

Влияние состава газовой смеси и условий накачки на характеристики CuBr – Ne – H₂ (HBr)-лазера

Д.В.Шиянов, Г.С.Евтушенко, В.Б.Суханов, В.Ф.Федоров

Экспериментально установлены оптимальные давления активных примесей H₂, HBr и рабочего вещества (бромид меди), позволяющие реализовать эффективную генерацию CuBr-лазера. Показано, что для достижения максимальных выходных характеристик лазера, реализуемых при увеличении напряжения на газоразрядной трубке и частоты следования импульсов накачки, требуется также увеличивать количество вводимой примеси. В то же время оптимальное давление бромида меди с повышением частоты уменьшается.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, активная примесь, условия накачки.

1. Введение

Многолетние усилия ряда научных групп из разных стран мира, направленные на исследование и разработку лазера на парах меди (ЛПМ), позволили наладить промышленный выпуск эффективных источников когерентного излучения для различных применений в науке, технике, медицине [1–3].

В последнее время основное внимание уделяется ЛПМ, активная среда которых модифицирована посредством введения активных примесей H₂, HBr и HCl [2, 4, 5]. Присутствие таких электроотрицательных добавок в активной среде ускоряет процессы релаксации и рекомбинации плазмы в межимпульсный период и приводит к увеличению напряжения на газоразрядной трубке (ГРТ) в фазе накачки [4, 5]. Это, в свою очередь, вызывает увеличение частоты следования импульсов, КПД и выходной мощности лазера [2, 5].

Особое место среди ЛПМ с модифицированной кинетикой занимает лазер на парах бромида меди. Несмотря на относительную простоту по сравнению с известным аналогом – лазером на парах меди, CuBr-лазер с добавкой H₂ либо HBr обладает высокими частотно-энергетическими характеристиками [6, 7].

В настоящее время активные элементы CuBr-лазера могут работать как в саморазогревном режиме, так и с использованием независимого нагрева контейнеров с бромидом меди [8, 9]. Они оснащаются специальными генераторами H₂ и HBr [7, 10], которые обеспечивают введение необходимого количества добавки к основному буферному газу – неону. Вместе с тем ряд вопросов, связанных с величинами оптимальных добавок и с их зависимостью от условий накачки, еще ждут решения.

В частности, нет ответа на следующие вопросы:

– как изменится давление добавки H₂, необходимое для получения максимальной мощности излучения, при увеличении давления буферного газа Ne (от 10 до 100 Тор);

– какое давление добавки H₂ необходимо для получения максимальной мощности излучения при увеличении напряжения на ГРТ и мощности накачки;

– каким станет оптимальное давление добавки H₂ при переходе к высоким частотам следования импульсов накачки (до 100 кГц);

– как изменится оптимальное давление паров рабочего вещества (бромида меди) при увеличении давления буферного газа Ne и частоты следования импульсов;

– какие давления других добавок, в первую очередь HBr, необходимы для работы CuBr-лазера в условиях достижения максимальной мощности генерации при различных условиях возбуждения (хотя ранее нами было экспериментально установлено, что эта добавка, так же как и H₂, значительно увеличивает КПД и мощность лазера, использование HBr взамен H₂ технологически более привлекательно [7]).

Решению этих вопросов и посвящена данная работа.

2. Техника и методика эксперимента

Для исследования энергетических характеристик CuBr-лазера с добавками H₂ и HBr в зависимости от условий возбуждения использовались ГРТ с диаметрами 2.6 и 3.8 см при длинах активной зоны 76 и 96 см соответственно. Кроме того, количественно определялось давление оптимальной добавки H₂ в ГРТ с большим активным объемом (диаметр 5 см, длина 145 см). Во всех случаях конструкция ГРТ являлась саморазогревной [9] и позволяла подключать к ней со стороны анодного электрода дифференциальный манометр (цена деления шкалы – 0.01 Тор) для фиксирования давлений рабочего вещества, а также вводимых активных примесей.

