

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535:371.623

**Влияние индуктивности разрядного контура
на энергетические характеристики CuBr-лазера**

Ф.А. Губарев^{1,2}, М.В. Тригуб^{1,2}, Г.С. Евтушенко², К.В. Федоров^{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 15.03.2013 г.

Исследуется зависимость энергетических характеристик CuBr-лазера среднего активного объема с добавкой и без добавки HBr от скорости нарастания разрядного тока, изменение которой осуществляется включением в разрядный контур дополнительной индуктивности. Показано, что при увеличении индуктивности до 4 мкГн средняя мощность генерации CuBr-лазера уменьшается в 10 раз. При аналогичных условиях средняя мощность генерации CuBr-лазера с добавкой HBr уменьшается менее чем в 2 раза. В меньшей степени меняется и доля излучения на желтой линии генерации. Таким образом, наличие электроотрицательной добавки в активной среде CuBr-лазера позволяет снизить требования к импульсному источнику накачки.

Ключевые слова: лазер на парах металла, CuBr-лазер, скорость нарастания тока, разрядный контур, эффективность; metal-vapor laser, copper-bromide laser, current rise rate, discharge circuit, efficiency.

Введение

Эффективность генерации и энергосъем в лазерах на парах металлов существенно зависят от скорости ввода энергии в разряд, т.е. от крутизны импульса накачки [1–5]. Традиционно под импульсом накачки понимается импульс тока. Таким образом, скорость нарастания тока разряда dI/dt является важным параметром, определяющим выходные характеристики лазеров на парах металлов.

Скорость нарастания тока через газоразрядную трубку (ГРТ) ограничена, с одной стороны, скоростью нарастания тока коммутатора, с другой – индуктивностью разрядного контура (суммарной индуктивностью ГРТ и подводных проводов). В работе [2], вероятно, первой работе, в которой в разрядный контур намеренно включалась переменная индуктивность, показано влияние индуктивности разрядного контура на мощность излучения лазера на парах свинца. При увеличении индуктивности примерно с 0,8 до 3,3 мкГн средняя мощность генерации уменьшилась с 6 до 1,2 мВт.

В работах [3–5] для лазера на парах меди показано, что уменьшение индуктивности разрядного контура сопровождается ростом удельного энергосъема и кпд. В частности, в работе [3] энергосъем и кпд возрастают пропорционально величине $L^{-1/2}$ (L – индуктивность разрядного контура), имея наи-

большой рост при $L < 150$ нГн. В результате оптимизации параметров разрядной ячейки авторами достигнут кпд 3% (относительно энергии, запасенной в накопительном конденсаторе), который до настоящего времени является рекордным для лазера на парах чистых металлов [4].

Следует отметить, что в работах [3–5] использовалась коаксиальная конструкция ГРТ, в которой электроды внесены в горячую область. Часто на практике электроды располагаются в холодных буферных зонах, проводимость которых существенно отличается от проводимости среды, содержащей пары металла. Тем самым в разрядный контур добавляются дополнительные реактивные составляющие. После включения коммутатора происходит заряд реактивных составляющих разрядного контура, включая емкости, сформированные холодными зонами до пробоя промежутков «анод–активная среда» и «катод–активная среда» [6–8]. В результате вынос электродов в холодную буферную зону дает обострение импульса возбуждения. Это должно приводить к снижению требований к импульсной схеме накачки, основу которой составляет высоковольтный коммутатор, по скорости нарастания разрядного тока.

В современных лазерах на парах металлов для повышения частотно-энергетических характеристик применяются водородсодержащие примеси, которые существенно влияют на электрические характеристики разряда и выходные параметры генерации [9–18]. В частности, присутствие добавки HBr в активной среде лазера на парах бромида меди приводит к затягиванию переднего фронта импуль-

* Федор Александрович Губарев (gubarevfa@tpu.ru); Максим Викторович Тригуб (trigub@tpu.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpu.ru); Кирилл Валерьевич Федоров (ime@tpu.ru).

са тока, способствуя повышению напряжения пробоя [13–16]. Можно предположить, что в CuBr-лазерах с добавкой HBr индуктивность разрядного контура и скорость нарастания тока в меньшей степени влияют на энергетические характеристики лазера. Этот вопрос рассмотрен в настоящей статье.

