

С.М. Авдеев, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко

Формирование импульсов излучения малой длительности в ХеВr-эксилампах барьерного разряда

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 25.11.2005 г.

Экспериментально исследованы условия формирования импульсов излучения малой (десятки наносекунд) длительности в плоских ХеВr-эксилампах, возбуждаемых барьерным разрядом. Получены данные о влиянии давления и состава смеси, а также межэлектродного промежутка на мощность и длительность импульса излучения. В эксилампе с разрядным промежутком 8 мм, в смеси Хе : Вг₂ = 35 : 1 при давлении 156 торр получены импульсы излучения на длине волны 282 нм с длительностью на полувысоте 55 нс.

Введение

Эксилампа – это газоразрядный источник ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового излучения на основе неравновесного спонтанного излучения эксимерных или эксиплексных молекул [1–3]. Эксилампы обладают сравнительно узким спектром излучения – около 80% энергии сосредоточено в полосе В–Х излучения соответствующей молекулы. Наибольшее внимание привлекают эксилампы барьерного разряда. Это обусловлено тем, что эксилампы барьерного разряда имеют ряд преимуществ по сравнению с эксилампами, возбуждаемыми другими типами разряда, а именно:

– позволяют получать мощное и эффективное спонтанное излучение на различных эксимерных и эксиплексных молекулах;

– в широких пределах позволяют изменять среднюю энергию и концентрацию электронов в разрядном промежутке, а также удельную мощность возбуждения оптической среды;

– в силу конструктивных особенностей обладают возможностью масштабирования и задания произвольной геометрии;

– ввиду отсутствия контакта электродов с рабочей смесью имеют большой срок службы отпаянных излучателей (тысячи часов).

Благодаря этим свойствам эксилампы барьерного разряда широко применяются в научных исследованиях и на практике [4–6].

Известно, что при повышенных давлениях длительность импульса излучения в барьерном разряде сокращается. Например, в эксилампе барьерного разряда на молекулах Хе₂^{*} ($\lambda = 172$ нм) была получена длительность импульса излучения на полувысоте из отдельного филамента около 5 нс [7]. Имеются и другие работы (см., например, [8]), где исследовались эксилампы с малой длительностью импульса излучения. Однако авторы этих работ не ставили своей целью изучение условий, в которых импульс излучения имеет минимальную длительность, а импульсная мощность излучения макси-

мальна. Из предварительного анализа известных работ [7–10] можно сформулировать условия, в которых реализуются короткие длительности импульса излучения:

1) наносекундная длительность импульса возбуждения (времени протекания разрядного тока через промежуток);

2) высокое давление рабочей смеси и возможно высокая концентрация молекул галогена, которые эффективно разрушают эксиплексные молекулы;

3) формирование в разрядном промежутке диффузных конусообразных микрозарядов или объемного разряда.

Цель данной работы – провести систематическое исследование условий формирования импульсов излучения малой длительности в ХеВr-эксилампе, возбуждаемой барьерным разрядом. Для исследований были выбраны плоские эксилампы, излучение которых более легко фокусируется сферической оптикой.

1. Экспериментальная аппаратура и методики

В экспериментах использовались два излучателя эксилампы различной конструкции с разрядными промежутками 5 (рис. 1, а, эксилампа 1) и 12 мм (рис. 1, б, эксилампа 2).

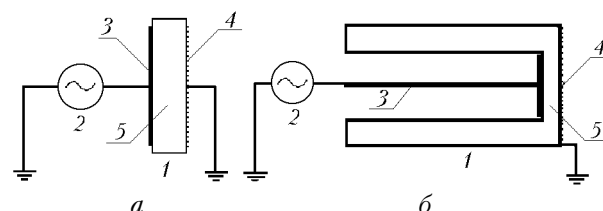


Рис. 1. Схемы ХеВr-эксиламп 1 (а) и 2 (б), возбуждаемых барьерным разрядом: 1 – кварцевая колба; 2 – импульсный источник питания; 3 – металлический электрод; 4 – перфорированный металлический электрод; 5 – область горения разряда