ГРТ имели встроенные реверсивные генераторы HBr, предназначенные не только для его подачи в рабочую зону лазера, но и для откачки обратно в генератор. Концентрация HBr регулировалась в широких пределах тем-

Д.В.Шиянов, В.Б.Суханов, В.Ф.Федоров. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 1; e-mail: qel@asd.iao.ru

Г.С.Евтушенко. Томский политехнический университет, Россия, 634034 Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: ime@tpu.ru

пературой нагревателя, а оптимальная концентрация добавки определялась по максимальной мощности излучения. При постоянной температуре нагревателя концентрация HBr устанавливалась на определенном уровне. Подача H_2 в ГРТ лазера осуществлялась из баллона через магистраль.

Возбуждение ГРТ осуществлялось по схеме прямого разряда рабочей емкости типа КВИ-3 на ГРТ с помощью коммутатора-тиратрона. При накачке ГРТ диаметром 2.6 и 3.8 см с коммутируемыми мощностями до 3 кВт использовался тиатрон ТГИ1-1000/25 с водяным охлаждением. Коммутация мощностей 4–5 кВт для ГРТ диаметром 5 см осуществлялась по схеме поочередного запуска двух тиатронов. При возбуждении ГРТ диаметром 2.6 см на частотах 30–100 кГц в качестве коммутатора использовался таситрон ТГУ1-1000/25. Специальные работы по оптимизации импульса накачки (сжатие импульса, увеличение напряжения) не проводились. Мощность излучения контролировалась измерителем мощности ИМО-2, а температура стенки ГРТ – хромель-алюмелевой термпарой.

Определение оптимального давления добавки H_2 (когда мощность генерации CuBr -лазера максимальна) при различных давлениях буферного газа Ne и частотах следования импульсов выполнялось следующим образом. Для каждого фиксированного давления буферного газа на заданной частоте в диапазоне 15–100 Тор проводилось несколько измерений. Вначале измерялась мощность излучения лазера, работающего в чистом Ne (при давлении, например, 15 Тор) без примеси H_2 . После этого в холодную откачанную ГРТ подавался H_2 (давление 0.1 Тор), затем закачивался Ne (15 Тор) и измерялась мощность излучения. Далее при том же давлении буферного газа Ne вся процедура повторялась снова, но давление добавки H_2 каждый раз увеличивалось с шагом 0.05 Тор. Таким образом определялось оптимальное давление добавляемого H_2 , при котором выходная мощность была максимальной. Во всех случаях напряжение источника питания и вкладываемая электрическая мощность поддерживались на одном уровне.

Методика исследования влияния добавок H_2 на характеристики CuBr -лазера, работающего на Ne высокого давления при масштабировании напряжения источника питания, заключалась в следующем. Напряжение источника изменялось от 4 до 10 кВ с шагом 1 кВ. В каждой точке указанным выше способом измерялась мощность излучения лазера без добавки и с добавкой H_2 в пределах 0.1–0.4 Тор.

Определение оптимальных добавок HBr при различных условиях возбуждения лазера отличалось от аналогичных измерений с добавками H_2 , когда водород закачивался в холодную ГРТ. В данном случае лазер выводился на генерацию без добавки HBr . После установления постоянного уровня мощности выставлялись на «0» показания манометра, соединенного с ГРТ, и включался генератор HBr . Таким образом фиксировалось оптимальное давление HBr в максимуме выходной мощности.

Количественная оценка давления паров рабочего вещества CuBr при работе лазера на высоких частотах следования импульсов накачки и при различных давлениях буферного газа аналогична оценке давления HBr . Включался разряд, и ГРТ выводилась на рабочую температуру без подачи паров CuBr . После этого выставлялись на «0»

показания манометра, соединенного с ГРТ, и разогревались контейнеры с CuBr . В максимуме мощности излучения фиксировались показания манометра.

