

УДК 535:371.623

Исследование возможности масштабирования CuBr-лазеров с емкостной накачкой

Ф.А. Губарев^{1,2}, Д.В. Шиянов^{1,2}, В.Б. Суханов^{1,2}, 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 6.07.2012 г.

Представлены результаты исследования энергетических характеристик CuBr-лазера среднего активного объема, возбуждаемого продольным емкостным разрядом. Исследованы зависимости мощности генерации от различных эксплуатационных параметров, в том числе от величины эквивалентной емкости электродов. Получена максимальная на сегодня средняя мощность генерации CuBr-лазера с накачкой продольным емкостным разрядом 12 Вт при кпд ~0,5%. Результаты получены при суммарной расчетной емкости электродов с каждой стороны от активной области 1190 пФ.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, лазер на парах металлов, емкостный разряд, накачка, активная добавка; copper bromide laser, metal vapor laser, capacitive discharge, excitation, active additive.

Введение

Для накачки лазеров на парах металлов, в частности лазеров на парах бромида меди, традиционно применяется сильноточный тлеющий разряд продольного типа [1, 2], при котором электроды располагаются внутри газоразрядной трубки (ГРТ). При поиске новых способов получения паров рабочего вещества [3] или при введении химически агрессивных активных примесей с целью улучшения энергетических характеристик лазеров [4–8] желательно, чтобы электроды не контактировали с газовой средой. В работах [9–11] исследовались CuBr-лазеры с накачкой продольным емкостным разрядом, при котором цилиндрические электроды располагались на внешней стенке ГРТ, т.е. были отделены от газовой среды. В ГРТ диаметром 1 см и длиной 38 см получена средняя мощность генерации 2 Вт при кпд 0,125%, а в ГРТ диаметром 2,7 см (при той же длине) – 3,5 Вт при кпд 0,27% [11]. Соответственно, как и при традиционной накачке, при использовании емкостного разряда возникает вопрос о возможности дальнейшего масштабирования активных элементов.

Известно, что увеличение выходной мощности связано с ростом активного объема лазера и, соответственно, вводимой мощности [1, 2]. При работе с емкостной накачкой вводимая в разряд мощность

ограничена величиной емкости электродов. Согласно результатам работ [9, 11] предпочтительной является схема накачки, в которой отсутствует отдельный накопительный конденсатор, а собственная емкость ГРТ (эквивалентная емкость последовательного соединения емкостей низковольтного и высоковольтного электродов) выполняет функцию основной накопительной емкости. В работе [12] путем подключения конденсаторов последовательно к электродам традиционной ГРТ CuBr-лазера показано, что для активного элемента объемом ~1500 см³ емкость каждого подключаемого электрода должна составлять порядка 1100 пФ.

В настоящей статье представлены результаты исследования активного элемента CuBr-лазера с емкостной накачкой среднего активного объема (1130 см³) при различных объемах электродных емкостей.

Техника эксперимента

Для исследования характеристик CuBr-лазера с внешними электродами использовались ГРТ диаметром 4 см и длиной 90 см. Конструкция и принцип работы таких ГРТ аналогичны описанным в [9–11, 13]. Активная область кварцевой трубки помещена во внешний нагреватель для обеспечения схожего температурного режима при разных емкостях электродов. 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)

* Федор Александрович Губарев (gubarevfa@tpru.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru); Виктор Борисович Суханов (qel@asd.iao.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpru.ru).

в лазерную среду. Температура контейнеров контролируется с помощью хромель-алюмелевых термодпар и автоматически стабилизируется на заданном уровне с точностью ± 5 К. В качестве буферного газа в экспериментах используется неон (рис. 1).