Формирование импульсов излучения малой длительности в ХеВr-эксилампах барьерного разряда

163

Данные эксилампы отличались размерами буферного объема и размерами электродов. Эксилампа 2 имела больший буферный объем, что существенно увеличивало срок службы отпаянного излучателя. Колбы эксиламп были выполнены из кварца (Fused Quartz, Type 214, «General Electric»), имеющего пропускание на рабочей длине волны 282 нм примерно 90%. Пространство в колбе заполнялось газовой средой, состоящей из ксенона и брома. Излучение выводилось через перфорированный электрод 4 (рис. 1), представляющий собой металлическую сетку с коэффициентом пропускания 60%. Конструктивно эксилампы отличались не только величиной разрядного промежутка d_{12} , но и площадью электродов. Площадь электродов 3 и 4 эксилампы 1 составляла 9 см². В эксилампе 2 площадь внутреннего электрода 3 и внешнего (перфорированного) 4 составляла 3,78 и 23,75 см² соответственно. Это обусловило различия в протекании разряда. При изменении давления область разряда в эксилампе 2 могла расширяться в сторону буферного объема.

В качестве источника питания применялся высокочастотный импульсный генератор с частотой следования импульсов 100 кГц и напряжением холостого хода 9 кВ. Этого напряжения было достаточно для зажигания разряда. Напряжение на промежутке в импульсно-периодическом режиме зависело от состава и давления смеси и в оптимальных режимах составляло 6–7 кВ. Спектр излучения регистрировали спектрометром StellarNet EPP2000-C25.

Регистрацию импульса излучения проводили с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22 СПУ с известной спектральной чувствительностью, сигнал с которого подавался на четырехлучевой осциллограф TDS-224. Осциллограммы тока и напряжения регистрировались с помощью токового шунта и делителя напряжения тем же осциллографом. На рис. 2 представлены типичные для данных эксиламп осциллограммы импульсов напряжения, тока и излучения.

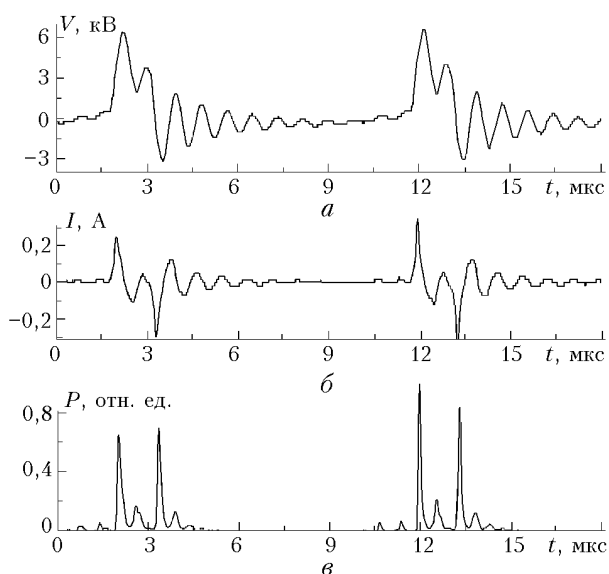


Рис. 2. Осциллограммы импульсов: напряжения (а), тока разряда (б) и излучения (в). Эксилампа 2, $p = 129$ торр, Хе : Вг = 35 : 1, $\tau(0,5) = 92$ нс

Удельная плотность средней мощности излучения измерялась при помощи фотоприемника HAMAMATSU H8025-222 на расстоянии 5 мм от поверхности излучения в случае использования эксилампы 1 и на расстоянии 0,5 мм от поверхности излучения – эксилампы 2.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 3 представлены спектры излучения S барьерной ХеВг-эксилампы, содержащие полосы В–Х- (с длинным коротковолновым крылом), D–Х- и В–А-переходов с максимумами соответственно на 282, 221 и 325 нм [3].

