

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ МНОГОПОЛОСНЫХ ЭКСИЛАМП БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА МОЛЕКУЛАХ $KrCl^*$, Cl_2^* , Br_2^*

С.М. Авдеев¹, Э.А. Соснин^{1,3}, А.А. Смирнов³, В.Ф. Тарасенко¹⁻³

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

²Томский политехнический университет

³Томский государственный университет

Впервые измерены энергетические и спектральные характеристики эксилламп барьерного разряда на тройных смесях Ar-Kr-Cl₂, Ar-Kr-Br₂. Спектры излучения представляют собой B→X полосу молекулы RX и D'→A' молекулы X₂*, где R – атом инертного газа, а X – атом галогена. В условиях, когда интенсивность этих полос сопоставима, достигнуты мощность 1,8 Вт и эффективность излучения ~1,7 %. Низкая эффективность излучения связана со спецификой формирования указанных молекул.*

Ключевые слова:

Барьерный разряд, эксиллампа, многополосное излучение.

Key words:

Barrier discharge, excimer lamp, multiwavelength radiation.

Одним из интересных направлений в разработке эксилламп является изучение рабочих сред, излучающих одновременно несколько молекулярных полос разных эксиплексных и/или эксимерных молекул. Например, многополосное излучение было получено в условиях тлеющего разряда низкого давления [1], в барьерном разряде [2–4] и т. д. Многополосное излучение открывает новые возможности для научного и практического применения эксилламп.

При всем богатстве данных об излучении описанных систем имеется ряд проблем, мешающих созданию надежных и стабильных многополосных эксилламп, столь же пригодных для практического применения, как получившие широкое применение однополосные XeCl-, KrCl-, Xe₂-эксилламп [5].

Во-первых, необходимо обеспечение высокого срока службы рабочих смесей. В тлеющем и поперечном разряде низкого давления он не превышает в среднем десятков часов, поскольку в этом случае галоген (имеющий, обычно, низкое процентное содержание в смеси) взаимодействует с электродами лампы. В качестве решения традиционно предлагается использовать химически инертные галогеносители. Но даже тогда, например, в эксиллампе на смеси Xe-Br₂-I₂ ресурс работы не превышает 300...400 ч [6]. Самым действенным подходом является использование безэлектродных ламп барьерного и емкостного разряда, в которых электроды отделены от газовой смеси диэлектрическими стенками колбы. В этом случае сроки службы рабочих смесей увеличиваются на порядки [7].

Во-вторых, после того, как принципиальная возможность получения многополосной люминесценции в той или иной газовой смеси показана, необходимо сравнение ее энергетических характеристик с эксиллампами, излучающими на одной рабочей молекуле R₂* или RX*. Это связано с тем, что по эффективности люминесценции многополосная эксиллампа может существенно уступать одно-

полосной в силу разветвления каналов передачи энергии, увеличения количества реакций тушения одних рабочих молекул другими и промежуточными частицами и т. д. И это, как и при низком ресурсе эксилламп, может заметно сузить сферу практического применения такого источника излучения.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование энергетических и спектральных характеристик ультрафиолетовых эксилламп барьерного разряда (БР) на смесях Ar-Kr-Cl₂, Ar-Kr-Br₂. Насколько нам известно, ранее специально такая смесь в условиях БР не исследовалась.

Эксперименты проводились на установке, подобной той, что была описана нами в [8]. Использовались эксилламп коаксиальной конструкции, выполненные из кварцевых трубок марки КУ–1 диаметрами 2,2 и 4,6 см. Длина и площадь излучающей поверхности колбы составляли 12 см и 162 см² соответственно. Возбуждение газовой среды осуществлялось импульсным напряжением с амплитудой до 4,8 кВ и частотой $f=60$ кГц. Спектр излучения разряда регистрировался спектрометром высокого разрешения HR4000 (Ocean Optics B.V.) в диапазоне 200...300 нм. Мощность излучения ламп в диапазоне $\lambda=200...350$ нм определялась с помощью фотоприемника HAMAMATSU H8025–222 (с максимумом спектральной чувствительности на 222 нм), а мощность разряда – по осциллограммам импульсов напряжения и тока, так, как описано в [8].