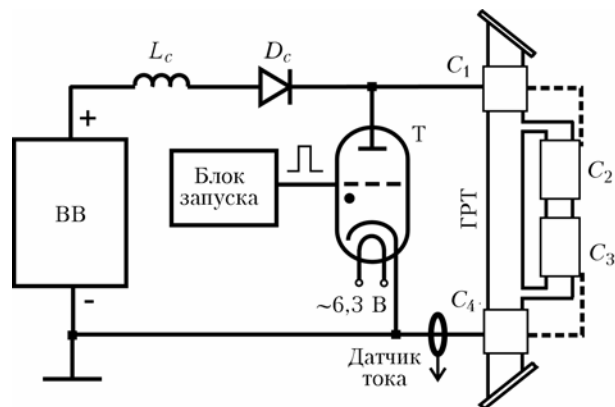


Рис. 1. Схема накачки: ВВ — высоковольтный выпрямитель; L_c и D_c — зарядные индуктивность и диод; Т — таситрон; C_1 – C_4 — расчетные значения электродных емкостей. Пунктирной линией показан съемный проводник

В качестве коммутатора применяется таситрон ТГУ1-1000/25. Каждый внешний электрод состоит из двух секций с большей (C_2 и C_3) и меньшей (C_1 и C_4) емкостью с целью оперативного изменения объема электродной емкости. Конструкция с электродами, расположенными над активной зоной, применяется для некоторой оптимизации габаритных размеров. В качестве изолятора между электродами C_2 и C_3 располагается кварцевая втулка, запаянная с обеих сторон. Таким образом, при всех вариантах подключения электродов разряд замыкается через активную область ГРТ. Соответствующие электроды с каждой стороны от активной области имеют одинаковые геометрические размеры: C_1 и C_4 — длина 14 см, диаметр 10 см; C_2 и C_3 — длина 38 см и диаметр 7,6 см. Расчетные значения емкостей $C_1 = C_4 = 390$ пФ, $C_2 = C_3 = 800$ пФ. Емкости электродов оценивались по формуле для цилиндрического конденсатора, у которого в качестве внешней обкладки служит титановая фольга, в качестве внутренней обкладки — плазменный слой, диэлектрик — стенка кварцевой трубки. В настоящей статье рассмотрены три варианта включения электродов: подключены электроды C_1 и C_4 (эквивалентная емкость последовательного соединения емкостей электродов $C_3 = 195$ пФ), C_2 и C_3 ($C_3 = 400$ пФ) и C_1, C_2, C_3, C_4 . В последнем случае емкость каждого электрода составляет 1190 пФ, $C_3 = 595$ пФ.

Измерение электрических характеристик разряда осуществляется с помощью датчика тока Pearson Current Monitor 8450, датчика напряжения Tektronics P6015A и осциллографа LeCroy WJ-324. Импульсы излучения фиксируются с помощью коаксиального фотоэлемента ФК-22. Мощность излучения определяется измерителем Ophir 30C-SH.

Результаты эксперимента

На рис. 2 приведены зависимости средней мощности генерации от мощности накачки (мощности, потребляемой от высоковольтного выпрямителя) для различных вариантов включения электродов.

