

## Секция Е

## НЕКОГЕРЕНТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 535-31: 621.387

**Влияние длительности импульса возбуждения  
на энергетические характеристики  
эксилексных ламп барьерного разряда****С.М. Авдеев<sup>1</sup>, Д.С. Печеницин<sup>1</sup>, Э.А. Соснин<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> *Институт сильноточной электроники СО РАН**634050, г. Томск, Россия, пр. Академический, 2/3, badik@loi.hcei.tsc.ru*<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет*  
*634050, г. Томск, Россия, пр. Ленина, 36*

Работа посвящена выявлению влияния длительности импульса возбуждения на энергетические характеристики эксилексных лампы барьерного разряда. Результаты показывают, что с ростом длительности от 0,7 до 1,5 мкс эффективность и энергетическая светимость излучения эксиламп снижаются на 10–15%. На каждом такте высвечивание происходит на фронте и спаде импульса напряжения, при этом светимость на фронте и спаде напряжения падают согласованно. Обсуждаются возможности применения эффекта задержки формируемых импульсов в фотохимических экспериментах.

*Ключевые слова:* барьерный разряд, импульс излучения, эксилампа; excilamp, KrBr, KrCl, radiation pulse duration, XeBr, XeCl.

**Введение**

Эксилампы – источники спонтанного ультрафиолетового излучения на переходах эксилексных и эксимерных молекул – получили распространение прежде всего благодаря особенностям своего спектрального состава (см. ссылки в [1–4]). В целом ряде приложений нужный эффект достигается под воздействием определенной дозы облучения [5–7]. Поэтому большинство исследований эксиламп было посвящено выявлению условий получения наибольших значений средней мощности и эффективности люминесценции. То, что излучение эксиламп является импульсным, а доза набирается в частотном режиме следования импульсов возбуждения и в этих случаях не учитывается.

Мы полагаем, что знания о временном ходе импульсов излучения потенциально тоже представляют интерес, дополняя данные об энергетических характеристиках. Настоящая работа частично восполняет этот пробел. Цель исследования – определить влияние длительности импульса возбуждения на временной ход излучения и лучистый поток эксилексных ламп барьерного разряда.

**Экспериментальная установка и методики**

Эксперименты проводились с отпаянными эксилампами барьерного разряда на молекулах XeCl\* (308 нм), KrCl\* (222 нм), XeBr\* (282 нм), KrBr\* (222 нм), имеющих одинаковые габаритные размеры. Колбы эксиламп имели коаксиальную геометрию и были выполнены двух соосно установленных из кварцевых трубок (марка кварца KB-1, АО «Гусевский стекольный завод имени Дзержинского»), имеющих диаметры 4,1 и 2,3 см, образующих разрядный промежуток  $d = 7$  мм. На внутренней поверхности внутренней трубки размещался сплошной отражающий электрод из Al–Mg фольги толщиной 25 мкм. Этот электрод был высоковольтным, а на внешней трубке размещался перфорированный заземленный электрод для вывода излучения наружу. Подача импульса напряжения на электроды последовательно ведет к зарядке барьеров (стенки трубки) и далее – к пробое промежутка  $d$ , заполненного рабочей смесью, что в свою очередь вызывает электролюминесценцию. Площадь свечения  $S$  составляла 129 см<sup>2</sup>.

Во всех экспериментах для питания использовали источник, формирующий импульсы напряжения с амплитудой до –6 кВ и фиксированной частотой следования  $f = 30$  кГц. Длительность импульсов напряжения по основанию ( $\tau$ ) в ходе экспериментов варьировали, изменяя обмоточные характеристики выходного трансформатора источника. При этом каждый раз добивались того, чтобы коэффициент трансформации не менялся.

После зажигания эксилампы фотоприемником C8026/H8025-222 (Hamamatsu Photonics K.K.) с известной спектральной чувствительностью, располагаемым вплотную к поверхности колбы, измеряли энергетическую светимость  $E_s$  (мВт/см<sup>2</sup>) в центре колбы. С вакуумного фотокатода ФЭК-22 СПУ (П/я А-1492) регистрировали временной ход люминесценции, а с помощью емкостного делителя напряжения и токового шунта, собранном на линейке чип-резисторов, регистрировали временной ход импульсов напряжения и тока. Полученные сигналы подавали на осциллограф TDS 224 (Tektronix, Inc.). Зная величины  $I(t)$  и  $U(t)$ , полную (активную) мощность разряда  $W$ , вкладываемую в эксилампу, можно определить через интеграл [8]:

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T I(t)U(t)dt,$$

где  $T$  – период повторения импульсов. Соответственно, оцененная снизу эффективность излучения эксилампы определяется как  $\eta = (E_s \cdot S)/W$ .

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлен типичный временной ход тока и напряжения на эксилампе. По токовой части видно, что энергия вкладывается в газовую среду на фронте и спаде импульса напряжения. В результате формируются два импульса излучения, что показано на рис. 2.