Изучение оптических характеристик плазмы на основе многокомпонентных смесей является многопараметрической задачей и экспериментально трудоемкой. Потому на первом этапе нами была проведена оптимизация бинарных смесей Kr-Cl₂=(100...500)/1, Ar-Cl₂=(100...500)/1, направленная на достижение максимальных энергетических характеристик излучения. В результате было установлено, что наибольшие мощности и эффек-

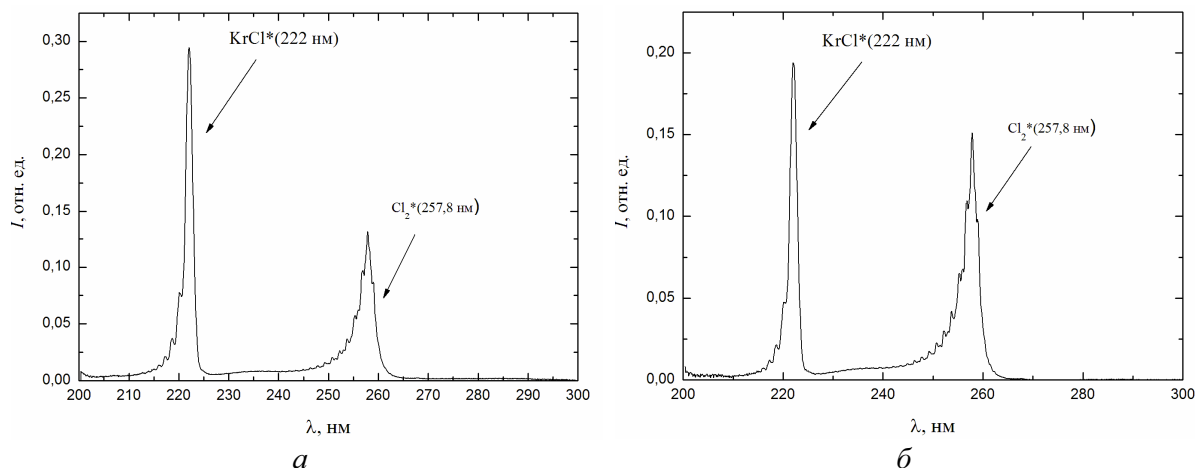
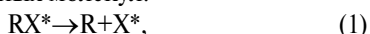


Рис. 1. Спектр излучения плазмы барьерного разряда в смеси Ar/Kr/Cl₂: а) 250/1/1; б) 250/2/1. Давление p=34,6 кПа

тивности излучения указанных смесей в плазме БР достигаются при соотношении 250/1.

В спектре излучения KrCl-эксилампы барьерного разряда наряду с интенсивной В→Х полосой, есть слабо выраженная D'→A' полоса излучения дигалогена Cl₂* (257,8 нм). Это говорит о наличии процессов преддиссоциации – безызлучательного распада эксиплексных молекул:



где RX* – эксиплексная молекула; R – атом инертного газа и X* – возбужденный атом галогена. В то же время известно [9], что основным каналом образования возбужденных молекул галогена является реакция:



где X₂* – возбужденная молекула галогена. Реакции (1) и (2) являются основными каналами образования возбужденных молекул дигалогенов [4, 9]. Поэтому о степени преддиссоциации эксиплексной молекулы можно судить по интенсивности полос излучения молекул дигалогенов, т. е. по отношению полосы D'→A' молекул X₂* к интенсивности излучения В→Х полосы эксиплекса соответствующих молекул.

С учётом данных о механизмах образования эксиплексных молекул [4, 9] и реакций (1) и (2) можно составить схему основного канала образования X₂*.

Эффективность образования X₂* существенно уступает скорости возникновения эксиплексных молекул и зависит от степени преддиссоциации последних. И действительно, при R/X₂=250/1, соотношения KrBr*(B→X)/Br₂*(D'→A') и KrCl*(B→X)/Cl₂*(D'→A') составили 1/0,07 и 1/0,016 отн. ед., соответственно. Эти лампы можно считать однополосными.