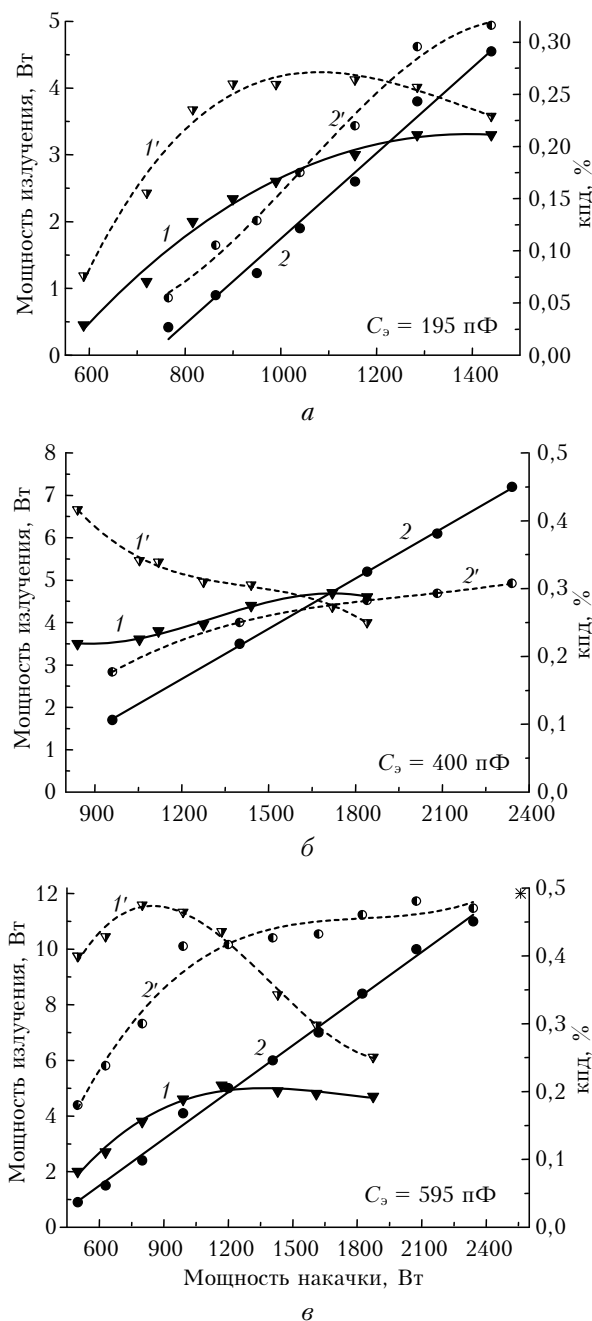


Рис. 2. Зависимости средней мощности генерации (1, 2) и кпд (1', 2') от мощности накачки: 1, 1' — без добавки НВг; 2, 2' — с добавкой НВг

Эксперименты проводились при частоте следования импульсов (ЧСИ) 18,2 кГц. При такой частоте обеспечивается стабильная работа коммутатора, кроме того она соответствует оптимальной частоте без добавки НВг. С добавкой НВг оптимум по

частоте незначительно смещается в сторону высоких частот. «Звездочкой» на рис. 2, в отмечена максимальная мощность генерации 12 Вт при ЧСИ 23 кГц. В целом, с добавкой НВг наблюдается тенденция увеличения мощности генерации с ростом объема электродной емкости. Причем во всех трех случаях (см. рис. 2) мощность генерации нарастает линейно при увеличении мощности накачки. То есть в условиях нашего эксперимента нам не удалось достичь насыщения ни по мощности накачки, ни по объему электродной емкости.

Можно предположить, что дальнейшее увеличение емкости электродов даст увеличение мощности генерации. Введение добавки ведет к увеличению теплопроводности газовой смеси, что обеспечивает отвод тепла из осевой области ГРТ к пристеночной и, как следствие, дает возможность работать при более высоких мощностях накачки (см. рис. 2, б, в). Без добавки НВг наблюдается явное насыщение мощности генерации при увеличении мощности накачки. Это связано с перегревом осевой области ГРТ и сужением пучка генерации. Без добавки НВг профиль луча уже, чем в присутствии добавки (это отмечалось также в работе [9]).

Очевидно, что характер влияния добавки НВг на стадии развития разряда в трубках с внутренними и внешними электродами схожий. Во-первых, выше предимпульсное сопротивление плазмы за счет снижения предимпульсной концентрации электронов, во-вторых, затрудняется развитие разряда за счет диссоциативного прилипания электронов с малой энергией к электроотрицательной добавке НВг. Эти процессы должны приводить к затягиванию переднего фронта импульса тока, что отмечалось ранее для традиционной накачки [7] и наблюдается в нашем эксперименте в виде участка на фронте тока с малой скоростью нарастания (рис. 3, б).

В то же время согласно результатам, представленным в работах [9–11], при емкостной накачке положительное влияние добавки НВг наблюдается при удельной мощности накачки $3,2\text{--}6\text{ Вт/см}^3$ и сопровождается увеличением скорости нарастания тока на начальной стадии развития разряда (первые 25 нс). Такое поведение импульса тока (рис. 3, б) мы связываем с существенным снижением удельного энерговклада при увеличении активного объема по сравнению с условиями накачки в работах [9–11], в которых использовались активные элементы объемом 218 и 30 см^3 . Но даже при относительно невысокой вводимой мощности ($\geq 2,3\text{ Вт/см}^3$) и малой скорости нарастания тока в условиях нашего эксперимента достигаются режимы (см. рис. 2), когда добавка НВг приводит к увеличению мощности генерации. Таким образом, имеется потенциал для масштабирования активных элементов с емкостной накачкой, который связан, прежде всего, с повышением удельной вводимой мощности.

