред на парах галогенидов металлов [10–12], т.е. их частотных свойств.

Следует отметить, что развитие лазеров на парах галогенидов металлов, в частности CuBr-лазеров, было направлено на получение высоких средних мощностей генерации, кпд, удельных энергоёмкостей, частот следования импульсов [1–3], при этом вопросу получения высокой энергии в импульсе генерации особого внимания не уделялось. Рекордная на сегодня величина энергии в импульсе генерации CuBr-лазера ~7 мДж получена в импульсно-периодическом режиме с ЧСИ 17,5 кГц на фоне средней мощности 120 Вт [13]. В задачах дистанционного зондирования атмосферы такая высокая средняя мощность и ЧСИ не требуются, поэтому практический интерес представляет получение высокой импульсной энергии при относительно низкой ЧСИ (десятки герц – единицы килогерц). При этом использование полупроводниковых коммутирующих элементов взамен водородных тиратронов позволит упростить и удешевить схему накачки.

Техника эксперимента

В работе [10] показано, что при возбуждении вдвоенными импульсами энергия генерации в основном импульсе накачки определяется энергией диссоциирующего импульса и не зависит от напряжения этого импульса, если напряжения достаточно для достижения пробоя разрядного промежутка. Таким образом, требования к параметрам подготовительного диссоциирующего импульса по амплитуде и скорости нарастания напряжения (или тока) существенно снижаются. В результате генератор

* Федор Александрович Губарев (gfadd@mail.ru); Валерий Федорович Федоров (qel@asd.iao.ru); Кирилл Валерьевич Федоров; Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpu.ru).

подготовительных импульсов может быть существенно упрощен.

На рис. 1 представлена схема формирования сдвоенных импульсов возбуждения, в которой первый импульс (диссоциирующий) формируется с использованием тиристора (ТЧ-50), а второй (основной), традиционно, — тиратрона (ТГИ1-1000/25).

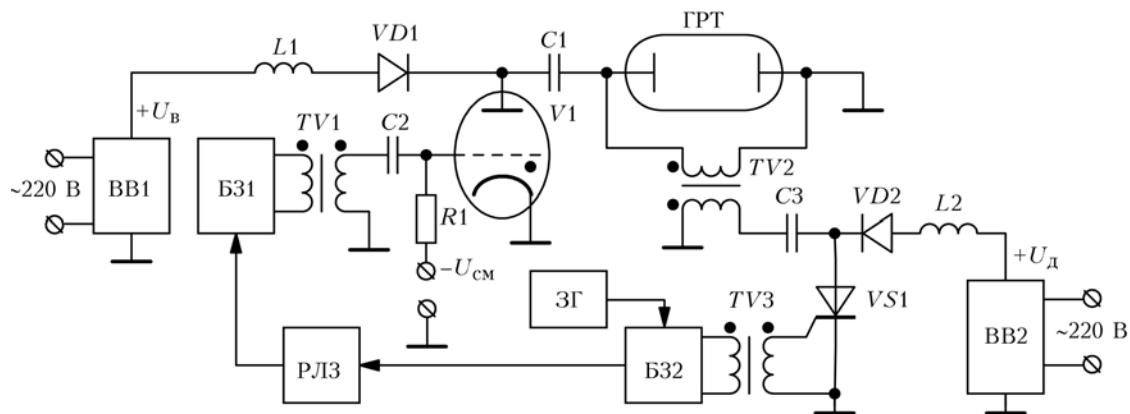


Рис. 1. Схема накачки лазера: ВВ1, ВВ2 — высоковольтные выпрямители; ЗГ — задающий генератор (ЧСИ 50 Гц); РЛЗ — регулируемая линия задержки; Б31 и Б32 — блоки запуска; V1 — тиратрон ТГИ1-1000/25

Данная схема позволяет получать генерацию в парах галогенидов металлов с ЧСИ от 1 Гц до ~ 2 кГц (при более высокой частоте, в силу действия кумулятивных эффектов, генерация может быть получена без дополнительного диссоциирующего импульса). Для представленных в статье результатов частота следования сдвоенных импульсов составляла 50 Гц. Задержка между импульсами в паре варьировалась в диапазоне от 40 до 145 мкс. Напряжения на выходах высоковольтных выпрямителей в экспериментах изменялись в диапазонах: напряжение на выходе ВВ2 U_d от 135 до 200 В, напряжение на выходе ВВ1 U_b от 2,5 до 7 кВ. Исследовались несколько режимов с разной величиной накопительной емкости в цепи формирования основного импульса накачки C1: 0,2; 0,68; 1,1; 2,2; 4,7 и 9,4 нФ.