На рис. 1–3 представлены данные, полученные при переходе от бинарных смесей к тройным, на примере смеси Ar-Kr-Cl₂. Анализ спектров излучения показывает, что, несмотря на малую долю криптона в смеси от 0,8 (рис. 1, а) до 0,4 % (рис. 1,

б) излучение В→Х полосы KrCl*(222 нм) остается преобладающим над излучением D'→A' перехода Cl₂* (258 нм). Это в свою очередь объясняется высокой эффективностью образования эксиплексной молекулы KrCl* по отношению к Cl₂*.

Зависимость мощности излучения Ar-Kr-Cl₂-эксилампы от давления представлена на рис. 2. Найдено, что с уменьшением доли криптона в рабочей смеси значения мощности и эффективности излучения тройной смеси Ar-Kr-Cl₂ стремятся по величине к энергетическим характеристикам излучения бинарной смеси Ar-Cl₂.

Достигнутые мощность и эффективность излучения в тройной смеси Ar/Kr/Cl₂=250/1/1, в которой при возбуждении барьерным разрядом реализуется режим сопоставимых по интенсивности полос излучения, составляют 1,2±0,1 Вт и 1±0,1 %, соответственно.

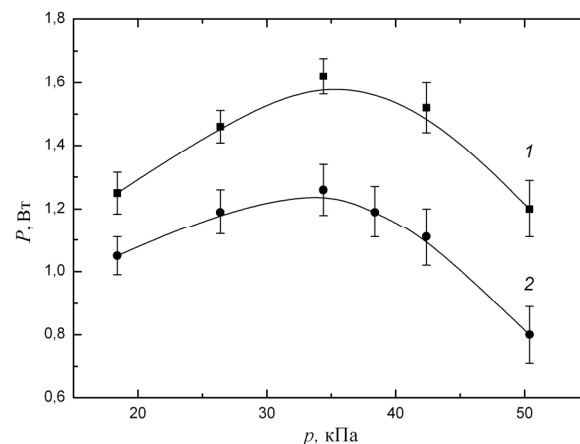


Рис. 2. Зависимость мощности излучения тройной смеси от давления. Смесь Ar/Kr/Cl₂: 1) 250/2/1; 2) 250/1/1

Аналогичные измерения были проведены и для смесей Ar-Kr-Br₂. На рис. 3 представлены спектры излучения, а на рис. 4 зависимость мощности излучения от давления смеси. Показано,

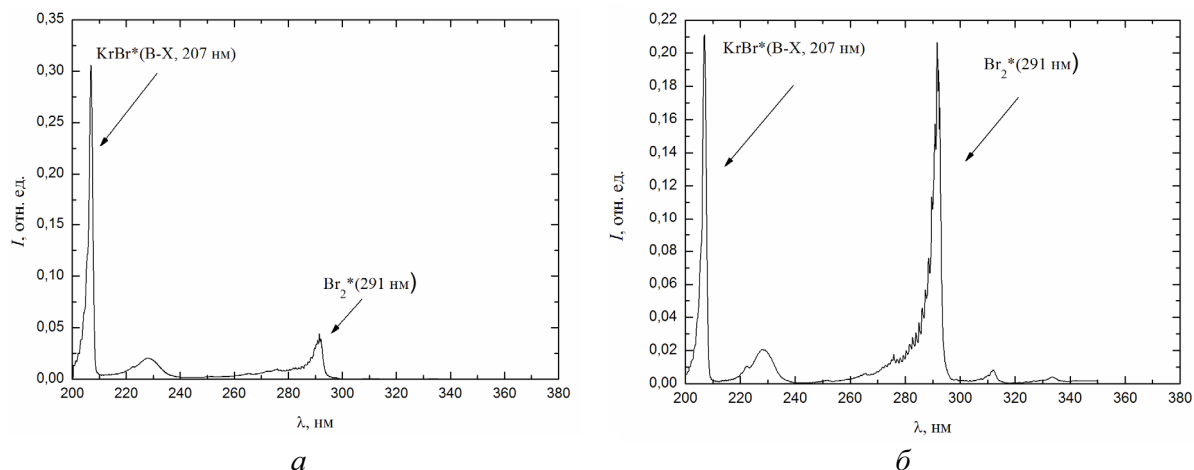


Рис. 3. Спектр излучения плазмы барьерного разряда в смеси: а) $Ar/Kr/Br_2=160/90/1$, $p=40$ кПа; б) $Ar/Kr/Br_2=240/10/1$, $p=43,9$ кПа

