

Влияние добавки метана на характеристики лазера на парах бромида меди

Д.В. Шиянов¹, Ф.А. Губарев^{1,2}, Г.С. Евтушенко²,
В.Б. Суханов¹, О.С. Андриенко^{1*}

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

²Томский политехнический университет
634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 27.07.2009 г.

Экспериментально исследована возможность использования метана в качестве активной примеси в лазере на парах бромида меди. Установлено существенное увеличение средней мощности генерации и оптимальной частоты следования импульсов. В газоразрядной трубке диаметром 1,5 см и длиной 36 см на частоте следования 20 кГц мощность излучения увеличилась вдвое – с 0,8 до 1,6 Вт. Проводится аналогия влияния добавки метана с добавками H_2 и HBr . Предполагается, что основное влияние оказывает электроотрицательная молекула HBr , которая образуется в плазме $CuBr+CH_4$ -лазера вследствие диссоциации молекулы метана и реакции водорода с бромом.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, метан, электроотрицательная молекула; copper bromide vapor laser, methane, electronegative molecules.

Введение

В последнее время одним из путей увеличения частотно-энергетических характеристик лазеров на парах металлов является способ, основанный на модификации кинетики их активной среды за счет использования галогеноводородных примесей. Качественные оценки [1], а также модельные расчеты [2, 3] показывают, что благодаря большому сечению диссоциативного прилипания электронов электроотрицательные молекулы HBr и HCl значительно снижают предимпульсную концентрацию электронов в газоразрядной трубке (ГРТ) лазера. Тем самым в фазе возбуждения создаются благоприятные условия для накачки лазерных уровней.

В зависимости от типа лазера молекулы HBr , HCl подаются в рабочую зону либо в чистом виде, либо образуются там за счет использования водородсодержащих добавок. Так, например, в лазере на парах меди с улучшенной кинетикой осуществляется прокачка буферного газа неона со смесью ($H_2 + HCl$). Это приводит к увеличению мощности излучения в 2–3 раза по сравнению с обычным лазером на парах меди [4]. В лазере на парах бромида меди (ЛПБМ) применяются добавки HBr (или H_2 , который реагирует в разряде с бромом и образует молекулы HBr). В этом случае достигается двукратное (и более) увеличение выходной мощности и КПД лазера [5–7]. В гибридном лазере HBr в чистом виде прокачивается с неоном через ГРТ.

Именно с таким лазером получен максимальный для лазеров на парах металлов КПД более 3% [8]. Во всех отмеченных случаях добавки увеличивают и область оптимальных частот следования импульсов (ЧСИ) лазеров.

Тем не менее и сегодня остается актуальной задача поиска новых водородсодержащих примесей, способных эффективно влиять на энергетику лазеров на парах металлов. При этом активные примеси должны быть просты и менее агрессивны, чем HBr , HCl , что важно при создании и эксплуатации прибора в целом.

В настоящей статье рассматривается возможность использования метана в качестве добавки в ЛПБМ.

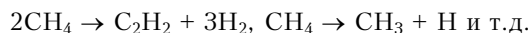
Предпосылки использования метана в качестве активной примеси в ЛПБМ

Привлекательность метана как активной примеси в ЛПБМ заключается в следующем.

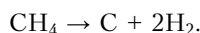
1. Молекула метана (CH_4) имеет максимальное удельное содержание водорода и, диссоциируя в разряде, способна реагировать с имеющимся в активной среде ЛПБМ бромом и образовывать необходимую электроотрицательную молекулу HBr .

2. Известно, что в процессе крекинга, основанного на термическом разложении углеводородов при температуре, близкой к рабочей температуре стенки ГРТ ЛПБМ – 500–700 °С, происходит разрыв $C-C$ -связей (более прочные $C-H$ -связи при такой температуре сохраняются) [9], т.е. происходит расщепление углеродной цепи крупных молекул с образованием соединений с более короткой цепью, например:

* Дмитрий Валерьевич Шиянов; Федор Александрович Губарев; Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpu.ru); Виктор Борисович Суханов; Олег Семенович Андриенко.



При температурах свыше 1000 °С, имеющих место на оси ГРТ, происходит разрыв не только С–С, но С–Н-связей:



Таким образом, указанные превращения постоянно сохраняют водород в С–Н-связях и представляют возможность при наличии в среде других реагентов отщепленному водороду вступать с ними в химические реакции (например, с бромом).