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов напряжения, тока и генерации для одного из режимов работы: C1 = 4,7 нФ; $U_d = 200$ В, задержка между основным и диссоциирующим импульсами $t_s = 60$ мкс, энергия в импульсе генерации $E_r = 17$ мкДж. Большая амплитуда напряжения подготовительного импульса свидетельствует о высоком предимпульсном сопротивлении плазмы, т.е. о полной релаксации после импульса возбуждения. Энерговклад в разряд начинается с момента пробоя разрядного промежутка, которому на кривой тока соответствует провал (первая микросекунда на кривой 2, рис. 2, б). Как и предполагалось, в подготовительном импульсе не создаются условия для возникновения инверсии и генерация наблюдается только в основном импульсе возбуждения.

В экспериментах использовалась конструкция активного элемента с внешним нагревом, аналогичная применяемой в работах [14–17]. Кварцевая газоразрядная трубка (ГРТ) имела длину рабочего

канала 45 см и внутренний диаметр 1,2 см (активный объем 51 см^3), средняя мощность генерации в установившемся режиме составляла 0,33 Вт при ЧСИ 6 кГц. В этом режиме проводилась калибровка фотоэлемента ФК-22, который использовался для регистрации импульсов генерации. Для записи осциллограмм применялся цифровой осциллограф

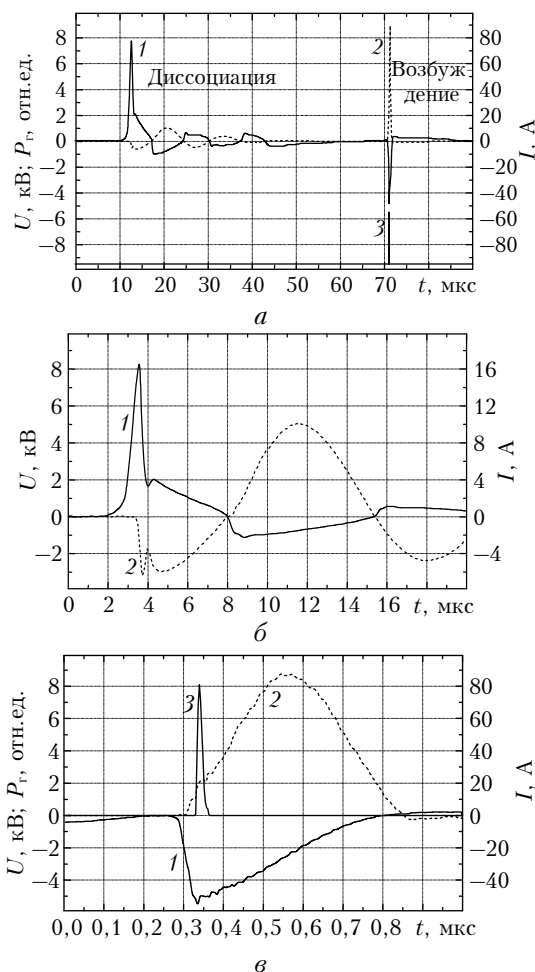


Рис. 2. Импульсы напряжения (1), тока (2) и генерации (3) при разной временной развертке осциллографа: а — диссоциирующий и основной импульсы; б — диссоциирующий; в — основной

LeCroy WJ-324. Регистрация импульсов тока и напряжения производилась с помощью датчика тока Pearson Current Monitors 8450 и пробника напряжения Tektronix P6015A.

Результаты эксперимента

В лазерах на парах галогенидов металлов в импульсно-периодическом режиме работы импульс накачки выполняет три функции: нагрев активной среды, диссоциация молекул галогенида и непосредственно возбуждение. В режиме сдвоенных импульсов функции диссоциации и возбуждения разделены. Соответственно, энергия генерации зависит, с одной стороны, от энерговклада в диссоциирующем импульсе, который обеспечивает концентрацию атомов металла (меди) в основном состоянии, с другой — от эффективности ввода энергии в основном импульсе. Поддержание температуры внешней стенки ГРТ обеспечивается, главным образом, конструкцией активного элемента, однако температурный профиль внутри ГРТ будет зависеть и от энергии, вводимой в импульсах возбуждения. Концентрация паров брома меди также поддерживается независимо от энергии накачки.

