

04;07;12

О формировании импульсов наносекундной длительности в ХеВr-эксилампе барьерного разряда

© С.М. Авдеев, И.Д. Костыря, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 9 августа 2005 г.)

Приведены результаты исследований коаксиальных двухбарьерных эксиламп на молекулах ХеВr* ($\lambda \sim 282$ nm) с малой длительностью импульса излучения. При возбуждении рабочей смеси высоковольтным импульсным разрядом наносекундной длительности в смеси Хе/Вr₂ = 70/1 при общем давлении 1 atm получена импульсная мощность излучения ~ 100 kW и длительность импульса излучения на полувысоте 4.5 ns. Показано, что при малых зазорах между барьерами могут быть получены длительности импульса излучения на полувысоте ~ 20 ns при частоте следования импульсов до 200 kHz.

PACS: 42.72.-g

Введение

Эксилампа — это газоразрядный источник ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового излучения на основе неравновесного спонтанного излучения эксимерных или эксиплексных молекул [1–5]. Эксилампы обладают сравнительно узким спектром излучения, что отличает их от люминесцентных и тепловых источников спонтанного ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового излучения. В последние годы ставится задача создания эксиламп, имеющих длительность импульса излучения на полувысоте $\tau(0.5) \sim 10$ ns и менее. Кроме того, при короткой длительности импульса излучения одновременно требуется обеспечение высокой импульсной и/или средней мощности излучения. Такие источники могут найти широкое применение в различных областях, в частности, при создании диагностической аппаратуры.

Известны работы, в которых описаны эксилампы с длительностью импульса в десятки наносекунд. Так, в [6] была создана эксилампа, возбуждаемая объемным разрядом с искровой предыонизацией промежутка. При диаметре выходного пучка 10 см были получены значения импульсной плотности мощности 2, 0.5 и 1 kW/cm² на $\lambda \sim 308, 222$ и 350(250) nm соответственно и $\tau(0.5) \sim 50$ –200 ns. В целях увеличения яркости импульсного источника света в [7] использовалась L-образная конструкция колбы. В [8], чтобы повысить импульсную мощность эксиламп, был использован триггерный продольный разряд. Однако длительность импульсов излучения при общем давлении смеси 1 atm составляла в [8] 0.7–0.9 μ s. В [9] нами была описана однобарьерная импульсная КrCl-эксилампа, которая в лучших условиях обеспечивала $\tau(0.5) = 107$ ns, и удельную импульсную мощность 1.1 kW/cm². Мощность лампы падала в два раза после 10³ импульсов. В работе [10] предложена импульсно-периодическая эксилампа объемного разряда на смеси Ar-Cl₂, не требующая для

своей работы импульсного источника питания и обеспечивающая импульсы излучения с частотой 1–50 kHz и длительностью 100–300 ns.

Чтобы увеличить срок службы рабочей смеси, для получения коротких импульсов излучения в [11] было предложено использовать безэлектродные лампы емкостного разряда различной геометрии. Максимальное значение импульсной плотности мощности излучения КrCl-эксилампы составило 300 W/cm². В результате к настоящему времени не были получены длительности импульса излучения с $\tau(0.5) \leq 50$ ns при величине импульсной плотности мощности в десятки–сотни киловатт. Кроме того, в большинстве исследованных случаев не обеспечивается высокий срок службы рабочей смеси.

Цель настоящей работы — изучить возможность сокращения длительности импульса излучения ХеВr-эксилампы до единиц наносекунд. Работа продолжает наши исследования, начатые в [6,9,11,12].