3. В настоящее время известно много работ, в которых рассматривается разложение метана в газовом разряде применительно к проблемам тонкого органического синтеза, процессов образования полимерных пленок, защитных покрытий, а также как наиболее дешевого способа получения углерода и H_2 [10–13]. Основная часть экспериментов выполнена для разрядов низкого давления, таких как ВЧ-, СВЧ-разряды, а также тлеющих разрядов, которые непосредственно используются в ЛПБМ. В указанных работах достаточно хорошо изучены, в том числе методом оптической эмиссионной спектроскопии, все плазмохимические превращения метана как в соударениях с электронами, так и с атомарным водородом, рассчитаны константы скоростей этих процессов. Немаловажен и тот факт, что результаты этих работ указывают на достаточно высокую концентрацию молекулярного водорода в разрядах низкого давления.

Исходя из этих соображений, мы предположили, что добавка метана в плазму ЛПБМ будет играть роль эффективного донора водорода, необходимого для увеличения частотно-энергетических характеристик CuBr -лазера.

Методика и результаты эксперимента

Для проведения исследований выбран активный элемент ЛПБМ с независимым нагревом контейнеров, наполненных порошком бромида меди. Конструкция газоразрядной трубки подробно описана в работе [5]. Длина ее рабочей зоны составляла 36 см, диаметр 1,5 см. ГРТ через кран соединялась с вакуумным постом, откуда осуществлялась подача буферного газа Ne и метана. Общее давление газа в ГРТ составляло 23 мм рт. ст. Добавка метана в ГРТ производилась либо во время работы лазера, и оптимальная ее величина определялась по максимуму мощности генерации, либо ГРТ насыщалась метаном непосредственно перед проведением измерений. На данном этапе исследования не ставилась задача определения оптимальной величины добавки CH_4 . Вместе с тем по манометру дифференциального типа CM4A со шкалой делением 1 мм рт. ст. можно было судить о том, что давление CH_4 в ГРТ не превышало 0,5 мм рт. ст.

Возбуждение ГРТ осуществлялось по традиционной схеме прямого разряда рабочей емкости типа КВИ-3 через коммутатор-тиратрон ТГИ1-1000/25 [7]. Регистрация импульсов тока, напряжения и ге-

нерации проводилась с помощью датчика тока Pearson Current Monitors 8450 (1В на 10А), пробника напряжения Tektronics P6015А (коэффициент деления 1:1000) и коаксиального фотоэлемента ФК-22 на осциллографе LeCroy WJ-324. Средняя мощность излучения контролировалась измерителем мощности Ophir 20C-SH, а температура стенки ГРТ – хромель-алюмелевой термопарой.

Исследование зависимости мощности излучения от частоты следования импульсов производилось в частотном диапазоне от 10 до 24 кГц. Верхняя граница определялась возможностями коммутатора. Для поддержания постоянной температуры стенки ГРТ на уровне 650–670 °С (что соответствует вкладываемой в разряд мощности 650–700 Вт) и напряжения питания на уровне 5,2–5,7 кВ приходилось уменьшать рабочую емкость с 1000 пФ на 10 кГц до 500 пФ на 24 кГц. Измерения проводились в следующем порядке. Сначала измерялась мощность в чистом буферном газе неоне без добавки метана, а затем повторялся весь цикл, но с добавкой CH_4 . На рис. 1 приведены зависимости мощности генерации от ЧСИ для этих случаев.

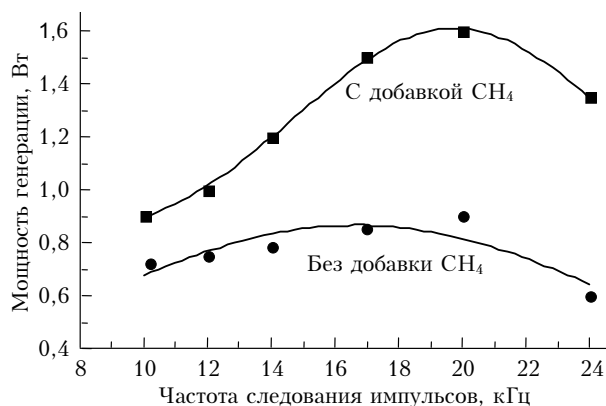


Рис. 1. Зависимость мощности излучения CuBr -лазера от частоты следования импульсов с добавкой и без добавки CH_4

Следует отметить, что в экспериментах использована ГРТ, которая находилась до этого в длительной эксплуатации и имела загрязненные выходные окна. Поэтому полученные значения средней мощности генерации не являются максимальными для CuBr -лазера такого активного объема.