Из рис. 2, в можно заметить, что импульс генерации смещен на передний фронт импульса тока, т.е. на возбуждение лазерных уровней расходуется энергия, существенно меньшая запасенной в накопительном конденсаторе $C1$. По осциллограммам тока и напряжения были проведены оценки вводимой в разряд энергии за разные промежутки времени, которая для представленных на рис. 2 осциллограмм составляет: энергия диссоциирующего импульса $E_{\text{вкл.дис}} = 73$ мДж; энергия, вкладываемая в основной импульс накачки, $E_{\text{вкл.2}} = 67$ мДж; энергия, вкладываемая в основном импульсе накачки до окончания генерации, $E_{\text{вкл.1}} = 5$ мДж. На рис. 3 представлены зависимости этих энергетических характеристик от величины накопительной емкости $C1$.

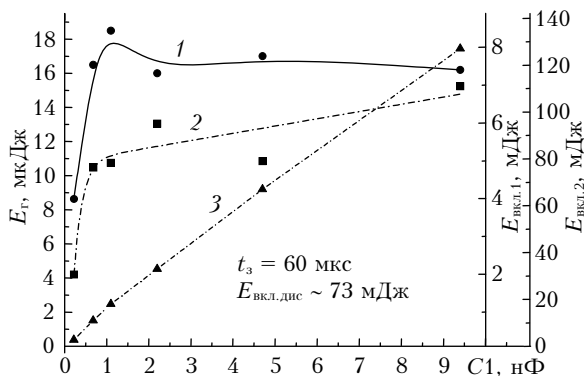


Рис. 3. Зависимости энергетических характеристик лазера от величины накопительной емкости в схеме формирования основного импульса возбуждения: 1 — E_g ; 2 — $E_{\text{вкл.1}}$; 3 — $E_{\text{вкл.2}}$; $U_B = 5$ кВ

Как следует из зависимостей, энерговклад в разряд до окончания генерации, как и энергия генерации, мало зависят от величины накопительной ем-

кости при ее величине, превышающей ~ 600 пФ. Доля энергии, расходуемой на создание инверсии, с увеличением $C1$ с 680 до 9600 пФ уменьшается с 44 до 5%. Таким образом, применение большой накопительной емкости в схеме формирования основного импульса возбуждения на практике не оправданно.

Энергию в импульсе возбуждения, в том числе $E_{\text{вкл.1}}$, можно повысить, увеличив напряжение высоковольтного выпрямителя U_B . На рис. 4 показана зависимость энергии генерации и физического КПД от энергии, вводимой до окончания импульса генерации; КПД рассчитывался как отношение $E_g/E_{\text{вкл.1}}$.

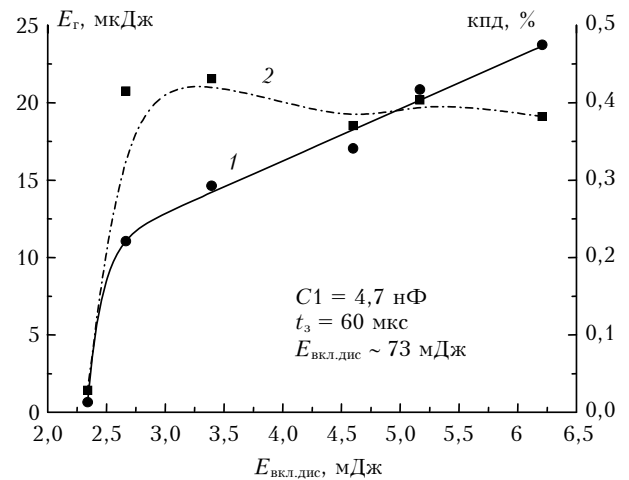


Рис. 4. Зависимости энергии генерации (1) и КПД (2) от энергии возбуждения

При увеличении энерговклада физический КПД генерации находится примерно на одном уровне, при этом энергия генерации растет линейно, начиная с $E_{\text{вкл.1}} = 2,7$ мДж. Из графика $E_g(E_{\text{вкл.1}})$ следует, что максимальная в условиях эксперимента энергия $E_{\text{вкл.1}} = 6,2$ мДж не является оптимальной для данной ГРТ и требует повышения для получения более высокой энергии в импульсе генерации и КПД.