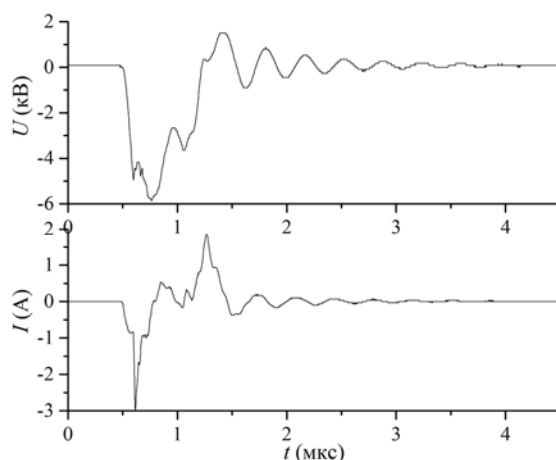


Рис. 1. Осциллограммы напряжения и тока. ХеСl-эксилампа,  $\tau = 0,7$  мкс

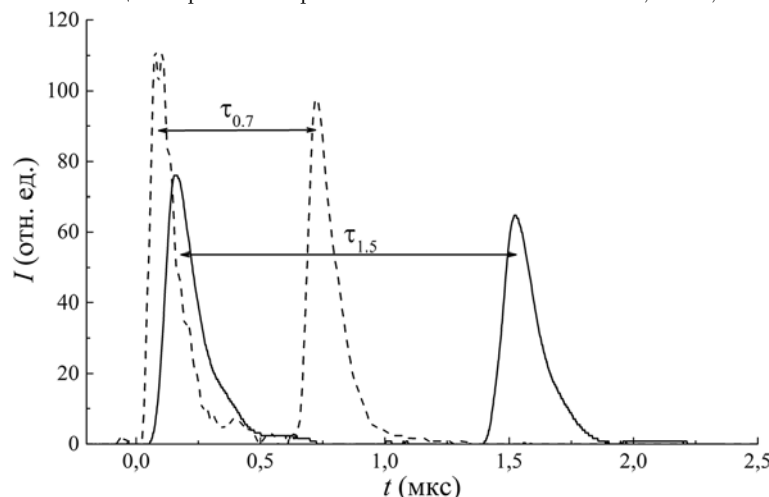


Рис. 2. Временной ход излучения ХеСl-эксилампы для двух значений длительности импульса напряжения  $\tau$

Изменение длительности импульса от 0,7 до 1,5 мкс (с сохранением коэффициента трансформации источника) приводит к пропорциональному (линейному) росту задержки второго импульса по отношению к первому. При этом в зависимости от типа эксилампы на 10–15% падает эффективность излучения. Можно было бы предположить, что это связано с тем, что остаточная предьонизация после первого импульса, формируемого на фронте при увеличении  $\tau$  всё меньше и меньше облегчает пробой на спаде. Однако расчеты для энергетической светимости первого и второго импульсов излучения (рис. 3,  $E_1$ ,  $E_2$ ) показывают, что эти величины снижаются согласованно. Этого не наблюдалось бы, если бы предьонизация на фронте влияла на излучение на спаде.

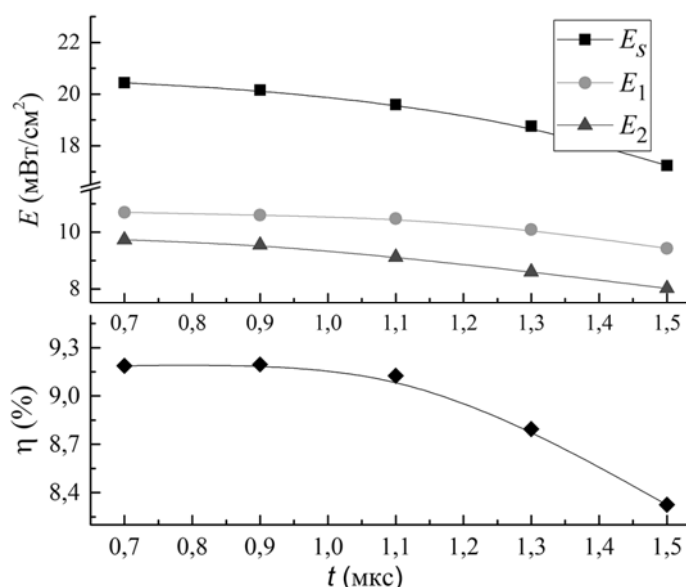


Рис. 3. Энергетическая светимость: полная ( $E_s$ ), первого и второго пика излучения ( $E_1$ ,  $E_2$ ). XeCl-эксиллампа,  $\tau = 0,7$  мкс

Аналогичные закономерности проявляются на всех исследованных типах эксилламп. Таблица суммирует данные об энергетических параметрах 4-х типов эксилламп для двух крайних случаев – максимальной и минимальной величины  $\tau$ , выставляемой в ходе экспериментов.