Техника эксперимента

Использовалась конструкция активного элемента CuBr-лазера с внешним нагревом активной зоны, подобная рассмотренной в работах [16–20]. Активная область ГРТ имеет длину 90 см, диаметр 5 см и помещается во внешний нагреватель для обеспечения схожего температурного режима при изменении индуктивности разрядного контура. Независимо от нагрева активной зоны осуществляется нагрев контейнеров с рабочим веществом CuBr и генератора водорода (контейнера с цеолитом, насыщенного HBr) для введения небольшого количества активной примеси (0,1–0,2 торр) в лазерную среду. Температуры контейнеров контролируются с помощью хромель-алюмелевых термопар и автоматически стабилизируются на заданном уровне с точностью ± 5 К. В качестве буферного газа в экспериментах используется неон.

Накачка осуществляется от тиратронного генератора (тиратрон ТГИ1-1000/25) с импульсным зарядом рабочей емкости, принцип действия которого рассмотрен в работах [20, 21]. Частота следования импульсов составляет 24 кГц. Величина накопительной емкости C_s равна 500 пФ. Обострительный конденсатор отсутствует. Дополнительная воздушная индуктивность L_a включалась в разрядный контур между накопительным конденсатором и катодом ГРТ, как показано на рис. 1.

Величина L_a могла варьироваться в диапазоне от 0 до 10 мкГн путем переключения числа витков. Величина собственной индуктивности разрядного контура в отсутствие дополнительной индуктивности L_a оценивалась аналогично [12, 13] и составляла (600 ± 50) нГн для режима работы без добавки HBr и (450 ± 40) нГн с добавкой HBr.

Выходная средняя мощность измерялась измерителем мощности Ophir 30C-SH. Регистрация импульсов тока, напряжения и генерации производи-

лась с помощью датчиков тока Pearson Current Monitors 8450, пробников напряжения Tektronix P6015A и коаксиального фотоэлемента типа ФК-22 соответственно. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф Tektronix TDS 3054C.

Результаты эксперимента

Как отмечалось в работах [7, 8], токи, протекающие через ГРТ и тиратрон, могут значительно отличаться, что обусловлено спецификой заряда емкостных составляющих разрядного контура. На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы напряжения на ГРТ, токов через ГРТ и тиратрон и генерации для трех значений индуктивности (с добавкой и без добавки HBr) при мощности накачки (потребляемой высоковольтным источником накачки от сети) $P_b = 1540$ Вт. В условиях наших экспериментов без добавки HBr амплитуда тока через тиратрон всегда меньше амплитуды тока через ГРТ, а с добавкой – наоборот. Согласно [7] в первом случае заряд емкостных составляющих происходит со стороны анода и первым пробивается промежуток «анод–активная среда». Этот момент на кривой тока соответствует первому максимуму при малой L_a , переходящему в затяжной перегиб при большой L_a . Во втором случае заряд емкостных составляющих происходит со стороны катода и первым пробивается промежуток «катод–активная среда», что выражено в виде перегиба на переднем фронте импульса тока. Ток через ГРТ начинается позже тока через тиратрон (по сравнению с первым случаем) и имеет меньшую амплитуду. Здесь следует отметить, что такой характер пробоя скорее определяется не наличием или отсутствием электроотрицательной добавки, а конструкцией активного элемента и взаимным расположением компонентов схемы. В частности, в работе [18], где использовался тот же активный элемент, перегиб на кривой тока, наоборот, мог наблюдаться без добавки и не наблюдаться с добавкой HBr.

На рис. 4 приведены зависимости скорости нарастания тока разряда dI/dt от величины дополнительной индуктивности для тех же условий. Скорость нарастания считалась на интервале от $0,1I_n$ до $0,9I_n$, где I_n – ток в точке первого перегиба на переднем фронте (на рис. 2, 3 отмечены стрелками).