Для проведения исследований была выбрана двухбарьерная коаксиальная эксилампа. Подобные эксилампы могут длительное время работать в отпаянном режиме [4]. Известно, что устройства барьерного разряда позволяют в широких пределах управлять величинами средней энергии и концентрацией электронов в разрядном промежутке за счет изменения начальной напряженности электрического поля на промежутке и выбора материала диэлектрического барьера [2]. Длительность импульса излучения определяется давлением и составом рабочей смеси, а также длительностью переднего фронта импульса возбуждения, причем максимальные мощности излучения достигаются при формировании диффузных конусообразных микроразрядов [13]. Подача импульса напряжения с крутым фронтом нарастания облегчает формирование однородного разряда, но требует существенного увеличения амплитуды импульса напряжения. Из предварительного анализа известных работ [2–13],

Параметры низковольтных источников напряжения

| Параметр | Источник 1 | Источник 2 |
|--|--------------|---------------|
| Полярность | Однополярный | Разнополярный |
| Амплитуда импульса напряжения, kV | ≤ 6 | ≤ 5 |
| Частота следования импульсов напряжения, kHz | 93 | 100 |
| Форма импульса | Меандр | Меандр |

можно было следующим образом сформулировать условия, в которых реализуются наносекундные длительности импульса излучения:

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

— высокое давление рабочей смеси и, возможно, высокая концентрация молекул галогена;

— формирование в разрядном промежутке диффузных конусообразных микроразрядов или объемного разряда.

Экспериментальная аппаратура и методики

Для выполнения этих условий были выбраны два типа генераторов.

Первый формировал импульсы напряжения с амплитудой до ~ 130 kV при длительности импульса на согласованной нагрузке ~ 2 ns, что обеспечивало быстрый пробой рабочей смеси на фронте импульса напряжения.

Упрощенная схема этого высоковольтного генератора показана на рис. 1. В схеме используется разрядник-обостритель 5, рассчитанный на пробой при 150 kV. Он включен последовательно с колбой эксилампы (7–10). Импульс высокого напряжения с длительностью фронта ~ 1 ns формируется на сопротивлении 6, шунтирующем эксилампу при разряде обострительной емкости 4 после пробоя газового промежутка 8 эксилампы. Эксилампа имеет коаксиальную конструкцию и

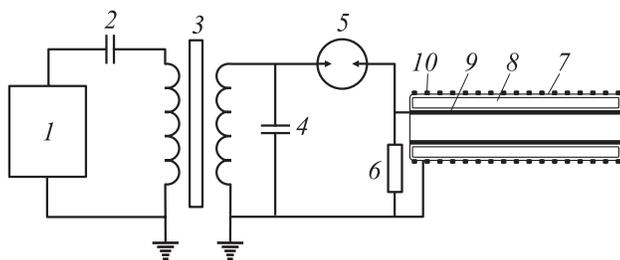


Рис. 1. Схема короткоимпульсный XeBr-эксилампы барьерного разряда: 1 — источник постоянного напряжения, 2 — накопительная емкость, 3 — импульсный трансформатор, 4 — обострительная емкость, 5 — разрядник-обостритель, 6 — резистор, 7 — колба эксилампы барьерного разряда, 8 — разрядный промежуток, 9 — внутренний сплошной электрод, 10 — внешний перфорированный электрод.

величину промежутка между внешней и внутренней стенкой ~ 6 mm.

Второй тип генераторов обеспечивал импульсно-периодическое напряжение с частотой следования импульсов до 200 kHz (таблица). Длительность переднего фронта импульса напряжения этих относительно низковольтных генераторов составляла десятки ns. Малая длительность импульса возбуждения обеспечивалась за счет быстрой зарядки емкости барьеров в эксилампе, а формирование однородного разряда — за счет уменьшения межэлектродного зазора и увеличения частоты следования импульсов.

Колбы эксиламп имели разные величины промежутка между внешней и внутренней стенкой d_{12} и были выполнены из кварца (Fused Quartz, Type 214, General Electric), имеющего пропускание на рабочей длине волны 283 nm $\sim 90\%$. Пространство в колбе заполнялось газовой средой, состоящей из ксенона и брома. 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 двулучевой осциллограф TDS-220. В ряде случаев при помощи фотоприемника Hamamatsu H8025-222 измерялась плотность мощности излучения.

