

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_2_10

УДК 535.14, 535.21, 535.23

ГРНТИ 29.33.03, 29.33.15

ВАК 01.04.05, 01.04.21

«Монобарьерный» режим работы лазера на парах бромида меди

Филонов А. Г., * Шиянов Д. В.

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

e-mail: qel@iao.ru, * shiyanov73@mail.ru

Рассмотрена работа двухсекционной ГРТ лазера на парах бромида меди с электрически развязанными секциями. Впервые экспериментально показано влияние приэлектродной области (как барьера при прохождении разряда) на энергетические характеристики лазера. В силу конструктивных особенностей секционной газоразрядной трубки лазера носители зарядов одной секции попадают в приэлектродную область другой, снижая её пробойное напряжение, переводя тем самым работу лазера в «монобарьерный» режим. Выявлено увеличение энергетических характеристик лазера в 1,3 раза.

Ключевые слова: бромид меди, разряд, импульс генерации.

Введение

Лазеры на парах металлов (ЛПМ) и их галогенидов относятся к классу газоразрядных источников излучения. Наличие оптически прозрачной активной среды с высоким коэффициентом усиления, узкой линии усиления, малой дифракционной расходимости и импульсно-периодического режима работы определяют их основные области применения. Они используются в активных оптических системах – лазерных мониторах, в бистатических схемах оптической связи, в медицине, при микрообработке материалов, зондировании атмосферы и т. д. [1–7].

Несмотря на долгую историю развития ЛПМ в настоящее время остается актуальным вопрос повышения КПД и энергии излучения этих лазеров. Это позволило бы расширить области их применения. Для решения этой задачи совершенствуются источники питания, конструкции газоразрядных трубок (ГРТ), исследуются процессы, проходящие в активной среде лазеров, в том числе при введении активных примесей [8, 9].

Важным моментом в создании инверсной населенности среды является процесс формирования напряжения на газоразрядном промежутке. В работе [10] отмечается, что активная среда с рабочим веществом обладает малым сопротивлением, что препятствует формированию высокого напряжения. Соответственно полагается, что существенный вклад в этот процесс вносят приэлектродные области, располагаемые, как правило, в «холодных зонах», где значительно меньше паров металла. То есть, пробой затруднен, а это даёт возможность на начальной стадии развития разряда сформировать на газоразрядном промежутке высокое напряжение. Это подтверждается наличием

температурной неоднородности вдоль разрядного канала [11, 12]. Действительно, более высокое сопротивление для прохождения разряда в этих областях обуславливает более высокое энерговыделение. В работах [13, 14] так же указывается на особую роль приэлектродных областей, связанных с заселением резонансных и метастабильных состояний на фронте импульса возбуждения. В этой связи необходимо отметить, что в работе [15] экспериментально наблюдались пробои в прианодной и прикатодной областях. При этом пробои могли происходить как одновременно, так и поочередно в зависимости от условий эксперимента.

Вместе с тем наличие двух пространственно разнесённых областей пробоя (двух барьеров) может нести в себе некоторые отрицательные моменты. Во-первых, напряжение на рабочем промежутке в таком случае не достигает максимально возможного значения. Поскольку нам важно напряжение, приложенное непосредственно к среде, заполненной парами металла, то падение напряжения на одной из приэлектродных областей, снижает его. Во-вторых, пробой одного промежутка с малым пробойным напряжением подогревает электроны, которые в свою очередь могут заселять метастабильный уровень, что отрицательно влияет на характеристики лазера. В-третьих, в местах пробоя выделяется повышенная энергия, а поскольку их два, то потери на одном из них, возможно, излишни. Поэтому если убрать один из барьеров, то это должно привести к росту КПД работы лазера.

Уменьшение пробойного напряжения одного из барьеров переводит работу лазера в «монобарьерный» режим и позволяет более подробно изучить процессы, проходящие в активной среде ЛПМ и их галогенидов [16–18]. Установлению степени влияния указанных факторов на примере работы двухсекционного лазера на парах бромида меди посвящена данная статья.