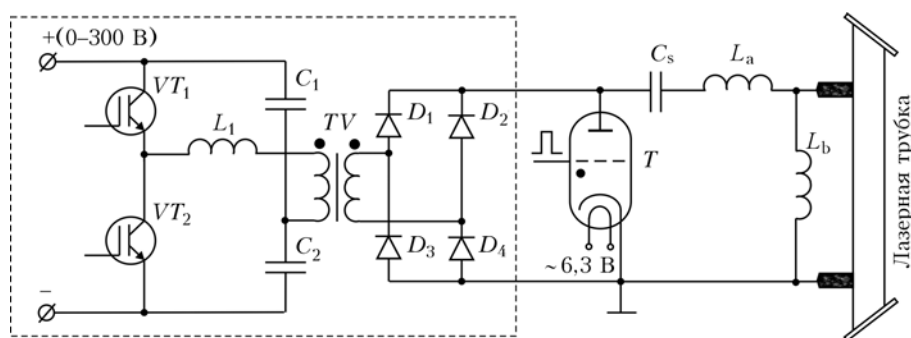
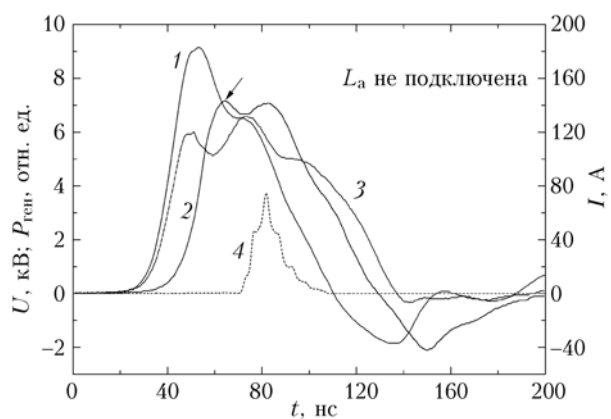
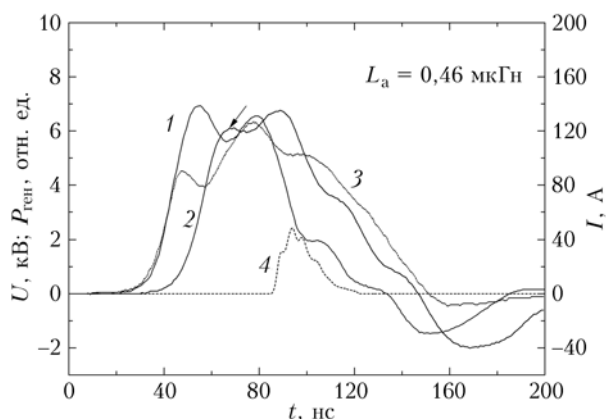


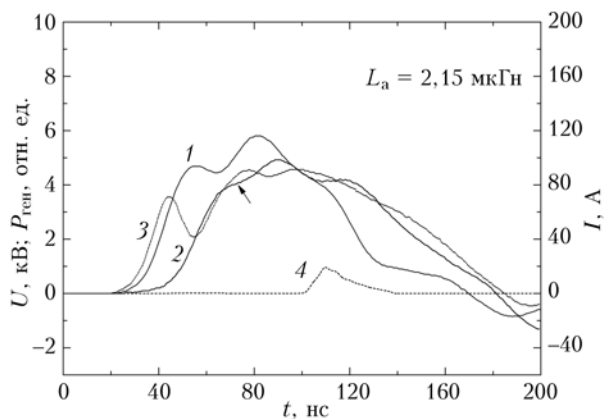
Рис. 1. Схема накачки: пунктиром обведена схема импульсного заряда рабочей емкости C_s ; L_a – дополнительная индуктивность; L_b – шунтирующая индуктивность; T – тиратрон



a



б



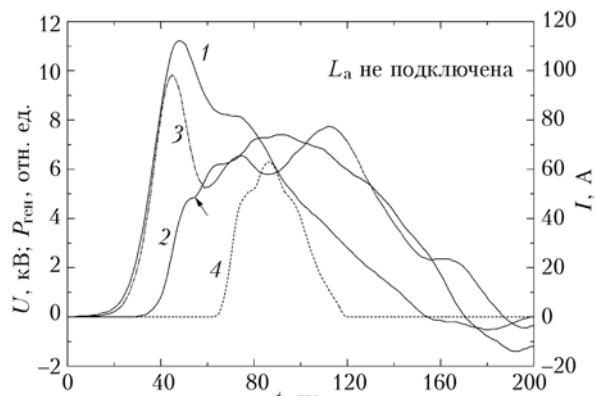
в

Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока через ГРТ (2), тока через тиратрон (3) и генерации (4) при разных значениях L_a без добавки НВг