Важными эксплуатационными параметрами активных элементов на парах металлов являются давление буферного газа (неона) и температура внешней стенки ГРТ. Зависимости мощности генерации от этих параметров представлены на рис. 4 и 5.

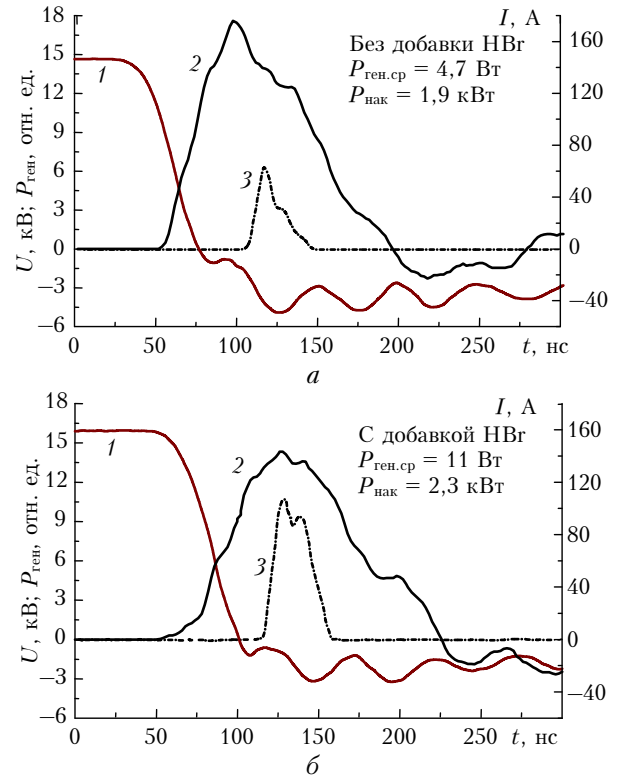


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ (1), тока (2) и генерации (3) без добавки (а), с добавкой НВг (б). $C_3 = 595\text{ пФ}$

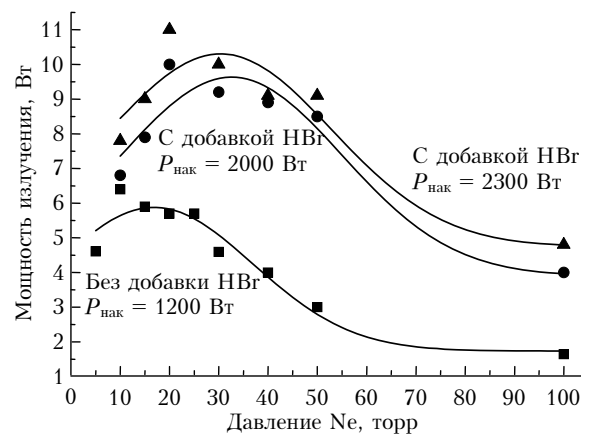


Рис. 4. Зависимости средней мощности генерации от давления буферного газа

Для всех случаев $C_3 = 595\text{ пФ}$. Мощность накачки, при которой проводились эксперименты, выбиралась исходя из зависимостей, представленных на рис. 2, в, и устойчивой работы таситрона во всем диапазоне давлений буферного газа. С добавкой НВг выбраны большие мощности накачки, чем без добавки, в связи с тем, что добавка эффективно работает при больших уровнях накачки. Как следует из приведенных зависимостей, максимальная мощность генерации достигается при давлении буферного газа $\sim 20\text{ торр}$. Область оптимальных давлений Ne в режиме без добавки достаточно узкая (от 15 до 25 торр), с добавкой НВг она расширяется до 50 торр.