Однако стоит отметить, что, говоря об определении давления паров рабочего вещества CuBr , мы имеем в виду ту долю давления, на которую увеличивается общее давление газа в ГРТ. А происходит это за счет поступления туда не только паров CuBr в чистом виде, но и продуктов его диссоциации, которые затем в разряде вступают в химические реакции с бромом, водородом и т. д. Следовательно, мы имеем дело с суммарным давлением рабочего вещества и продуктов его распада в плазме, позволяющим определить общую картину изменения давления паров CuBr .

Конечно же, данные измерения имеют определенную погрешность. В основном это связано с тем, что при подаче паров CuBr , и особенно HBr , меняется согласование между ГРТ и генератором накачки, а это ведет к изменению энерговклада в ГРТ, что, в свою очередь, отражается на общем давлении газа. Поэтому в отдельных экспериментах определялась величина, на которую менялось давление газа в ГРТ при изменении температуры ее стенки на 20–50°C (за счет подачи, например, HBr в рабочую зону). Затем это учитывалось при определении давления добавки HBr .

Мы считаем, что такая методика позволяет отслеживать общую тенденцию поведения давления добавки HBr , а также давления CuBr . Это подтверждается еще и тем, что при отключении нагрева генератора HBr (равно как и контейнеров с CuBr) показания манометра возвращаются к первоначальному нулевому значению.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В ряде экспериментов с трубками разного диаметра другими авторами (см., напр., [2, 4]) и нами (ранее и в этой работе) было установлено положительное влияние добавок HBr (H_2) на генерационные характеристики $\text{CuBr}-\text{Ne}$ -лазера. Обращает на себя внимание поведение средней мощности излучения в зависимости от давления буферного газа. Из рис.1 видно, что максимум средней мощности при добавках H_2 (0.25–0.45 Тор) смещается в сторону меньших давлений Ne (15–20 Тор) по сравнению со случаем чистого Ne (20–30 Тор). Максимум же средней мощности излучения при добавках HBr (0.22–0.28 Тор) сдвинут относительно максимума с добавкой H_2 на 10–15 Тор в сторону больших давлений Ne . Этот факт интересен в прикладном плане, т. к. известно, что увеличение оптимального давления буферного газа Ne положительно влияет на ресурс работы активного элемента.

Эксперименты, проводимые с ГРТ диаметром 3.8 см, показали, что увеличение давления буферного газа Ne от 15 до 100 Тор ведет к снижению давления оптимальных добавок H_2 , и HBr (рис.2). Это происходит из-за того, что возбуждение ГРТ при давлении Ne как 15, так и 100 Тор производилось при постоянном напряжении источника питания 7 кВ, в то время как с увеличением давления растет напряжение пробоя. Поэтому для получения максимальных выходных характеристик лазера в таких условиях следует повышать напряжение на ГРТ и концентрацию добавки H_2 (HBr). Это хорошо иллюстрируется рис.3. Из результатов, представленных на нем, следует,

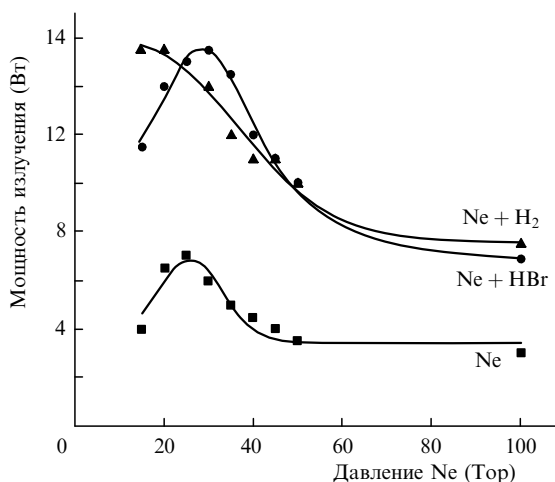


Рис.1. Зависимость мощности излучения CuBr-лазера (диаметр газоразрядной трубки 3.8 см) от давления буферного газа Ne при его работе в разряде с Ne без примесей и с добавками H₂, HBr. Напряжение источника питания во всех случаях составляет 7 кВ.