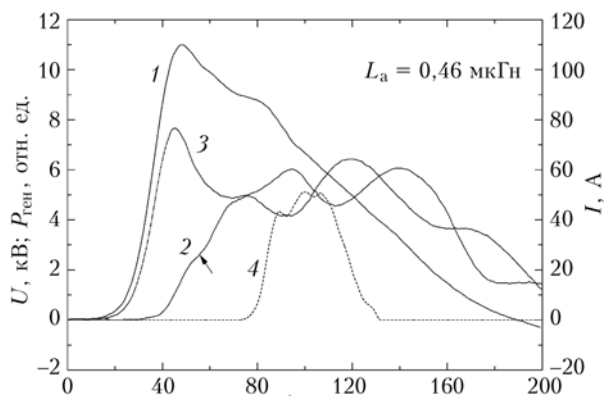
Зависимости на рис. 4 хорошо коррелируют с рассчитанными по осциллограммам тока и напряжения значениями энерговклада (рис. 5).

Энеговклад в разряд рассчитывался до окончания импульса генерации. Как с добавкой, так и без добавки НВг с увеличением индуктивности разрядного контура происходит снижение скорости нарастания тока и энерговклада в разряд. При этом без добавки это снижение более существенное и, как

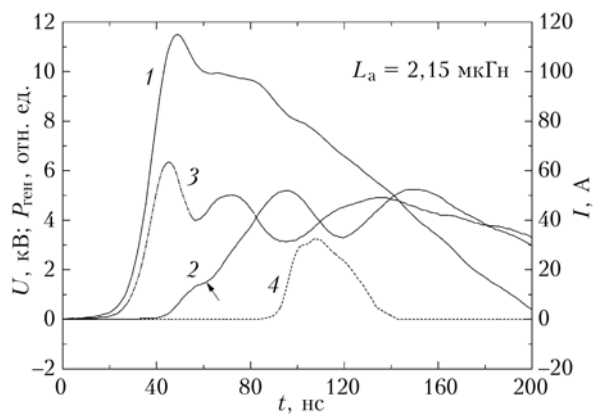
одна из причин, приводит к снижению мощности генерации до весьма малых значений (рис. 6, а), а при индуктивности больше 4 мкГн разряд становится неустойчивым.



a



б



в

Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока через ГРТ (2), тока через тиратрон (3) и генерации (4) при разных значениях L_a с добавкой НВг

С добавкой НВг разряд остается стабильным до 10 мкГн, при этом мощность генерации падает примерно в 2 раза (рис. 6, б). Обращает на себя внимание начальный участок кривых dI/dt и $E_{вкл}$.

При подключении уже одного витка дополнительной индуктивности (160 нГн) наблюдается резкое снижение dI/dt . При наличии добавки НВг резкий спад dI/dt и $E_{\text{вкл}}$ происходит при подключении еще меньшей индуктивности в виде половины витка диаметром 10 см (50 нГн). Затем спад идет более медленно. Но интересно, что резкий спад dI/dt вначале не сопровождается таким же резким спадом мощности генерации.

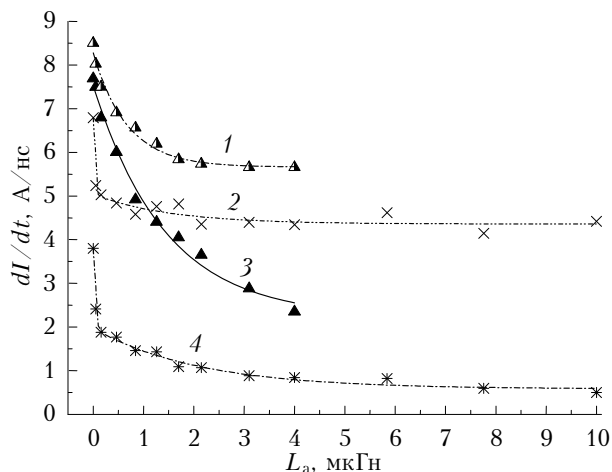


Рис. 4. Зависимости скорости нарастания тока через тиратрон (1, 2) и ГРТ (3, 4) от дополнительной индуктивности без добавки (1, 3) и с добавкой НВг (2, 4)