При возбуждении сдвоенными импульсами энергия генерации в основном импульсе накачки определяется энергией диссоциирующего импульса. Этой энергии должно хватать для формирования концентрации атомов меди в основном состоянии $N_{0\text{Cu}} \sim 10^{15}$ см⁻³. Согласно оценкам, сделанным в работе [18], эта энергия должна превышать $\sim 8 \cdot 10^{-4}$ Дж/см³ (полагая, что основную массу молекул составляют молекулы Cu_3Vr_3). Таким образом, для используемой в настоящих экспериментах ГРТ минимальный энерговклад в диссоциирующем импульсе должен составлять ~ 40 мДж.

На рис. 5 показана зависимость энергии генерации от энергии, вкладываемой в разряд в подготовительном импульсе.

При $E_{\text{вкл.дис}} = 43$ мДж энергия генерации ~ 0 , при большей $E_{\text{вкл.дис}}$ наблюдается рост энергии генерации, причем рост тем быстрее, чем выше $E_{\text{вкл.дис}}$. Таким образом, в настоящих экспериментах не удалось достичь экстремального значения $E_{\text{вкл.дис}}$

и можно сделать вывод, аналогичный выводу, сделанному в случае с энергией возбуждения: для повышения энергии генерации требуется увеличение энергии, вводимой в разряд в диссоциирующем импульсе.

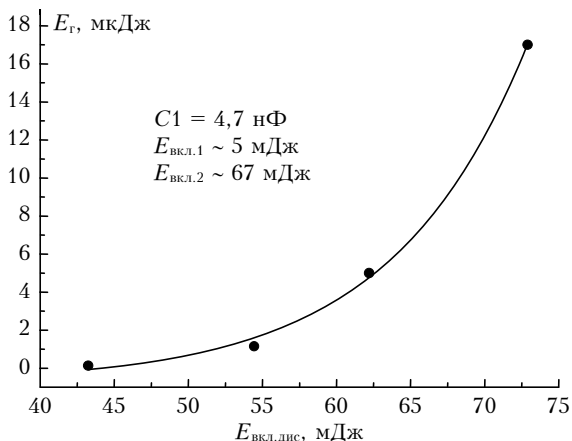


Рис. 5. Зависимости энергии генерации от энергии диссоциирующего импульса

Важным параметром при работе в режиме двояных импульсов является задержка между диссоциирующим и основным импульсами накачки. С одной стороны, задержка должна быть достаточно большой, чтобы успела произойти релаксация метастабильных уровней, заселенных в течение диссоциирующего импульса, особенно если он сопровождается несколькими периодами колебаний (см. рис. 2). С другой стороны, она должна быть достаточно маленькой, чтобы к концу межимпульсного периода в разряде оставалась достаточная для эффективной генерации концентрация атомов меди, образовавшихся в результате диссоциации. На рис. 6 приведена зависимость энергии генерации от задержки t_3 между основным и диссоциирующим импульсами.

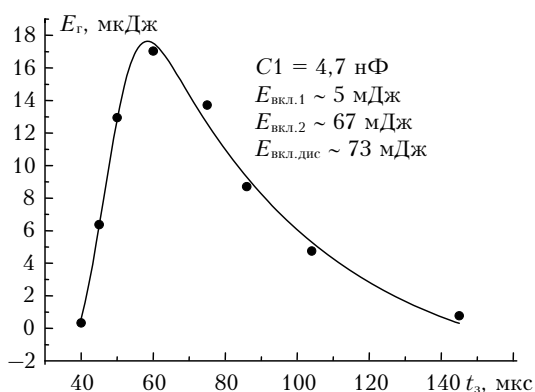


Рис. 6. Зависимости энергии в импульсе генерации от задержки между основным и диссоциирующим импульсами

В условиях эксперимента оптимальная задержка составляет 60 мкс. При задержке 145 мкс энергия генерации падает практически до нуля, что хорошо согласуется с результатами работы [19].