Техника эксперимента

Для решения поставленной задачи была собрана экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Конструкция ГРТ описана в работах [18, 19]. Длина каждой секции ГРТ составляет 75 см, диаметр рабочего канала – 4 см. Особенностью данной экспериментальной установки является наличие внешнего нагрева рабочей зоны ГРТ. Термостат позволяет стабилизировать изменение температуры стенки ГРТ и компенсировать ее отклонение от заданной при изменении параметров накачки и, соответственно, выделяемой в разряде энергии. Т. е. изменение параметров генерации будет в первую очередь зависеть от параметров импульса накачки, а не от температуры активной среды. Для измерения средней мощности излучения использовался измеритель Ophir 20C-SH. С помощью фотоприёмника ФЭК-19 и осциллографа Tektronix TDS 3032 измерялись форма импульса генерации, а также его амплитуда. Кроме этого, на осциллограф подавались сигналы с делителей напряжения и пояса Роговского, что позволяло измерять как импульсы напряжения на секциях, так и импульсы тока через ГРТ.

Работа лазера осуществлялась следующим образом. Два тиратрона Т1 и Т2 через посредство импульсных трансформаторов формируют напряжение на секциях ГРТ. Импульсные трансформаторы Тр1 и Тр2 используются в цепи для развязки тиратронов, что позволяет осуществлять независимый друг от друга разряд в секциях. То есть, изменение временного положения разряда правой секции не влияет на характеристики разряда левой секции. Для изменения временного положения импульсного разряда одной секции относительно другой применены линии задержки в цепи запуска тиратрона. При этом линии задержки подбирались таким образом, что разряд в левой секции может

проходить как до прохождения разряда в правой секции, одновременно с ней, так и после прохождения разряда в правой секции.