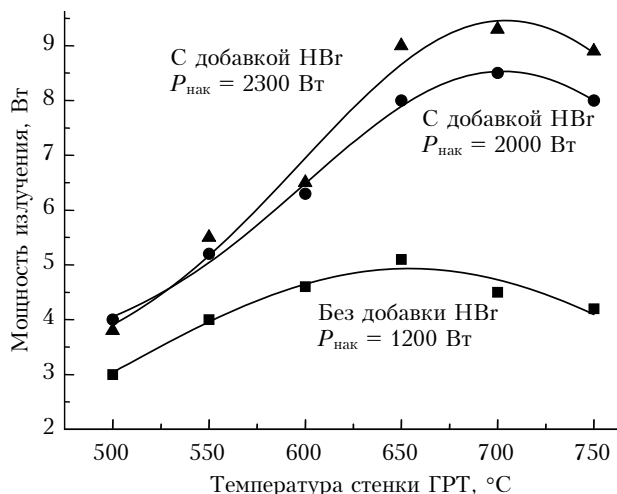


Рис. 5. Зависимости средней мощности генерации от температуры стенки ГРТ

Оптимальная температура для режима с добавкой несколько выше (700 °C) по сравнению с режимом без добавки (650 °C), что связано, как отмечалось выше, с выравниванием температурного профиля активной среды.

Заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что активные элементы с емкостной накачкой могут масштабироваться аналогично элементам с традиционной накачкой. При этом с ростом активного объема уменьшается удельная мощность накачки, требуемая для того, чтобы введение активной примеси HBr сопровождалось увеличением мощности генерации. Зависимости мощности генерации от давления буферного газа и температуры внешней стенки ГРТ исследовались впервые. Можно отметить, что они имеют схожий характер с полученными ранее для CuBr-лазера с традиционной накачкой [2]. Для получения высокой средней мощности генерации и кпд требуется повышение энергии в импульсе генерации. Максимальная средняя мощность генерации CuBr-лазера с накачкой продольным емкостным разрядом составила 12 Вт при кпд ~0,5%. Результаты получены при суммарной расчетной емкости электродов с каждой стороны от активной области 1190 пФ. Линейный рост мощности генерации с повышением мощности накачки при всех исследованных значениях электродных емкостей свидетельствует о перспективе дальнейшего повышения мощности генерации CuBr-лазеров с емкостной накачкой.

F.A. Gubarev, D.V. Shiyarov, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko. Study of scaling possibility of capacity excited CuBr laser.

The paper presents the results of experimental study of middle scale CuBr laser performance with longitudinal capacitive discharge excitation. Lasing power dependences on various operating conditions were investigated including the influence of equivalent electrode capacitance value. Maximum average output power of 12 W with ~0,5% efficiency was reached in CuBr laser excited by longitudinal capacitive discharge. These results were obtained with total calculated electrode capacitance of 1190 pF on the each side of a gas discharge active region. Linear growing of lasing power with increasing of input power is observed at all values of electrode capacitances and indicates the perspective of further increasing of output power of capacitively excited CuBr lasers.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки РФ, Госзадание № 7.586.2011, и РФФИ, грант № 12-02-31811.

1. Батенин В.М., Бойченко А.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. 2-е изд. 2. В 2 т. Т. 1 / Под ред. В.М. Батенина. М.: Физматлит, 2009. 544 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. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Ткаченко Н.Ю. Лазер на парах иодида меди с внутренним реактором // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 721–726.
4. Astadjov 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.
5. 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 HуBrID lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1997. V. 33, N 6. P. 919–926.
6. 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.
7. 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.
8. Филонов А.Г. О влиянии добавки HBr на характеристики излучения лазера на парах CuBr // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 608–613.
9. Gubarev F.A., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S., Fedorov V.F., Shiyarov D.V. CuBr Laser Excited by a Capacitively Coupled Longitudinal Discharge // IEEE J. Quantum Electron. 2009. V. 45, N 2. P. 171–177.
10. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б. Энергетические характеристики CuBr-лазера с емкостной накачкой при использовании схемы на основе лампового коммутатора // Изв. Том. политехн. ун-та. 2009. Т. 314, № 4. С. 106–110.
11. Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В. Особенности работы CuBr-лазера с накачкой продольным емкостным разрядом // Квант. электрон. 2010. Т. 40, № 1. С. 19–24.
12. Gubarev F.A., Evtushenko G.S., Vuchkov N.K., Sukhanov V.B., Shiyarov 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.
13. Способ возбуждения лазеров на парах галогенидов металлов и активный элемент лазера на парах галогенидов металлов: Пат. № 2363080. Россия. Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Федоров В.Ф. // Оpubл. БИПМ № 21 27.07.2009. Приоритет от 08.10.2007.