Из полученных результатов видно, что введение добавки метана приводит к существенному увеличению средней мощности генерации и оптимальной частоты следования импульсов генерации. Аналогичная картина наблюдалась ранее и в ЛПБМ с добавками H_2 [7] и HBr [5, 14]. Это указывает на то, что в присутствии активной добавки релаксация плазмы в межимпульсный период происходит гораздо быстрее и, следовательно, благоприятные условия для накачки лазерных уровней создаются за более короткий межимпульсный интервал.

Исследование зависимости мощности излучения лазера (с добавкой метана и без нее) от напряжения источника питания осуществлялось в диапа-

зоне от 2 до 6 кВ с шагом 1 кВ. Потребляемая ГРТ мощность поддерживалась на постоянном уровне. При этом рабочая емкость изменялась от 500 пФ на 6 кВ до 4700 пФ на 2 кВ. Указанные зависимости приведены на рис. 2.

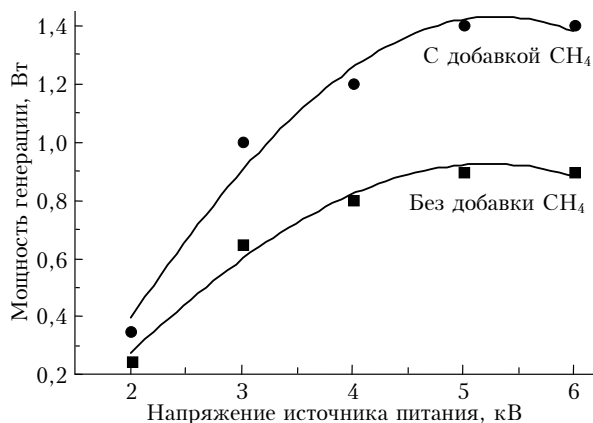


Рис. 2. Зависимость мощности излучения CuBr-лазера от напряжения источника питания с добавкой и без добавки CH₄

Здесь также прослеживается аналогия с CuBr + H₂- и CuBr + HBr-лазерами [14]. Значительно эффективнее добавки метана работают при более высоких напряжениях. Известно, что электроны с энергией менее 2 эВ не способны эффективно возбуждать верхние лазерные уровни атомов меди. Если принять во внимание, что на фронте импульса накачки имеет место процесс диссоциативного прилипания электронов к молекулам HBr, то это приводит к «затруднению» развития разряда. Или, что то же, — росту рабочего напряжения. Как и в случае CuBr+H₂- и CuBr+HBr-лазеров, появляется дополнительная задержка тока относительно напряжения. В разряде без добавки CH₄ она составляет 10 нс, а с добавкой — 25 нс (рис. 3).

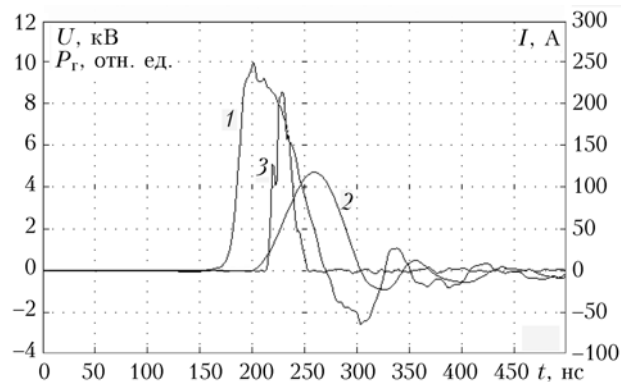
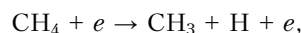


Рис. 3. Осциллограмма импульсов напряжения (1), тока (2) и генерации (3) CuBr-лазера, работающего на ЧСИ 18,7 кГц. Напряжение источника питания 5,1 кВ, ток 0,135 А. Мощность генерации 1,35 Вт

Опираясь на сходство поведения частотно-энергетических характеристик CuBr+CH₄-лазера и характеристик CuBr+H₂- и CuBr+HBr-лазеров,

можно заключить, что молекулы метана обеспечивают необходимое количество водорода в плазме лазера, который впоследствии связывается в HBr. Вероятнее всего, наряду с термической диссоциацией CH₄, имеющей место при типичных условиях работы лазеров на парах галогенидов металлов [9], образование водорода происходит в соударениях метана с электронами по следующим основным каналам:



Причем возможна и дальнейшая диссоциация низших углеводородов типа CH₃ и CH₂.