что с ростом напряжения на источнике питания при высоком давлении буферного газа растут давление оптимальной добавки водорода и выходная мощность излучения. Аналогичные результаты достигаются и с добавками HBr.

Эксперименты показали, что добавка H₂ должна быть больше, чем добавка HBr (рис.2). Возможное объяснение этого факта заключается в известной положительной роли молекул HBr в кинетике данного лазера. Данная молекула обладает большим сечением диссоциативного прилипания, что приводит к задержке импульса тока относительно приложенного напряжения в фазе активной накачки [4]. Конечно, при добавках водорода в разряде нарабатывается и HBr. Однако в нашем случае HBr подается в ГРТ в чистом виде, а при добавлении H₂ водороду (помимо необходимости реакции с бромом для образования HBr) приходится также вступать в химические реакции с другими компонентами плазмы.

Несколько слов о величине давления пара рабочего вещества – бромида меди (CuBr) (правильнее было бы писать Cu_nBr_n, где n изменяется от 1 до 3 [1, 2]). Результаты эксперимента свидетельствуют, что давление CuBr

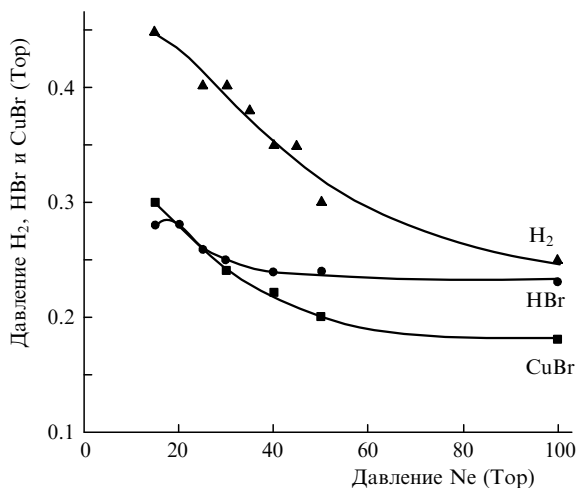


Рис.2. Зависимость давления паров CuBr и давления оптимальных добавок H₂ и HBr от давления буферного газа Ne для газоразрядной трубки диаметром 3.8 см.

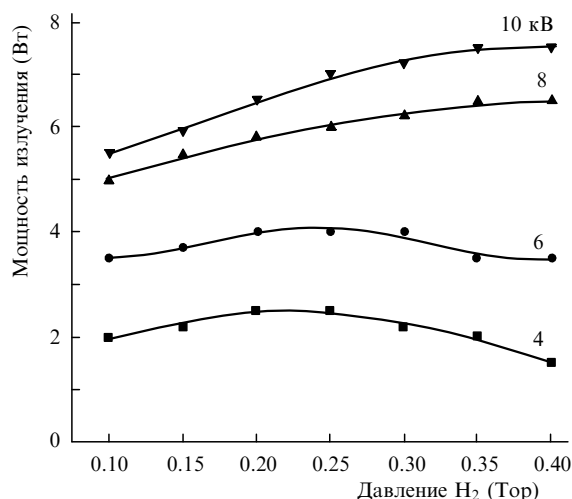


Рис.3. Зависимость мощности излучения CuBr-лазера (диаметр трубки 2.6 см) от давления добавки H₂ при различных напряжениях питания. Давление буферного газа Ne 100 Тор.

также понижается с повышением давления Ne, что, по-видимому, является следствием недостаточно высокого напряжения, реализуемого на разрядном промежутке.