Заключение

В настоящей статье рассмотрен вариант реализации режима одиночных импульсов в лазере на парах бромида меди. Основной особенностью схемы накачки является применение тиристорного блока формирования подготовительных импульсов, что дает возможность исключить из схемы дорогостоящий газоразрядный прибор (тиратрон).

Исследованы зависимости энергии генерации от параметров основного и подготовительного диссоциирующего импульсов. Наблюдается рост энергии в импульсе генерации при увеличении как энергии подготовительного импульса (до 73 мДж), так и энерговклада в основном импульсе возбуждения до окончания генерации (до 7 мДж). То есть насыщения характеристик в ходе проведенных экспериментов достигнуто не было. Максимальная энергия в импульсе генерации составила 24 мкДж. Для дальнейшего увеличения энергии генерации необходимо повышение энергии, идущей на возбуждение лазерных уровней в основном импульсе накачки, и энергии в импульсе диссоциации.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, грант № МК-4438.2012.8, и РФФИ, грант № 12-02-31811.

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
2. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 276 с.
3. Бохан П.А., Евтушенко Г.С., Солдатов А.Н. Лазеры на парах металлов в Институте оптики атмосферы СО РАН. Физика, техника, применения. К 50-летию запуска первого лазера // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 860–864.
4. Батенин В.М., Бохан П.А., Бучанов В.В., Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Карпунин В.Т., Климовский И.И., Маликов М.М. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. В 2 т. Т. 2 / Под ред. В.М. Батенина. М.: Физматлит, 2011. 616 с.
5. Liu C.S., Sucov E.W., Weaver L.A. Copper serradiant emission from pulsed discharges in copper iodide vapor // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23, N 2. P. 92–93.
6. Chen C.J., Nerheim N.M., Russel G.R. Double discharge copper vapor laser with copper chloride as a lasant // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23, N 9. P. 514–515.
7. Chen C.J. Manganese laser using manganese chloride as a lasant // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 24, N 10. P. 499–500.
8. Chen C.J. Lead laser using lead chloride as a lasant // J. Appl. Phys. 1974. V. 45, N 10. P. 4663–4664.
9. Сабитов Н.В., Калчев С.Д., Телбизов П.К. Лазер на парах меди с высокой частотой повторения // Квант. электрон. 1975. Т. 2, № 8. С. 1833–1834.
10. Nerheim N.M. A parametric study of the copper chloride laser // J. Appl. Phys. 1977. V. 48, N 3. P. 1186–1190.
11. Nerheim N.M. Measurement of copper ground-state and metastable level population densities in a copper-chloride laser // J. Appl. Phys. 1977. V. 48, N 8. P. 3244–3250.

12. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Федоров В.Ф. Частотные характеристики CuBr-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 3. С. 254–257.
13. 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.
14. Способ возбуждения лазеров на парах галогенидов металлов и активный элемент лазера на парах галогенидов металлов: Пат. РФ № 2363080. Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Федоров В.Ф. Опубл. БИПМ № 21 27.07.2009. Приоритет от 08.10.2007.
15. Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромида меди с пониженным энерговыделением в разряд // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 85–93.
16. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филоненков А.Г. Экспериментальное исследование цугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромида меди // Изв. Том. политехн. ун-та. 2009. Т. 314, № 4. С. 111–114.
17. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Федоров К.В., Евтушенко Г.С. Управление энергией генерации CuBr-лазера // Изв. Том. политехн. ун-та. 2012. Т. 320, № 4. С. 106–110.
18. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В. CuBr-лазер с пониженным энерговыделением в разряд // Квант. электрон. 2000. Т. 30, № 5. С. 406–408.
19. 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. Физ. 2011. Т. 201, № 2. С. 81–84.

F.A. Gubarev, V.F. Fedorov, K.V. Fedorov, G.S. Evtushenko. Single-pulse lasing mode of CuBr laser.

Low frequency lasing mode of CuBr laser operation (50 Hz) is made, using double-discharge excitation. Dissociating and main pumping pulses are applied to the active medium. The main feature of the utilized excitation circuit is application of thyristor-based pulser for dissociating pulse forming. Dependences of lasing energy on the dissociative and pumping pulse parameters are studied.