Заключение

На основании экспериментальных исследований частотно-энергетических характеристик CuBr + Ne + CH₄-лазера в сравнении с CuBr + Ne + H₂- и CuBr + Ne + HBr-лазерами можно сделать вывод о схожести механизма влияния добавки метана с влиянием водорода или бромводорода. Наиболее вероятно, что основную роль играет электроотрицательная молекула HBr, образовавшаяся при взаимодействии с водородом после диссоциации молекулы CH₄.

В ходе экспериментов не было выявлено образования значительного количества углерода, что могло бы негативно повлиять на эффективность работы лазера.

Работа выполнена при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект № 2.1.2/1425.

1. 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 HBrID lasers // IEEE J. Quantum. Electron. 1997. V. 33. N 6. P. 919–926.
2. Carman R.J., Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A. Modelling the plasma kinetics in a kinetically enhanced copper vapor laser utilizing HCl+H₂ admixture // IEEE J. Quantum. Electron. 2000. V. 36. N 4. P. 438–449.
3. Жданев О.В. Моделирование процессов в лазерах на парах меди с модифицированной кинетикой: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТПУ, 2004. 231 с.
4. Withford M.J., Brown D.J.W., Mildren R.P., Carman R.P., Marshall G.D., Piper J.A. Advances in copper laser technology: kinetic enhancement // Progr. in Quantum. Electron. 2004. V. 28. N 3–4. P. 165–196.
5. 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.
6. 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.
7. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Бочков В.Д., Кудинов В.Н. Экспериментальные исследования влияния добавок водорода на частотные и энер-

- гетические характеристики CuBr-лазера // Изв. ТПУ. 2004. Т. 307. № 3. С. 74–77.
8. Jones D.R., Maitland A., Little C.E. A high-efficiency 200 W average power copper HуBrID laser // IEEE J. Quantum. Electron. 1994. V. 30. N 10. P. 2385–2390.
 9. Ким А.М. Органическая химия. Новосибирск: Сиб. университет. изд-во, 2002. 971 с.
 10. Петров О.В., Поринев П.И., Жданок С.А. Исследование возможности разложения метана в газовом разряде // Инженерно-физ. ж. 1998. Т. 71. № 6. С. 1016–1023.
 11. Бабарицкий А.И., Герасимов Е.Н., Демкин С.А., Животов В.К., Книжник А.А., Потанкин Б.В., Русанов В.Д., Рязанцев Е.И., Смирнов Р.В., Шолун Г.В. Импульсно-периодический СВЧ-разряд как катализатор химической реакции // Ж. техн. физ. 2000. Т. 70. Вып. 11. С. 36–41.
 12. Денисова Н.В., Постников Б.В., Фомин В.М. Поперечный тлеющий разряд в сверхзвуковом потоке в воздухе и метане // Физ. плазмы. 2006. Т. 32. № 3. С. 281–288.
 13. Автаева С.В., Лапочкина Т.М. Характеристики молекулярного водорода и СН*-радикала в плазме метана в высокочастотном емкостном разряде магнетронного типа // Физ. плазмы. 2007. Т. 33. № 9. С. 846–858.
 14. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б. Влияние состава газовой смеси и условий накачки на характеристики CuBr–Ne–H₂(HBr)-лазера // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 1. С. 49–52.

D.V. Shiyanov, F.A. Gubarev, G.S. Yevtushenko, V.B. Sukhanov, O.S. Andrienko. **Influence of the methane addition on the copper bromide laser performance.**

The possibility of using the methane additive as an active admixture in copper bromide lasers is experimentally shown. Significant increasing of average lasing power and optimal pulse repetition rate is established when adding methane additives. In a gas discharge tube of 1.5 cm bore and 36 cm length at 20 kHz pulse repetition rate the output power doubled from 0.8 to 1.6 watts. In the paper, an analogy of methane additive influence is drawn with additives of H₂ and HBr. It's suggested that the main effect is connected with HBr electro-negative molecules, produced in plasma of CuBr+CH₄-laser as a result of methane molecule dissociation and reaction of hydrogen with bromine.