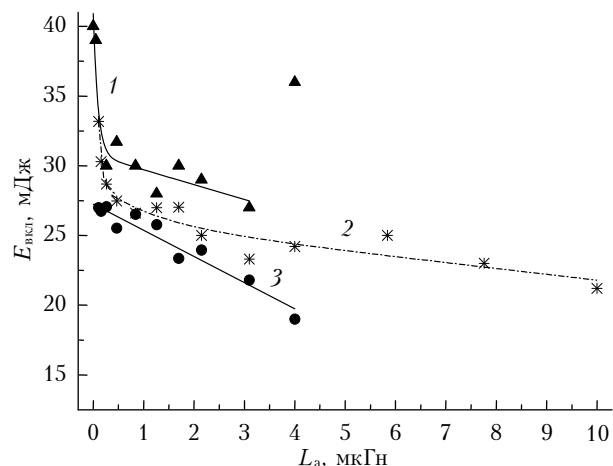


Рис. 5. Зависимости энергозклада в разряд от дополнительной индуктивности: 1 – $P_{\text{в}} = 1540$ Вт, без добавки НВг; 2 – 1540 Вт, с добавкой; 3 – 1200 Вт, без добавки

Вероятно, участок с резким спадом dI/dt соответствует условиям, когда происходит относительно быстрый пробой обеих холодных буферных зон ГРТ и активной области, после которого начинается возбуждение лазерных уровней, сопровождаемое спонтанным излучением и генерацией. В результате мы наблюдаем генерацию на втором колебании тока через тиратрон (см. рис. 2, а, рис. 3, а), т.е. при минимальной задержке относительно начала протекания тока через ГРТ по сравнению с большей индуктивностью (рис. 2, б, в, рис. 3, б, в). Под пробоем

понимается момент резкого уменьшения сопротивления газового промежутка. Моменты пробоя разных частей ГРТ на кривой тока выражены в виде перегибов и колебаний. При большей индуктивности одна из зон пробивается быстрее, затем идет более медленный заряд остальных емкостных составляющих разрядного контура и только потом пробой второй зоны и активной области. Генерация начинается в конце или после второго колебания тока через тиратрон.

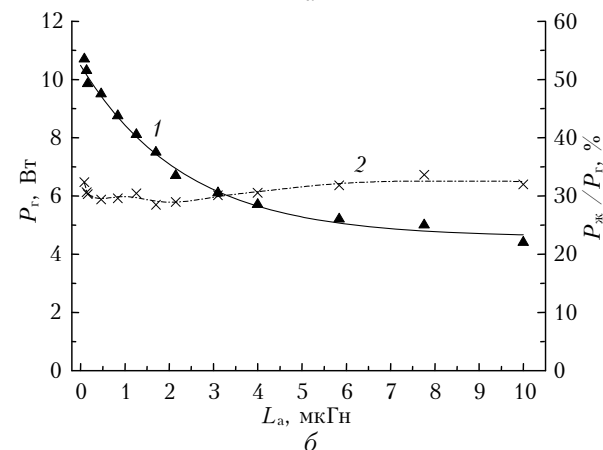
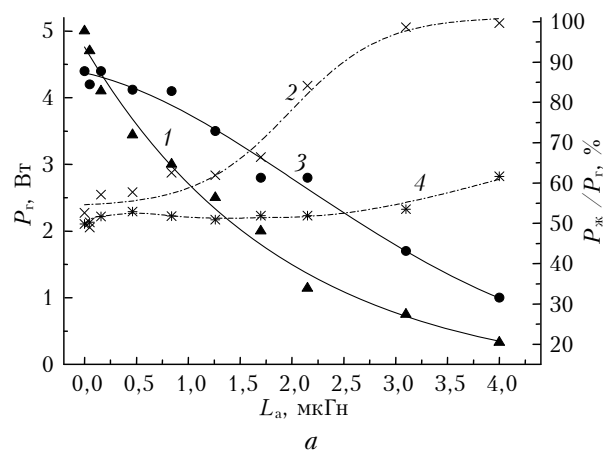


Рис. 6. Зависимости средней мощности генерации (1, 3) и доли излучения на желтой линии (2, 4) от дополнительной индуктивности: а – без добавки; б – с добавкой НВг; 1, 2 – $P_{\text{в}} = 1540$ Вт; 3, 4 – 1200 Вт

Концентрация электронов в активной среде, содержащей добавку НВг, на частоте 20–30 кГц в 2–3 раза ниже, чем в отсутствие добавки [16]. Таким образом, сопротивление холодных буферных зон, которые также содержат добавку НВг, будет выше. Кроме того, развитие разряда затруднено за счет диссоциативного прилипания электронов с малой энергией к электроотрицательной добавке НВг. Это приводит к тому, что пробой промежутка «катод–активная среда» (с добавкой он пробивается раньше в условиях данного эксперимента) и последующий пробой в остальных разрядных промежутках происходят при высоком напряжении (см. рис. 3). Это наблюдается даже при величине дополнительной индуктивности $L_a = 10$ мкГн.