Результаты и их обсуждение

Барьерный разряд в случае минимальных разрядных промежутков

Для экспериментального моделирования этой ситуации нами была использована коаксиальная колба с $d_{12} = 2.4 \pm 0.3$ mm. Лампа возбуждалась от низковольтных генераторов. Таким образом, в данной лампе мог быть реализован барьерный разряд при давлении до 1 atm и напряженности поля на промежутке до нескольких kV/mm.

Типичный спектр излучения (рис. 2) содержит полосы $B-X$ (с длинным коротковолновым крылом), $D-X$, $C-A$ -переходов с максимумами на 282, 225, 300 nm соответственно. Вклад $D-X$ и $C-A$ -переходов с ростом давления смеси (при фиксированном отношении $[Xe]/[Br_2]$ в смеси) уменьшается. Кроме того, с ростом давления уменьшается спектральная полуширина $B-X$ -перехода (282 nm).

Основной целью наших исследований было определение условий, в которых длительность импульса излучения на полувысоте $\tau(0.5)$ минимальна. Этому добивались, варьируя долю брома в рабочей смеси и общее давление.

Форма импульсов излучения существенно отличалась в зависимости от типа источника. Для источника 1 за каждый полупериод напряжения могли высвечиваться от одного до трех световых импульсов, и их число зависело от давления в колбе. При использовании источника 2 при высоких давлениях удалось получить моноимпульсы за каждый полупериод напряжения либо сдвоенные импульсы, причем интенсивность 2-го импульса в пачке была существенно меньше первого. Кроме того, источник 2 обеспечивал частоту следования импульсов излучения 200 kHz.

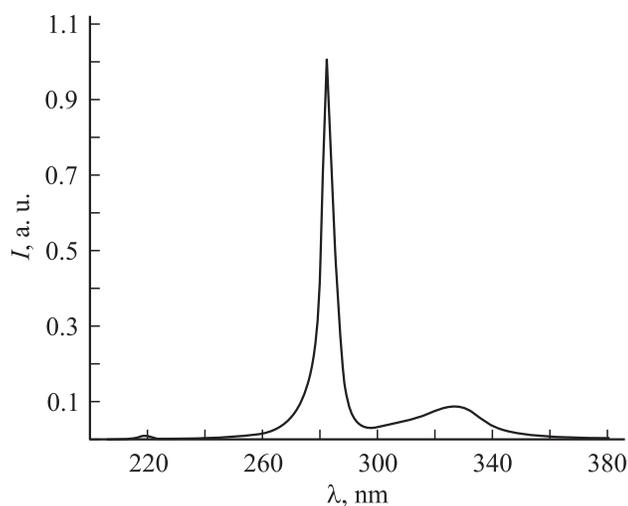


Рис. 2. Спектр излучения ХеВг-эксилампы в смеси Хе/Вг = 200/1.5, $p = 423$ Торг. Источник 2.

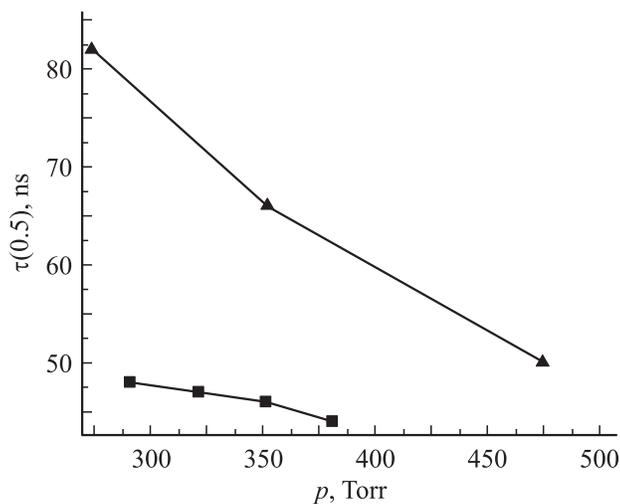


Рис. 3. Зависимость длительности импульса на полувысоте ХеВг-эксилампы при различных общих давлениях от источника 1 (▲ — Хе/Вг = 400/1; ■ — Хе/Вг = 100/1).