| Тип эксиллампы | Средняя мощность, Вт |         | Эффективность, % |         |
|----------------|----------------------|---------|------------------|---------|
|                | 0,7 мкс              | 1,5 мкс | 0,7 мкс          | 1,5 мкс |
| XeCl*          | 2,76                 | 2,38    | 9,18             | 8,32    |
| KrCl*          | 1,06                 | 1       | 3,5              | 3       |
| XeBr*          | 2,74                 | 2,33    | 8,52             | 6,54    |
| KrBr*          | 0,75                 | 0,58    | 2,15             | 1,57    |

Полученные данные потенциально интересны для проведения новых экспериментов в области фотохимии. Например, в работе [9], где оценивалась эффективность фотопревращений в нейтральных водных растворах фенола ( $10^{-3}$  моль/л) в зависимости от длительности импульса излучения, было показано, что при одинаковых дозах облучения (от 0,01 до 0,1 Дж/см<sup>2</sup>) фотопревращения при облучении KrCl-эксиллампой с длительностью импульса около 1 мкс идут эффективнее, чем при облучении KrCl-лазером с длительностью импульса около 10 нс и плотностью импульсной мощности 2 МВт/см<sup>2</sup>. Возможно, значение задержки между импульсами на фронте и спаде тоже имеют значение, что предстоит проверить экспериментально.

## Заключение

Проведенные эксперименты позволили получить уточненные данные о влиянии длительности импульса напряжения  $\tau$  на временной ход люминесценции и энергетические характеристики эксилламп. В изученном диапазоне величин  $\tau$  опровергнута гипотеза о том, что импульс излучения, формируемый на фронте напряжения за счет предыонизации облегчает энерговыход на спаде напряжения. Полученные данные предложено использовать для проведения новых фотохимических экспериментов.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

## Список литературы

1. Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F. Applications of Capacitive and Barrier Discharge Excilamps in Photochemistry // Journal Photochemistry and Photobiology C: Reviews. 2006. V. 7, Iss. 4. P. 145–163. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2006.12.002.
2. Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксиллампы: физика, техника и применения. Томск: STT, 2011. 512 с.
3. Соснин Э.А., Скакун В.С., Панарин В.А., Авдеев С.М., Сорокин Д.А. Коротковолновые эксиллампы – эффективные источники излучения для инактивации вирусов и бактерий // Оптический журнал. 2021. Т. 88, № 10. С. 50–58. DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-10-50-58.
4. Лящева Л.В., Соснин Э.А., Ляцев А.А., Баянов Е.О., Фадеева Ю.Ю. Перспективы применения ультрафиолетового излучения XeCl-эксиллампы для производства корнесобственного посадочного материала столового винограда // Известия оренбургского государственного аграрного университета. 2022. Т. 96, № 4. С. 179–183.

5. Калиниченко А.Н., Соснин Э.А., Авдеев С.М., Калиниченко Н.П., Истомин К.А. Особенности применения эксиламп в люминесцентном методе капиллярного контроля // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 51–56.
6. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том XI-4. Газовые и плазменные лазеры / Отв. ред. С.И. Яковленко. М: ФИЗМАТЛИТ, 2005. С. 530–531.
7. Соколова И.В., Чайковская О.Н., Светличный В.А., Кузнецова Р.Т., Копылова Т.Н., Майер Г.В., Соснин Э.А., Липатов Е.И., Тарасенко В.Ф. Фотопревращения фенолов в водных растворах при различном возбуждении // Химия высоких энергий. 2002. Т. 36, № 4. С. 307–310.

*S.M. Avdeev, D.S. Pechenitsin, E.A. Sosnin. Effect of the excitation pulse duration on energy characteristics of barrier discharge XeCl excilamps.*

Excilamps are gas–discharge sources of spontaneous ultraviolet radiation based on exciplex and excimer molecules. One of their most important parameters determining the power and efficiency of the excilamp radiation, along with the composition and partial pressure of the working mixture, the size of the gas discharge gap, are the characteristics of the excilamp excitation pulse: shape and amplitude. It was previously shown that the optimal form of the excitation pulse for excilamps of a barrier discharge on exciplex molecules is a unipolar voltage pulse, similar in shape to a meander, with a front and fall duration of tens to hundreds of ns. However, the effect of the excitation pulse duration on the energy characteristics of the excilamps has not been specifically investigated. In this study of barrier discharge XeCl-excilamp, it is shown that reducing the excitation pulse duration of the XeCl-excilamp from 1.5 to 0.7 microseconds increases the radiant exitance of the excilamp by 14%. At the same time, the power consumption of the excilamp increases to 7%. During each time step the luminescence pulses occurs at the leading and trailing edges of the voltage pulses. The delay between the first and second pulses of radiation can be varied. Possible applications of this effect are discussed.