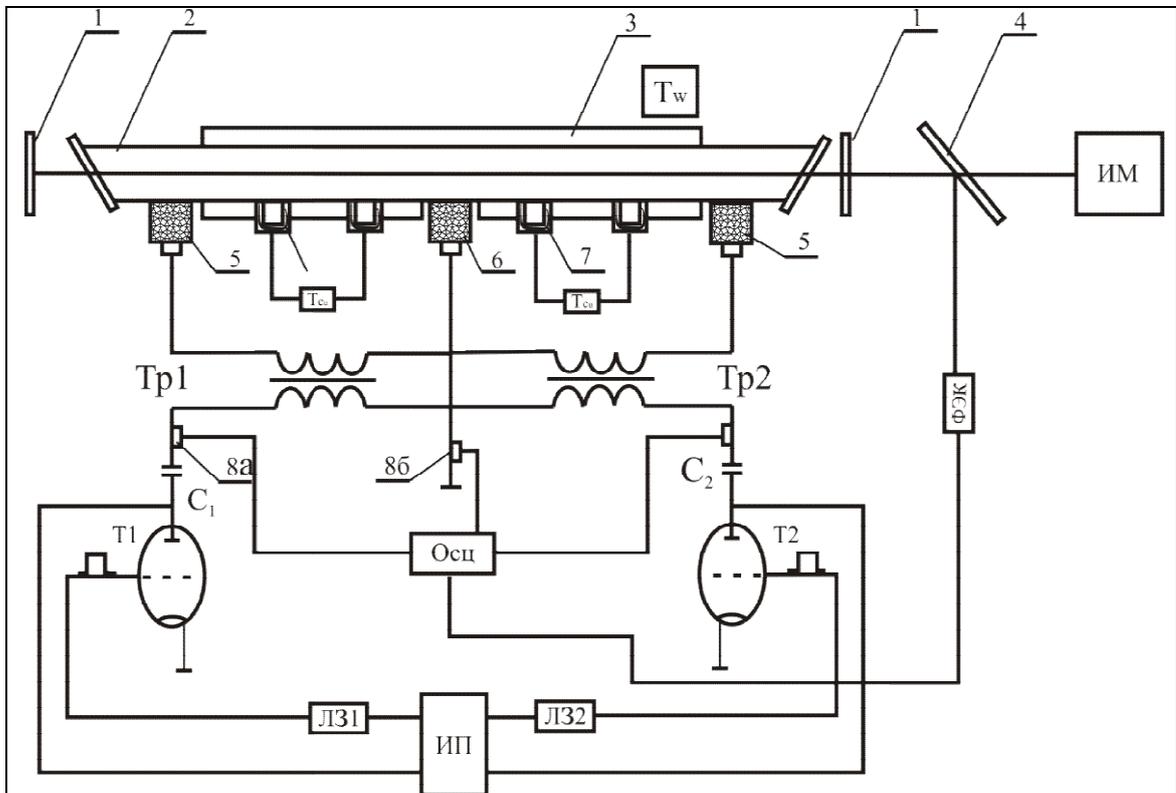


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – резонатор; 2 – ГРТ; 3 – термостат; 4 – светоделительная пластинка; 5 – электроды ГРТ; 6 – дополнительный центральный электрод; 7 – контейнеры с бромидом меди и нагревательными элементами; 8а – делитель напряжения, 8б – пояс Роговского; T_{Cu} – регулятор нагрева бромида меди; Т1 и Т2 – тиратроны ТГИ1-1000/25; C_1 и C_2 – рабочие ёмкости; T_w – регулятор нагрева термостата; ИП – высоковольтный источник; ИМ – измеритель мощности Ophir 20C-SH; ФЭК – фотоприёмник ФЭК-19; Осц – осциллограф Tektronix TDS 3032; ЛЗ1 и ЛЗ2 – линии задержки запуска тиратронов; Тр1 и Тр2 – импульсные кабельные трансформаторы

После включения разряда в секциях ГРТ и достижения рабочей температуры включались нагревательные элементы контейнеров с бромидом меди правой секции. В рабочем объёме появлялись пары бромида меди, и возникла генерация. В установившемся режиме с помощью линии задержки изменялось время прохождения разряда в левой секции и регистрировалось изменение мощности и формы импульса генерации в правой секции.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Особенность секционированной ГРТ лазера на парах бромида меди заключается в том, что средний электрод разделяет общий объём на две секции. При независимом прохождении разряда в каждой секции, возникающий разряд в одной секции создаёт в приэлектродной области второго разряда (электрод общий) носители заряда, которые производят ионизацию приэлектродной области. Это если не убирает барьер, то его существенно

снижает. Соответственно, мы можем оценить степень влияния барьера на параметры генерации. В этом случае полагаем, что лазер работает в «монобарьерном» режиме.

Несмотря на то, что секционирование ГРТ приводит к снижению индуктивности разрядного контура, её работа носит более сложный характер по сравнению с двухэлектродными трубками. Например, появляется довольно сложная зависимость мощности выходного излучения от задержки между проходящими разрядами в секциях. Об этом свидетельствуют результаты работы [19]. В зависимости от величины задержки между разрядами существуют области поглощения излучения и области усиления излучения. Физика процессов в активной среде такова, что при определенной задержке разрядов между секциями, генерация может полностью исчезать. Однако если величина задержки между разрядами более ~ 1 мкс, генерация полностью восстанавливается [20, 21]. Вместе с тем особенностью работы лазера на парах бромида меди является то, что генерация в секциях осуществляется только в том случае, если мы подаём в разрядный объём пары бромида меди из контейнеров путём их нагрева. Соответственно, используя этот механизм, мы можем получать генерацию только в одной секции при отсутствии генерации во второй, оставляя в ней разряд. При этом прохождение излучения от секции с генерацией ничем не ограничено.

Необходимо отметить, что изменение мощности излучения CuVg – лазера, как правило, происходит за счёт изменения амплитуды импульса генерации, поскольку длительность импульса не изменяется, или меняется незначительно. В силу этого в данном конкретном случае по изменению амплитуды импульса генерации (средней мощности излучения) при прочих фиксированных параметрах мы можем судить об эффективности работы лазера.