Ранее при масштабировании мощности накачки (от 1 до 5 кВт) CuBr–Ne–H₂-лазера с ГРТ диаметром 2.6 см и длиной активной зоны 76 см [11] было установлено, что повышение энерговклада в разряд требует больших добавок водорода (от 0.3 до 0.4 Тор). В данном случае рост энерговклада связан, в основном, с увеличением разрядного тока, вследствие чего повышается концентрация электронов, а также ее предимпульсное значение. Отсюда следует, что для эффективной релаксации плазмы в процессе послесвечения необходимо большее количество водорода.

Представлялось интересным выяснить, как ведет себя величина активной добавки при изменении диаметра трубки. Из рис.4 следует, что с увеличением диаметра ГРТ давление оптимальной добавки H₂ линейно растет. Очевидно, это связано с тем, что в узких трубках наряду с объемной релаксацией плазмы в межимпульсный период имеет место и пристеночная релаксация вследствие диффузии частиц к стенке ГРТ. В трубках большего диаметра для ускорения процессов релаксации требуются большие добавки активных примесей.

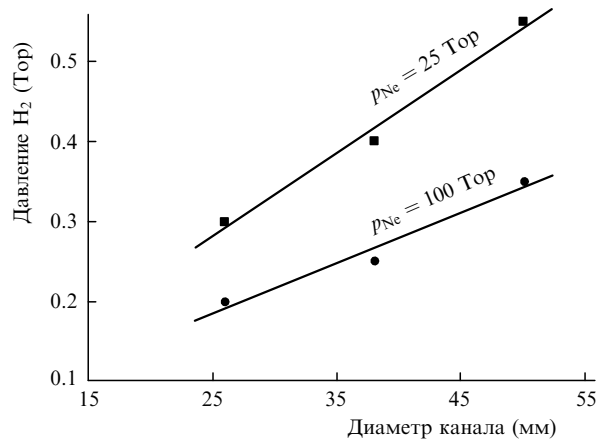


Рис.4. Зависимость давления оптимальной добавки H₂ от диаметра канала газоразрядной трубки при различных давлениях буферного газа Ne p_{Ne}.

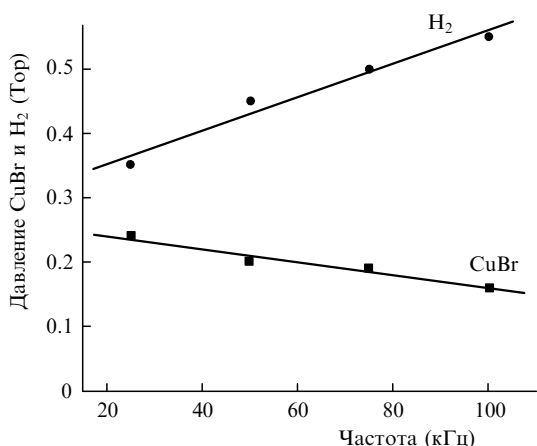


Рис. 5. Зависимость оптимального давления паров CuBr и добавки H₂ от частоты следования импульсов CuBr-лазера (диаметр трубки 2.6 см).

Аналогичная картина наблюдается и при увеличении частоты следования импульсов накачки (рис. 5), поскольку межимпульсный интервал сокращается и для ускорения процессов релаксации плазмы (в первую очередь по электронной компоненте) требуется увеличить добавку. Оптимальная же концентрация активного вещества CuBr снижается с ростом частоты. Это, по-видимому, обусловлено тем, что с уменьшением межимпульсного интервала не все атомы меди связываются в бромид меди и идет накопление свободных атомов меди. Важно отметить, что при переходе к высоким частотам следования импульсов приходится снижать напряжение, например на частоте 100 кГц, с 6–7 до 4 кВ. А значит, при переходе к малым рабочим емкостям и поддержании напряжения на заданном уровне следует ожидать дополнительного увеличения давления добавки H₂. К сожалению, реальные коммутаторы (в данном случае это таситроны) не позволяют реализовать высокое напряжение на частотах более 50 кГц.