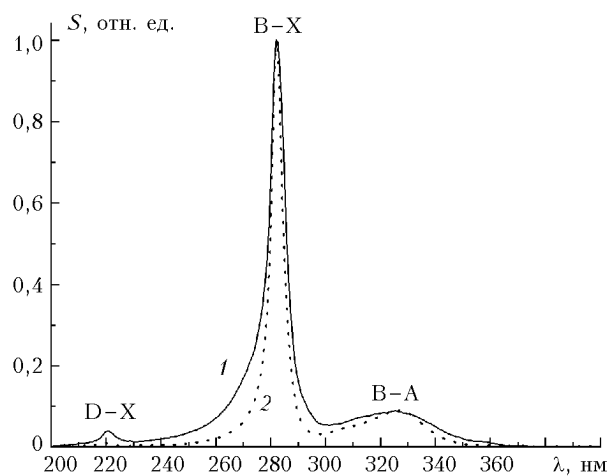


Рис. 3. Спектры излучения барьерных ХеВг-эксиламп при различных концентрациях Вг₂ в смеси Хе : Вг = 35 : 1, $p = 192$ торр (1); Хе : Вг = 200 : 1, $p = 84$ торр (2)

Как и в работах [2, 3, 10], было зарегистрировано уменьшение вклада D–Х- и В–А-переходов (с ростом давления смеси) в суммарную мощность излучения эксилампы (при фиксированном отношении Хе : Вг₂ в смеси). Кроме того, с ростом давления уменьшается спектральная ширина В–Х-перехода (282 нм). Из представленных на рис. 3 спектров видно, что уменьшение концентрации Вг₂ в смеси ведет к аналогичному результату.

Зависимости длительности импульса излучения на полувысоте $\tau(0,5)$ от общего давления смеси p для эксилампы 1 (рис. 4) имеют оптимум по давлению. Ему соответствует такая форма разряда, при которой разрядный промежуток заполняет множество однородно-распределенных микрозарядов, имеющих форму цилиндров или конусов.

При более низких давлениях форма разряда меняется – микрозаряды начинают терять четкие границы вплоть до диффузного свечения плазмы, при этом $\tau(0,5)$ увеличивается. Это объясняется тем, что уменьшается величина pd_{12} и согласно экспериментальному закону Пашена для инициации разряда требуются все меньшие амплитуды напряжения, что приводит к увеличению длительности импульса тока и соответственно импульса излучения.

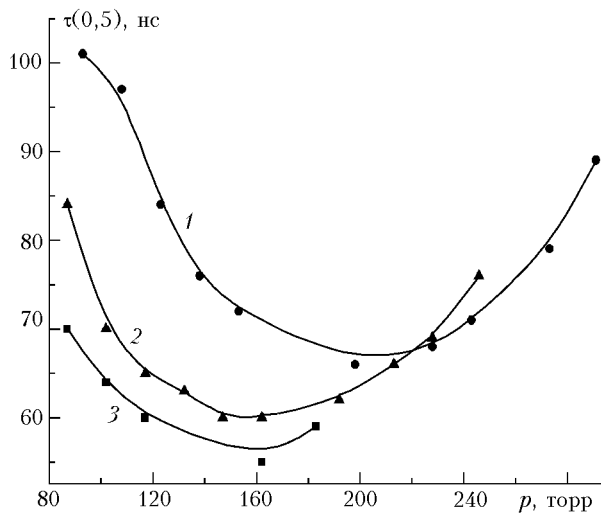


Рис. 4. Зависимости длительности импульса излучения на полувысоте $\tau(0,5)$ от общего давления смеси p для эксилампы 1 (кривая 1 – $\text{Xe}:\text{Br}_2 = 200:1$; 2 – $100:1$; 3 – $35:1$)

При увеличении давления появляются яркие ветвистые каналы, которые увеличивают длительность импульса излучения из-за изменения характера разряда. Эффективность эксилампы при этом уменьшается. Длина яркого канала может превышать величину разрядного промежутка d_{12} в 1,5–2 раза, что может также приводить к увеличению длительности импульса излучения. При больших давлениях разряд перестает зажигаться из-за недостаточного напряжения генератора возбуждения.

Зависимость удельной плотности излучения W эксилампы 1 от давления (рис. 5) также имеет экстремальный характер. Максимум W лежит в области давлений, близких по величинам к тем, при которых наблюдается минимум $\tau(0,5)$.