Выяснение эффективности влияния наличия одного из барьеров на работу лазера производилось следующим образом. Включался разряд в обеих секциях и после установления температурного режима ГРТ в левую секцию подавались пары рабочего вещества (бромида меди) путём нагрева контейнеров с CuVg этой секции. Мощность генерации после прохождения переходных процессов устанавливалась на определённом уровне и фиксировалась измерителем мощности. При этом на осциллографе регистрировалась форма импульса генерации, в том числе и его амплитуда. Линии задержки обеспечивали прохождение токового импульса правой секции в моменты времени до, во время и после прохождения импульса разряда в левой секции. При этом отмечалось изменение параметров генерации левой секции ГРТ. Первоначально разряд в правой секции проходил после прохождения разряда в левой секции и, соответственно, не влиял на параметры разряда в левой секции.

На рис. 2а показана форма импульса генерации, соответствующая мощности 0,4 Вт, для случая, когда разряд в правой секции проходил после прохождения разряда в левой секции. Совмещение разрядов секций приводит к некоторому увеличению амплитуды импульса генерации (рис. 2б). При этом мощность излучения составила 0,52 Вт. Предполагается, что данное увеличение происходит из-за того, что часть носителей заряда проникает в барьерную область левой секции и снижает её пробойное напряжение, и тем самым переводится работа ГРТ в «монобарьерный» режим. Неоднократные измерения показали, что идёт увеличение средней мощности генерации в 1,3 раза.

Для исключения влияния изменения электрических параметров при совмещении разрядов правая секция была заменена на дополнительную ГРТ, по геометрии соответствующую этой секции. В этом случае объёмы разрядов разнесены и, соответственно, носители заряда одного объёма не попадают во второй и не влияют на пробойное напряжение в приэлектродной области. На рис. 3а,б показано, что импульсы генерации практически не изменяются, т. е. прохождение разряда в дополнительной ГРТ не влияет на форму импульса генерации и среднюю мощность излучения.

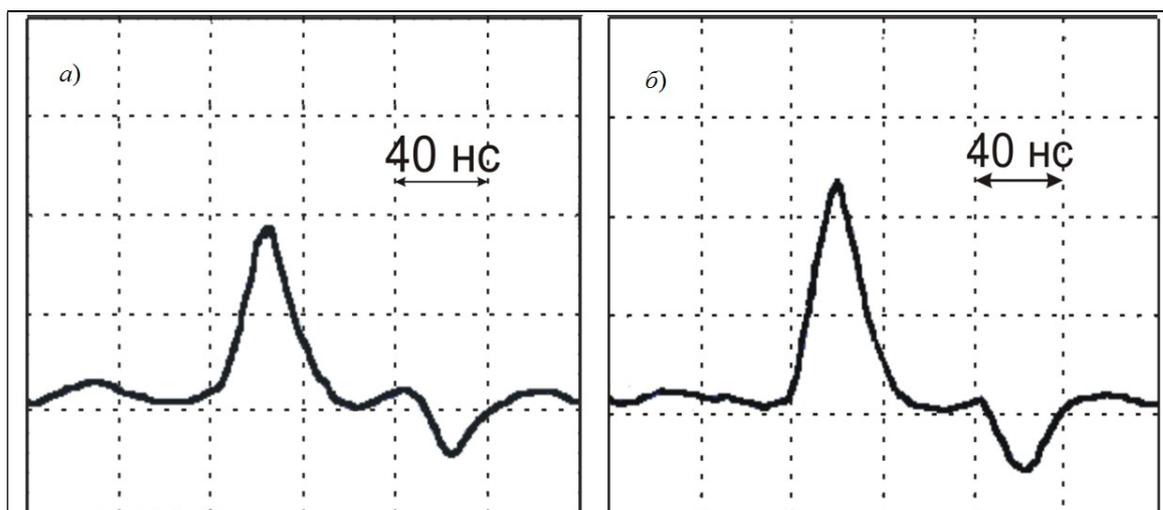


Рис. 2. Форма импульса генерации: *а* – разряд в правой секции проходит после прохождения разряда в левой секции; *б* – разряд в обеих секциях проходит одновременно