Таким образом, снижение средней мощности генерации с добавкой НВг при увеличении индуктивности разрядного контура (см. рис. 6, б) обусловлено скорее снижением энерговклада в разряд и его перераспределением в сторону заднего фронта импульса напряжения, чем заселением метастабильных уровней. Об этом также можно судить по соотношению мощности генерации на линии 578,2 нм ($P_{ж}$) к средней мощности генерации ($P_{ж}/P_{г}$), которое практически не меняется во всем диапазоне L_a и составляет ~30%.

Без добавки НВг при увеличении индуктивности контура не только снижается энерговклад в разряд (см. рис. 5), но и затягивается передний фронт импульса напряжения (см. рис. 2). В результате пробой активной среды происходит при низком напряжении, что приводит к заселению метастабильных уровней. Это проявляется в увеличении доли генерации на линии 578,2 нм, которая при $L_a = 3,1$ мкГн и мощности накачки $P_{в} = 1540$ Вт достигает 100% (см. рис. 6, а). При $P_{в} = 1200$ Вт мощность генерации с увеличением L_a падает медленнее, отношение $P_{ж}/P_{г}$ возрастает от 50 до 62%. Такое поведение генерации, на наш взгляд, связано с меньшим термическим заселением метастабильных уровней при снижении мощности накачки.

Заключение

Проведенное исследование показало, что и без добавки, и с добавкой НВг увеличение индуктивности разрядного контура приводит к снижению мощности генерации и кпд CuVg-лазера. При этом за счет существенного различия предимпульсного сопротивления плазмы с добавкой и без добавки НВг влияние индуктивности проявляется по-разному. Хотя в обоих случаях увеличение индуктивности сопровождается затягиванием переднего фронта импульса тока, в CuVg-лазере это приводит к затягиванию также переднего фронта импульса напряжения и уменьшению его амплитуды. В результате метастабильные уровни атомов меди заселяются более эффективно, что приводит к снижению инверсии. Увеличение мощности накачки и напряжения на накопительном конденсаторе не только не улучшают условия накачки, но и приводят к перегреву активной среды.

В CuVg-лазере с добавкой НВг с увеличением индуктивности фронт импульса напряжения не затягивается, амплитуда не уменьшается, при этом вершина импульса становится более плоской и поддерживает высокое напряжение до пробоя всех зон разрядного канала. Снижение мощности генерации происходит за счет снижения энерговклада в разряд и может быть компенсировано повышением мощности накачки. Данная особенность позволяет сделать вывод, что с добавкой НВг активная среда CuVg-лазера менее критична к dI/dt . Если полагать, что уменьшение скорости включения коммутатора эквивалентно включению индуктивности последовательно ГРТ, то при работе с добавкой НВг требования к схеме накачки и коммутатора по ско-

рости нарастания тока менее жесткие. В большинстве случаев, когда предпочтение отдается надежности устройства, для работы с CuVg-лазерами с добавкой НВг достаточно традиционной схемы прямого разряда накопительного конденсатора с тиратронами типа ТГИ1-1000/25, для которых допустимая dI/dt составляет ~4 А/нс, или других схем, обеспечивающих аналогичную скорость нарастания тока.

В работе [22] показано, что увеличение скорости нарастания тока примерно с 1 до 3 А/нс способствует увеличению мощности генерации и кпд CuVg-Ne-H₂-лазера в 2,8 раза. В нашем эксперименте это увеличение составило ~1,5 раза при аналогичном изменении dI/dt . Согласно рис. 6, б, потенциал увеличения мощности генерации с увеличением dI/dt есть. Увеличение dI/dt возможно как за счет применения тиратронов с высокой скоростью нарастания тока анода (например, СХ1835, $\max(dI_a/dt) = 100$ А/нс) [11, 12], так и за счет уменьшения индуктивности разрядного контура путем оптимизации конструкции активного элемента и схемы накачки.