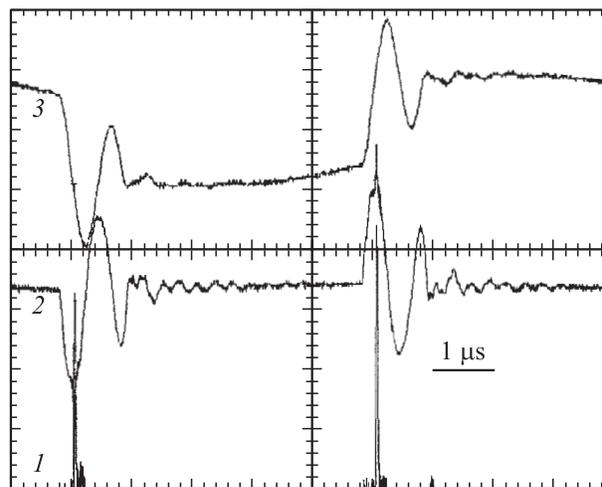


Рис. 4. Временной ход излучения (1), тока (2) и напряжения (3) на ХеВг-эксилампе. Источник 2, $d_{12} = 0.8$ mm. Смесь Хе/Вг = 120/1, $p = 450$ Торг.

С ростом давления смеси $\tau(0.5)$ сокращается. Длительность импульса излучения оказывается величиной, чувствительной к содержанию брома в смеси. Минимальное значение $\tau(0.5)$ было получено при возбуждении от источника 1 и составило ~ 45 ns в смеси Хе/Вг = 100/1 при $p = 381$ Торг. При том же давлении, но в смеси Хе/Вг = 400/1 мощность излучения увеличивается в 1.4 раза, а $\tau(0.5) \sim 60$ ns (рис. 3).

Увеличение давления от 0.3 atm (при прочих равных условиях) ведет к снижению интенсивности излучения вплоть до момента, когда прекращается пробой разрядного промежутка. Уменьшение доли брома в смеси увеличивает интенсивность излучения, но удлиняет импульс излучения.

Чтобы увеличить pd , нами была дополнительно испытана еще одна колба с $d_{12} \sim 0.8$ mm. На рис. 4 приведены осциллограммы тока, напряжения и излучения ХеВг-эксилампы при возбуждении от источника 2 в этом случае. Почти трехкратное уменьшение d_{12} позволило сократить $\tau(0.5)$ с 50–60 до 21.6 ns. В этом случае плотность мощности излучения на поверхности лампы составила ~ 2 mW/cm².

Итак, даже в близких к оптимальным (с точки зрения получения короткого импульса излучения) условиях испытанные лампы не дают высокой мощности за счет того, что емкость заряжаемых диэлектрических барьеров ограничена. Использование высокого напряжения позволило бы не только увеличить энергию разряда, но и перейти к повышенным давлениям.

Высоковольтное короткоимпульсное возбуждение

Для обеспечения пробоя при повышенных давлениях и укорочения переднего фронта импульса напряжения был использован генератор наносекундных импульсов, описанный выше (рис. 1).

На рис. 5 представлены типичные осциллограммы временного хода интенсивности излучения (I) и тока через лампу (2). Видно, что ток через эксилампу имеет меньшую длительность (~ 2 ns), чем длительность импульса излучения.

На рис. 6–8 представлены зависимости $\tau(0.5)$ и интенсивности излучения от давления и содержания компонентов в смеси. Видно, что:

— увеличение доли брома в смеси ведет к уменьшению интенсивности излучения и укорачивает импульс излучения;

— для каждой из излученных смесей имеет оптимальное с точки зрения выхода излучения общее давление.