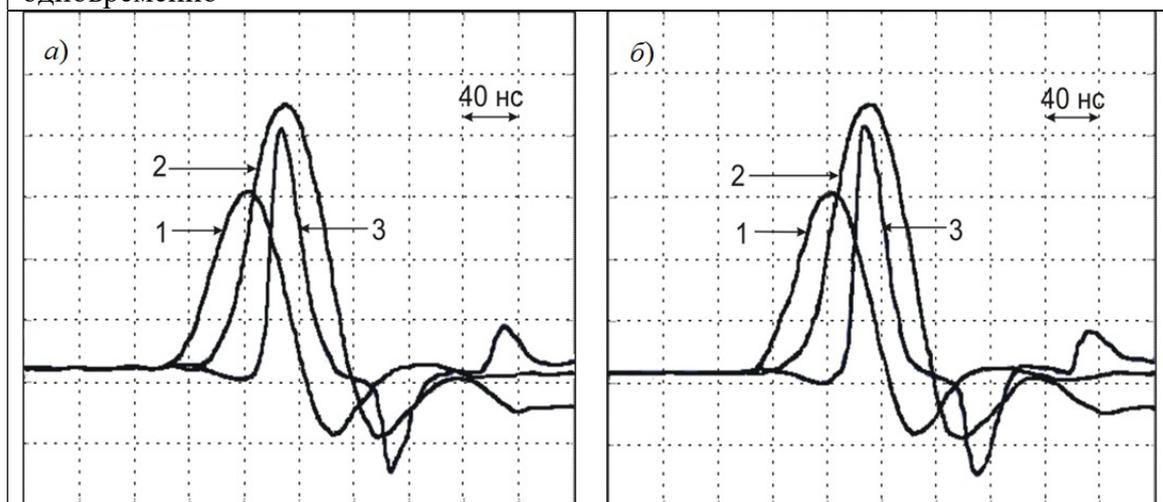


Рис. 3. Форма импульса генерации: *а* – разряд в дополнительной ГРТ проходит после прохождения разряда в левой секции; *б* – разряд в дополнительной ГРТ и левой секции проходит одновременно. 1 – импульс напряжения, 2 – импульс тока, 3 – импульс генерации

Сравнивая результаты этих двух экспериментов, можно утверждать, что наличие двух зон с отсутствием паров металла (прианодная и прикатодная области), формирующих два барьера, пробой которых обеспечивает возбуждение лазерной среды, может приводить к снижению эффективности работы лазера. Внесение носителей заряда в область одного из барьеров, очевидно, снижает пробойное напряжение в этой зоне. В таком случае инверсия осуществляется практически за счет пробоя в области одного барьера. Мы полагаем, что при этом осуществляется «монобарьерный» режим, что приводит к увеличению эффективности работы лазера.

Заключение

Вопросы формирования напряжения на разрядном промежутке лазеров на самоограничивающихся переходах, а также прохождение импульса тока с формированием