что сопоставимые по интенсивности излучения полосы $B \rightarrow X$ молекулы $KrBr^*$ (207 нм) и перехода $D' \rightarrow A'$ молекулярного брома Br_2^* (291 нм) формируются в случае, когда доля криптона в смеси составляет $\sim 4\%$ (рис. 3, б). Здесь за счет оптимального подбора концентраций Kr и Ar в тройной смеси, по-видимому, происходит выравнивание скоростей образования эксиплексных молекул $KrBr^*$ и возбужденных молекул Br_2^* , согласно схеме (2).

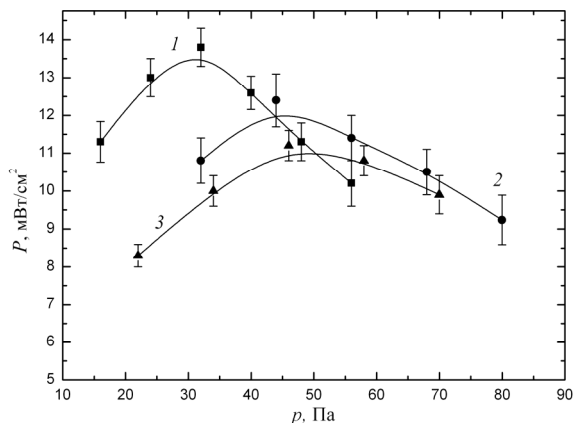


Рис. 4. Зависимость мощности излучения тройной смеси от давления. Смесь $Ar/Kr/Br_2$: 1) 160/90/1; 2) 240/10/1; 3) 245/5/1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевера В.С., Шуайбов А.К., Малинин А.Н., Герц С.Ю. Исследование эффективности образования моногалогенидов инертных газов в импульсном разряде через диэлектрик // Оптика и спектроскопия. – 1980. – Т. 49. – Вып. 5. – С. 1205–1206.
2. Шуайбов А.К. Оптическая диагностика активных сред электроразрядных источников излучения на атомах инертных газов и их галогенидах: автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Киев: Институт физики НАН Украины, 2003. – 16 с.
3. Zhang J.Y., Boyd I.W. Multi-wavelength excimer ultraviolet sources from a mixture of krypton and iodine in a dielectric barrier discharge // Appl. Phys. B. – 2000. – В. 71. – № 9. – Р. 177–179.

Дальнейшее снижение концентрации криптона в рабочей смеси приводило к уменьшению интенсивности излучения как полосы $B \rightarrow X$ $KrBr^*$ (207 нм), так и $D' \rightarrow A'$. Поскольку молекула $KrBr^*$ обладает преддиссоциацией большей, чем молекула $KrCl^*$, то вклад в процесс образования молекул Br_2^* за счет своего безызлучательного распада, согласно (1–3), в этих смесях выше, чем в смесях $Ar-Kr-Cl_2$. Такое заключение согласуется с зависимостью мощности излучения (рис. 4).

Достигнутые мощность и эффективность излучения в тройной смеси $Ar/Kr/Br_2=250/10/1$, в которой при возбуждении барьерным разрядом реализуется режим сопоставимых по интенсивности двух полос излучения, составляют $1,8 \pm 0,2$ Вт и $1,7 \pm 0,1\%$, соответственно.

Выводы

1. Впервые измерены энергетические и спектральные характеристики эксилламп барьерного разряда на тройных смесях $Ar-Kr-Cl_2$, $Ar-Kr-Br_2$.
2. Измерения оптических характеристик многополосных эксилламп показали, что эффективность их излучения не превышает $1,7\%$ при мощности $1,8$ Вт.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», г/к № 02.740.11.0444 и гранта Президента РФ НШ-4297.2010.2.

4. Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Суслов А.И., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Спектральные и энергетические характеристики многополосных $KrBr$ -эксилламп барьерного разряда // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – № 7. – С. 702–706.
5. Sosnin E.A., Tarasenko V.F. VUV and UV excilamps and their applications // Proc. SPIE. – 2006. – V. 6261. – P. 626136–1–626136–10.
6. Шуайбов А.К., Грабовая И.А. Электроразрядная лампа на парах брома и йода с непрерывным ультрафиолетовым излучением // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 20. – С. 82–87.
7. Соснин Э.А. Действие излучения газоразрядных эксилламп на жидкую и газовую фазы органических веществ: автореф.

- дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Томск: ГОУ ВПО «Томский государственный университет» и Институт сильноточной электроники СО РАН, 2009. – 43 с.
8. Соснин Э.А., Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Цветков В.М., Пиккулев А.А., Тарасенко В.Ф. Исследование энергетических характеристик КгСl-эксилламп барьерного разряда // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 2. – С. 109–112.
9. Авдеев С.М., Зверева Г.Н., Соснин Э.А. Исследование условий эффективной люминесценции I_2^* (342 нм) в барьерном разряде в смеси Кг- I_2 // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 105. – № 6. – С. 430–442.

Поступила 19.04.2010 г.

УДК 621.373.8

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ НАКАЧКИ CuBr-ЛАЗЕРОВ

М.В. Тригуб^{1,2}, С.Н. Торграев^{1,2}, В.Ф. Фёдоров²

¹Томский политехнический университет

²Институт оптики атмосферы им. акад. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: trigub@tpu.ru

Представлены результаты исследований полупроводниковых источников накачки для CuBr-лазеров различной геометрии. продемонстрирована возможность создания твердотельных высокочастотных (свыше 100 кГц) источников накачки. Проведены исследования схемы накачки при работе на активную нагрузку экспериментальным путем и моделированием в пакете прикладных программ PSpice.

Ключевые слова:

Лазер на парах металла, CuBr-лазер, источники накачки, моделирование.

Key words:

Copper vapor laser, CuBr-laser, pumping source, simulation.

Введение

Традиционно источники накачки для лазеров на парах металлов и, в частности, для лазеров на парах бромида меди, строились с использованием электровакуумных коммутаторов, которые обладают рядом недостатков: малый срок службы ключевого элемента, КПД на уровне 50...60 %, низкая частота работы [1]. С появлением на рынке мощных полупроводниковых приборов (IGBT и MOSFET) стало возможно создание твердотельных источников накачки, которые будут лишены недостатков традиционных схем.

В работе [2] представлен полупроводниковый источник накачки, источник постоянного напряжения (10 кВ, 1,4 кВт) и полупроводниковый коммутатор на основе IGBT транзисторов. Для сжатия импульсов накачки применяется двухзвенная схема магнитной компрессии. Коммутатор состоит из 10 последовательно соединенных IGBT транзисторов без выравнивающих цепей, обеспечивающих одновременное отпирание силовых элементов, что может вызвать выход из строя всего коммутатора при задержке отпирания одного из ключей. Частота следования импульсов накачки составляет 17 кГц, что значительно ниже оптимальной частоты следования импульсов для лазера на парах бромида меди [3].

В работе [4] описан полупроводниковый источник накачки CuBr-лазера, работающий с частотой 50 кГц. Схема состоит из однотипных ячеек, вклю-

ченных параллельно, каждая из которых включает в себя IGBT транзистор, накопительный конденсатор, диод и импульсный трансформатор. Вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно, что обеспечивает повышение напряжения на выходе. Данная схема лишена недостатков, присущих схеме [2], однако, возникает вопрос о величине предельной коммутируемой мощности. Авторами [4] источник применялся для накачки лазера с газоразрядной трубкой (ГРТ) малых размеров: длина активной зоны 300 мм, диаметр 15 мм.

Техника эксперимента

В настоящей статье приводятся результаты исследования полупроводниковых источников накачки лазеров на парах бромида меди при различной геометрии ГРТ, различной мощности накачки, повышенных частотах следования импульсов. Схема источника накачки представлена на рис. 1.

Для формирования высокого напряжения используются однотипные ячейки, которые включены параллельно, каждая из которых, как и в работе [4], включает в себя разделительный диод VD5, накопительный конденсатор C2, полупроводниковый коммутатор (IGBT или MOSFET), а так же импульсный трансформатор T1. Вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно, что обеспечивает суммирование напряжения на нагрузке. Дроссель L1 совместно с разделительными диодами обеспечивают резонансную зарядку нако-