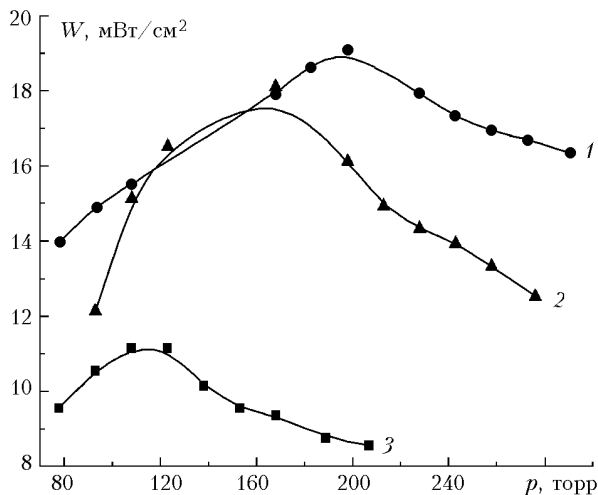


Рис. 5. Зависимость удельной плотности мощности излучения эксилампы 1 от общего давления, при различных концентрациях Br_2 в рабочей смеси (кривая 1 – $\text{Xe}:\text{Br}_2 = 200:1$; 2 – $100:1$; 3 – $35:1$)

Рост концентрации Br_2 в смеси приводит к существенному сокращению $\tau(0,5)$, но уменьшает мощ-

ность излучения. Это обусловлено большой скоростью тушения молекулами брома эксиплексных молекул XeBr^* . С увеличением концентрации молекул брома в рабочей смеси увеличивается скорость образования молекул XeBr^* , но при этом увеличивается и скорость их тушения. Минимальная длительность импульса $\tau(0,5) = 55$ нс в эксилампе 1 была получена в смеси $\text{Xe}:\text{Br}_2 = 35:1$ при давлении $p = 162$ торр.

Несколько иная ситуация наблюдается в эксилампе 2 с разрядным промежутком $d_{12} = 12$ мм. Здесь зависимость $\tau(0,5)$ от общего давления смеси (рис. 6) не имеет экстремального характера. Однако увеличение доли брома в смеси, как и в эксилампе 1, сокращает длительность импульса излучения и ухудшает условия пробоя – разряд зажигается при более низких p .

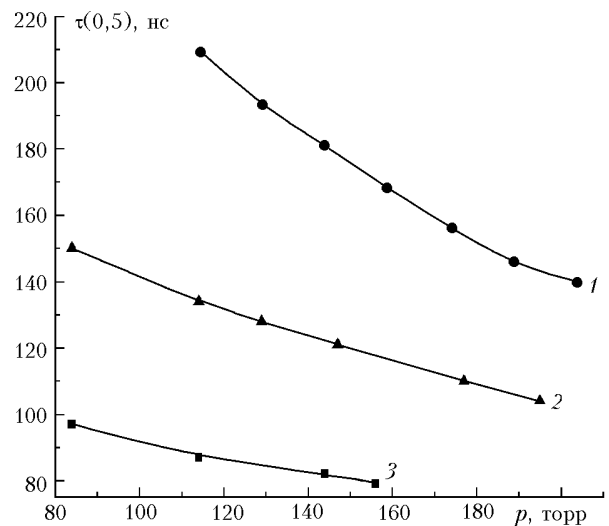


Рис. 6. Зависимости длительности импульса излучения на полувысоте $\tau(0,5)$ от общего давления смеси p для эксилампы 2 (кривая 1 – $\text{Xe}:\text{Br}_2 = 200:1$; 2 – $100:1$; 3 – $35:1$)

Различия между кривыми рис. 4 и 6, по-видимому, связаны с конструктивными особенностями эксиламп. Так, для эксилампы 2 помимо микроразрядов, возникающих непосредственно в разрядном промежутке, наблюдаются микроразряды, стекающие с краевой области внутреннего электрода 3 на края внешнего (перфорированного) электрода 4. По этой причине, в силу различия площадей электродов 3 и 4, происходит запаздывание в высвечивании краевых микроразрядов относительно центральных и световой импульс дополнительно удлиняется. Другой причиной может быть относительно большая величина $d_{12} = 12$ мм, которая не позволяет при данном напряжении генератора выйти в область более высоких давлений рабочей смеси.