С ростом общего давления смеси длительность излучения сокращается, а разряд переходит от формы „микроразряды + объемное свечение“ в жесткую форму.

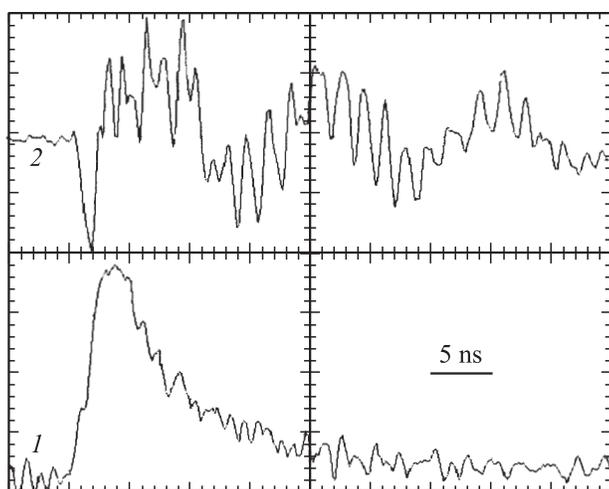


Рис. 5. Осциллограммы тока (2) и импульса излучения (1) ХеВг-эксилампы в смеси Хе/Br₂ = 200/1 при общем давлении 1 atm.

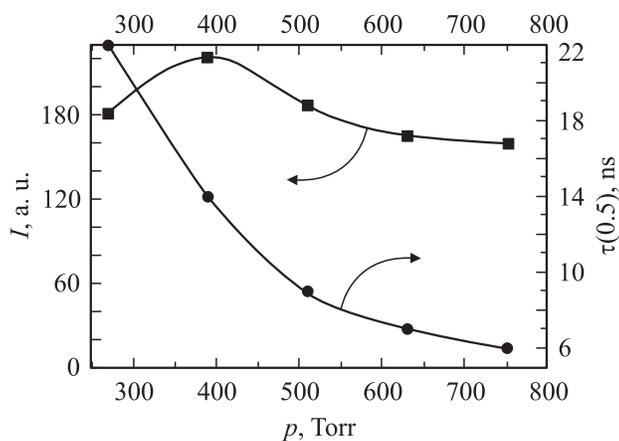


Рис. 6. Интенсивность излучения и длительность импульса ХеВг-эксилампы на полувысоте в смеси Хе/Br₂ = 200/1 при различных общих давлениях.

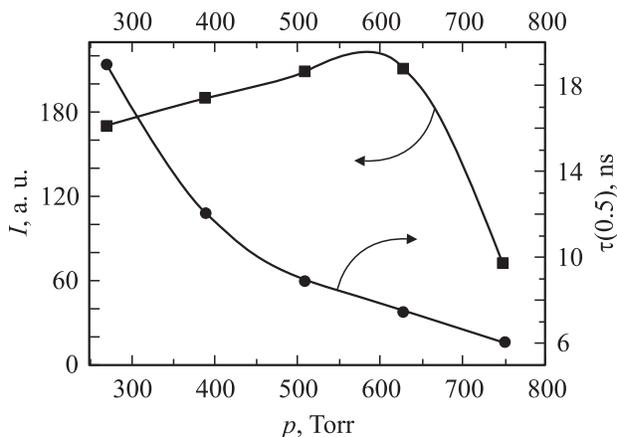


Рис. 7. Интенсивность излучения и длительность импульса ХеВг-эксилампы на полувысоте в смеси Хе/Br₂ = 70/1 при различных общих давлениях.