Сравнение полученных нами выходных характеристик CuBr–Ne- и CuBr–Ne–H₂-лазеров (объем 400 см³) [11] с характеристиками ЛПМ приблизительно такого же объема – лазера «Кристалл» LT 40Cu (объем 350 см³) показывает, что CuBr-лазер с добавкой H₂ даже при энерговыделении 12.5 Вт/см³ уступает по мощности ЛПМ. При удельной вводимой в разряд мощности 11 Вт/см³ мощность излучения стандартного ЛПМ LT 40Cu составляет 40 Вт [12], что вдвое больше мощности CuBr-лазера. Вместе с тем, имея такую же мощность (4 кВт) для накачки активного элемента CuBr-лазера существенно большего объема (до 4 × 10³ см³), можно получить выходную мощность свыше 40 Вт и значительно больший КПД [13–15]. Стоит также отметить, что приведенные в работе [12] мощности для ЛПМ получены по схеме Блюмляйна с удвоением напряжения и сжатием импульса накачки.

4. Выводы

В работе экспериментально показано, что добавки как HBr, так и H₂ увеличивают выходную мощность CuBr–Ne-лазера, и для достижения максимальной мощ-

ности генерации требуются большие концентрации H₂, чем HBr.

Установлено, что в одинаковых условиях накачки оптимальное давление вводимого H₂ при высоких давлениях буферного газа (~100 Тор) меньше, чем при низких давлениях Ne (25 Тор) вследствие повышения напряжения пробоя. Увеличение рабочего напряжения и давления добавки H₂ приводит к увеличению выходной мощности, которая приближается к мощности излучения при низких давлениях Ne.

Увеличение мощности накачки требует больших оптимальных давлений добавки активной примеси (H₂ или HBr).

Эксперименты с трубками разного диаметра показали линейную зависимость давления вводимой добавки от диаметра ГРТ и частоты следования импульсов накачки, обусловленную процессами релаксации плазмы в межимпульсный интервал. В то же время оптимальное давление рабочего вещества уменьшается с увеличением частоты следования, что может быть связано с накоплением свободных атомов меди при сокращении межимпульсного интервала.

Преимущества лазера на парах бромида меди с активными добавками по сравнению со стандартным ЛПМ станут более заметными при использовании активных элементов больших объемов.

Работа выполнена при поддержке Программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)», грант Минобрнауки № 5450.

Авторы выражают свою признательность Г.Г. Петрашу за проявленный интерес к работе и полезные дискуссии.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И. Молодых Э.И. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М.: Научная книга, 1998).
2. Little C.E. *Metal Vapor Lasers. Physics, Engineering & Applications* (Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 1998).
3. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. *Лазеры на парах меди* (М.: Физматлит, 2005).
4. Isaev A.A., Jones D.R., Little C.E., Petrash G.G., Whyte C.G., Zemskov K.I. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 919 (1997).
5. Withford M.J., Brown D.J.W., Mildren R.P., Carman R.J., Marshall G.D., Piper J.A. *Progr. Quantum Electron.*, **28**, 165 (2004).
6. Sabotinov N.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5120**, 30 (2003).
7. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. *Квантовая электроника*, **34**, 625 (2004).
8. *Лазеры на парах металлов и их галогенидов*. Под ред. Г.Г. Петраша. *Труды ФИАН*, **181**, (1987).
9. Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. Активный элемент лазера на парах галогенида металла. *Изобретения*, № 36, 6 (2004).
10. Sabotinov N.V., Kostadinov I.K., Bergmann H.W., Salimbeni R., Mizeraczyk J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 203 (2001).
11. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б. *Оптика атмосферы и океана*, **19**, 221 (2006).
12. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Угольников С.А., Королева М.Е., Казарян М.А. *Квантовая электроника*, **31**, 191 (2001).
13. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. *Оптика атмосферы и океана*, **2**, 1228 (1989).
14. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 705 (1997).
15. Евтушенко Г.С., Костыря И.Д., Суханов В.Б., Шиянов Д.В. *Квантовая электроника*, **31**, 704 (2001).