инверсии населённости крайне интересны и этому посвящено множество работ. В данной работе рассмотрено влияние одной из приэлектродных областей на характеристики излучения лазера на парах бромида меди. Показано, что перевод работы лазера в «монобарьерный» режим приводит к увеличению мощности генерации в 1,3 раза.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Батенин В. М., Бучанов В. В., Казарян М. А., Молодых Э. И., Климовский И. И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. Москва: Научная книга, 1998. 544 с.
2. Little C. E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester (UK): John Wiley & Sons Ltd., 1998. 620 p.
3. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазеры на парах меди. Москва: Физматлит, 2005. 312 с.
4. Евтушенко Г. С., Казарян М. А., Торгаев С. Н., Тригуб М. В., Шиянов Д. В. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов. Томск. Изд-во «СТТ» 2016, Сер. Излучение. Пучки. Плазма. Выпуск 1. 245 с.
5. Ключарева С. В., Никонова С. М., Пономарев И. В. Лечение лазерами доброкачественных пигментных новообразований кожи // Экспериментальная и клиническая дерматокосметология. 2006. № 3. С. 22–32.
6. Белов В. В., Тарасенков М. В., Абрамочкин В. Н., Иванов В. В., Федосов А. В., Гриднев Ю. В. [и др.] Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием Ч. 2. Полевые эксперименты 2013 г. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 8. С. 659–664.
7. Солдатов А. Н., Васильева А. В., Мирза С. Ю., Полуниин Ю. П., Романовский О. А., Шумейко А. С., Костадинов И. К. Мультимедийный лазерный излучатель на парах металлов для решения задач атмосферной оптики // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 842–845.
8. Бохан П. А., Силантьев В. И., Соломонов В. И. О механизме ограничения частоты следования импульсов генерации в лазере на парах меди // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 6. С. 1264–1269.
9. Шиянов Д. В., Евтушенко Г. С., Суханов В. Б. Влияние состава газовой смеси и условий накачки на характеристики CuBr-Ne-H₂(HBr)-лазера // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 1. С. 49–52.
10. Земсков К. И., Исаев А. А., Петраш Г. Г. Развитие разряда в импульсных лазерах на парах металлов // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 2. С. 183–188.
11. Евтушенко Г. С., Филонов А. Г. Температурный режим работы лазера на парах металлов // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 11. С. 1318–1322.
12. Солдатов А. Н., Ермолаев А. П., Кирилов А. Е., Филонов А. Г., Филонова Н. А. Температурный режим работы лазера на бромиде меди // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 8. С. 775–778.

13. Юдин Н. А., Третьякова М. Р., Юдин Н. Н. Влияние электрофизических процессов в разрядном контуре на энергетические характеристики лазера на парах меди // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9. С. 93–102.
14. Юдин Н. А., Юдин Н. Н. Эффективность накачки активной среды лазеров на парах металлов: газоразрядные трубки с электродами в горячей зоне разрядного канала // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 6. С. 49–56.
15. Губарев Ф. А., Тригуб М. В., Евтушенко Г. С., Федоров К. В. Влияние индуктивности разрядного контура на энергетические характеристики CuBr-лазера // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 7. С. 604–608.
16. Vuchkov N. K., Sabotinov N. V. Two-arm CuBr laser with central electrode // IEEE J. Quantum Electron. 1997. V. 33. N 4. P. 541–543.
17. Суханов В. Б., Евтушенко Г. С., Шиянов Д. В., Чернышев А. И. Саморазогревный CuBr-лазер // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 1053–1055.
18. Филонов А. Г., Шиянов Д. В. Двухсекционный лазер на парах бромида меди // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 01. С. 94–97.
19. Филонов А. Г. Исследование работы двухсекционного лазера на парах бромида меди // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 1. С. 82–86.
20. Бохан П. А. Закревский Д. Э. О предельных частотах следования импульсов генерации в лазерах на парах меди // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 5. С. 54–60.
21. Бохан П. А., Закревский Д. Э., Лаврухин М. А., Лябин Н. А., Чурсин А. Д. Возбуждение и релаксация метастабильных состояний атомов в активной среде импульсно-периодического лазера на парах меди // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 2. С. 100–105.

«Monobarrier» operation of a copper bromide vapor laser

Filonov A. G., Shiyanov D. V.

*V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB Russian Academy of Sciences
 634055, Russia, Tomsk, Academician Zuev square 1*

The operation of a two-section GDT copper bromide vapor laser with electrically decoupled sections is considered. For the first time, the effect of the near-electrode region (as a barrier during the passage of a discharge) on the laser energy characteristics is shown experimentally. Due to the design features of a sectional GDT, charge carriers of one section enter the near-electrode region of the other, reducing its breakdown voltage, thereby transferring the laser operation to a «mono-barrier» mode. An increase in the laser energy characteristics by a factor of 1,3 was revealed.

Key words: laser, copper bromide, discharge, generation pulse.