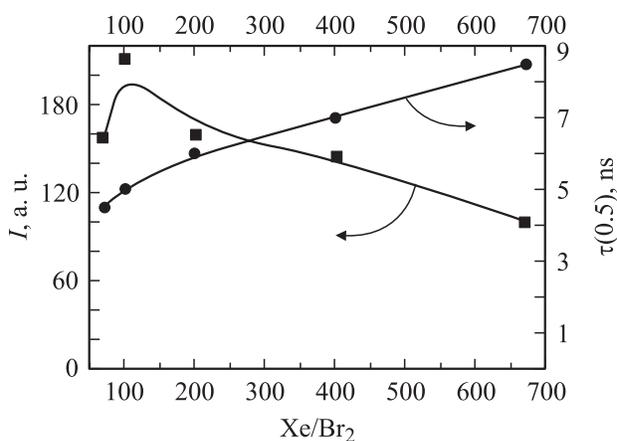


Рис. 8. Интенсивность излучения и длительность импульса ХеВг-эксилампы на полувысоте при различных соотношениях Хе/Br₂ и общем давлении 1 atm.

Оценка полной импульсной мощности излучения лампы для смеси Хе/Br₂ = 200/1 и давления 510 Torr дала 105 kW, что соответствует 724 W/cm².

Заключение

Таким образом, в работе исследованы коаксиальные двухбарьерные ХеВг-эксилампы и показано, что при уменьшении межэлектродного зазора между барьерами реализуются длительности импульса излучения на полувысоте от 21.6 до 60 ns при частоте следования импульсов до 200 kHz. Средняя мощность излучения эксилампы зависит от площади заряжаемых диэлектрических барьеров, содержания брома и давления смеси.

Показано, что на основе высоковольтного короткоимпульсного барьерного разряда может быть создана короткоимпульсная ХеВг-эксилампа с высокой импульсной мощностью. При давлении 1 atm Хе/Br₂ = 70/1 была получена величина $\tau(0.5) = 4.5$ ns. Достигнутая

импульсная мощность излучения 100 kW может быть увеличена при увеличении размеров эксилампы.

Дальнейший прогресс в создании короткоимпульсных эксиламп будет зависеть от создания специальных источников питания.

Данная работа выполнена при поддержке НТЦ „Реагент“.

Список литературы

- [1] *Kogelshatz U., Esrom H., Zhang J.-Y., Boyd I.W.* // Applied Surface Science. 2000. Vol. 168. P. 29–37.
- [2] *Eliasson B. and Kogelschatz U.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 1991. Vol. 19. P. 309–329.
- [3] *Волкова Г.А., Кириллова Н.Н., Павловская Е.Н., Яковлева А.В.* // ЖПС. 1994. Т. 41. № 4. С. 681–695.
- [4] *Ломаев М.В., Скакун В.С., Соснин Э.А.* и др. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [5] *Ломаев М.В., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Источники спонтанного ультрафиолетового излучения: физика процессов и экспериментальная техника. Эксилампы. Томск: Томский государственный университет, 1999.
- [6] *Коваль Б.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* и др. // ПТЭ. 1992. № 4. С. 244–245.
- [7] *Гаврилова Т.В., Аверьянов В.П.* // Оптич. журн. 1995. № 9. С. 59–61.
- [8] *Bollanti S., Clementi G., Di Lazzaro P. et al.* // IEEE Transactions and Plasma Science. 1999. Vol. 27. P. 211–217.
- [9] *Ерофеев М.В., Ломаев М.И., Соснин Э.А.* и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 10. С. 137–140.
- [10] *Шуаибов А.К.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 10. С. 138–142.
- [11] *Ерофеев М.В., Ломаев М.И., Соснин Э.А.* и др. // Оптич. журн. 2001. Т. 68. № 10. С. 75–77.
- [12] *Tarasenko V.F., Erofeev M.V., Lomaev M.I.* et al. // Proc. of SPIE Int. Symp. on Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VI. 2001. Vol. 4274. P. 482–289.
- [13] *Тарасенко В.Ф., Шниц Д.В., Ломаев М.И.* // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 7. С. 94–96.