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

1. Петраш Г.Г. Импульсные газоразрядные лазеры // Успехи физ. наук. 1971. Т. 105, вып. 4. С. 645–676.
2. Кирилов А.Е., Кухарев В.Н., Солдатов А.Н., Тарасенко В.Ф. ОКГ на парах свинца // Изв. вузов. Физ. 1977. № 10. С. 146–149.
3. Бохан П.А., Герасимов В.А., Соломонов В.И., Щеглов В.Б. О механизме генерации лазера на парах меди // Квант. электрон. 1978. Т. 5, № 10. С. 2162–2173.
4. Бохан П.А., Герасимов В.А. Оптимизация условий возбуждения в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1979. Т. 6, № 3. С. 451–454.
5. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. О механизме ограничения частоты следования импульсов генерации в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7, № 6. С. 1264–1269.
6. Юдин Н.А., Третьякова М.В., Юдин Н.Н. Релаксация метастабильных состояний в лазерах на самоограниченных переходах // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 254–259.
7. Юдин Н.А., Суханов В.Б., Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С. О природе фантомных токов в активной среде лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов // Квант. электрон. 2008. Т. 38, № 1. С. 23–28.
8. Юдин Н.А., Губарев Ф.А., Суханов В.Б. Развитие разряда в активных средах лазеров на парах металлов с малым рабочим объемом // Изв. вузов. Физ. 2010. Т. 53, № 5/2. С. 41–46.
9. 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. 2 / Под ред. В.М. Батенина. М.: Физматлит, 2011. 616 с.
10. Astadjev D.N., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Effect of hydrogen on CuBr laser power and efficiency // Opt. Commun. 1985. V. 56, N 4. P. 279–282.
11. Withford M.J., Brown D.J.W., Mildren R.P., Carman R.J., Marshall G.D., Piper J.A. Advances in copper laser technology: kinetic enhancement // Progr. in Quantum Electron. 2004. V. 28. P. 165–196.

12. *Isaev A.A., Jones D.R., Little C.E., Petrash G.G., Whyte C.G., Zemskov K.I.* Characteristics of pulsed discharges in copper bromide and copper HyBrID lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1997. V. 33, N 6. P. 919–926.
13. *Astadjov D.N., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K.* Parametric Study of the CuBr Laser with Hydrogen Additives // IEEE J. Quantum Electron. 1988. V. 24, N 9. P. 1927–1935.
14. *Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С.* Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера // Квант. электрон. 2004. Т. 34, № 7. С. 625–629.
15. *Губарев Ф.А., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С.* Исследование возможности масштабирования CuBr-лазеров с емкостной накачкой // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 1003–1006.
16. *Торгаев С.Н., Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В.* Моделирование CuBr–Ne–HBr-лазера при высоких частотах следования импульсов накачки // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9. С. 54–60.
17. *Gubarev F.A., Troitskiy V.O., Trigub M.V., Sukhanov V.B.* Gain characteristics of large volume CuBr laser active media // Opt. Commun. 2011. V. 284, N 10–11. P. 2565–2568.
18. *Gubarev F.A., Evtushenko G.S., Vuchkov N.K., Sukhanov V.B., Shiyonov D.V.* Modeling technique of capacitive discharge pumping of metal vapor lasers for electrode capacitance optimization // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 055111–055115.
19. *Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Федоров К.В., Евтушенко Г.С.* Режим одиночных импульсов генерации CuBr-лазера // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1107–1111.
20. *Димаки В.А., Суханов В.Б., Троцкий 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.
21. *Андриенко О.С., Димаки В.А., Колбычев Г.В., Суханов В.Б., Троцкий В.О.* Лазер на парах бромиде меди малой мощности // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 11. С. 890–894.
22. *Vuchkov N.K., Astadjov D.N., Sabotinov N.V.* Influence of the Excitation Circuits on the CuBr Laser Performance // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30, N 3. P. 750–758.

F.A. Gubarev, M.V. Trigub, G.S. Evtushenko, K.V. Fedorov. **Influence of discharge circuit inductance on output characteristics of CuBr laser.**

The dependence of energy characteristics of a CuBr laser of an average active volume with and without HBr addition on the rate of the current rise is under study. The variation of the energy characteristics is conditioned by connecting an additional inductance in the discharge circuit. It is shown that at the increase of the inductance up to 4 mH, the average lasing power of the CuBr laser decreases tenfold. Under similar conditions, the average generation power of the CuBr laser with HBr addition decreases by less than two orders of magnitude. The portion of yellow line generation also changes by a less degree. Thus, the presence of the electronegative addition to the CuBr laser active medium decreases requirements to the pulse power supply.