Таким образом, минимальная длительность светового импульса $\tau(0,5) = 55$ нс была получена в эксилампе 1 при $\text{Xe}:\text{Br}_2 = 35:1$, $p = 162$ торр. В эксилампе 2 при тех же условиях получена $\tau(0,5) = 79$ нс. Это свидетельствует о том, что при прочих равных

условиях длительность импульса определяется величиной d_{12} . Минимальные длительности реализуются при меньших разрядных промежутках.

Заклучение

На примере двух плоских ХеВг-эксиламп барьерного разряда различных конструкций проведено экспериментальное исследование возможности получения световых импульсов малой длительности.

Показано, что основными параметрами эксилампы, влияющими на величину длительности импульса излучения, являются: концентрация брома в рабочей смеси, величина общего давления смеси, величина разрядного промежутка, конструкция электродов и их взаимное расположение. Таким образом, дальнейшее уменьшение длительности импульса излучения может быть достигнуто при уменьшении величины разрядного промежутка, увеличении общего давления, а также при увеличении амплитуды и сокращении длительности импульса возбуждения.

Эксилампы с малыми длительностями импульса могут применяться при создании диагностической аппаратуры, в системах передачи информации, для изучения быстро протекающих физических процессов, в фотохимии и в фотобиологии.

Авторы благодарят Д.В. Шитца за разработку импульсного генератора.

Данная работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 2706) и НТЦ «Реагент» (х/д-222/05).

1. Eliasson B., Kogelschatz U. Modelling and application of silent discharge plasmas // IEEE Trans. Plasma Science. 1991. V. 19. N 2. P. 309–329.
2. Kogelschatz U., Gellet B. Generation of excimer emission in dielectric barrier discharges // Appl. Phys. B. 1991. V. 52. N 1. P. 15–19.
3. Ломаев М.В., Скажун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. Эксилампы – эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
4. Oppenlander T. Applications of excimer lamps in photochemistry and in photochemical technology // Trends Chem. Eng. 2003. V. 8. P. 123–136.
5. Kogelschatz U. Excimer Lamps: history, discharge physics, and industrial applications // Proc. SPIE. 2004. V. 5483. P. 272–286.
6. Соснин Э.А., Авдеев С.М., Кузнецова Е.А., Лаврентьева Л.В. Бактерицидная КгВг-эксилампа барьерного разряда // Приборы и техн. эксперим. 2005. № 5. С. 111–114.
7. Kogelschatz U. Silent discharge for the generation of ultraviolet and vacuum ultraviolet excimer radiation // Pure & Appl. Chem. 1990. V. 62. N 9. P. 1667–1674.
8. Ерофеев М.В., Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. КгСl-эксилампы емкостного разряда с малой длительностью импульса излучения // Оптич. ж. 2001. Т. 68. № 10. С. 75–77.
9. Xu X. Dielectric barrier discharges – properties and applications // Thin Solid Films. 2001. V. 390. P. 237–242.
10. Лисенко А.А., Ломаев М.И. Спектры излучения эксиплексных ламп емкостного, барьерного и тлеющего разрядов в смесях Кг–Cl₂, Хе–Cl₂, Хе–Br₂, Хе–I₂ // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 3. С. 293–297.

S.M. Avdeev, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko. Formation of radiation pulses of short duration in planar ХеВг-excilamps pumped by a barrier discharge.

Conditions of formation of radiation pulses of short (tens nanosecond) duration in planar ХеВг-excilamps pumped by a barrier discharge are experimentally investigated. Data about influence of pressure and mixture, and also an interelectrode interval on the intensity and duration of a radiation pulse are obtained. In excilamp with a gap of 8 mm, in the mixture Хе:Br₂ = 35 : 1 at a pressure of 156 Torr, radiation pulses at $\lambda = 282$ nm with duration of 55 ns are received.