

04:07

## Исследование эффективности УФ-излучения лампы барьерного разряда для смеси Xe/SF<sub>6</sub>

© А.А. Пикулев, В.М. Цветков

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: pikulev@expd.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 23 ноября 2007 г.)

Экспериментально исследована эффективность УФ-излучения лампы барьерного разряда для газовой смеси Xe/SF<sub>6</sub> (50:1) в зависимости от давления смеси (40–180 Torr) и расстояния между электродами (3–11 mm). Эксперименты показывают, что для  $pd = \text{const}$  мощность разряда и интенсивность УФ-излучения (354 nm) снижаются при увеличении давления и соответствующем уменьшении расстояния между электродами. Максимум эффективности лампы (6–8%) достигается для давлений смеси 30–50 Torr.

PACS: 52.80.Tn, 52.80.Yr

### Введение

Барьерный разряд (БР) в настоящее время является мощным технологическим инструментом. Помимо разнообразных плазменных [1], экологических [2] и технологических [3] приложений данный тип разряда успешно используется для генерации УФ-излучения в эксилампах [4,5].

Значительный интерес для приложений представляют УФ-лампы, работающие в неканцерогенной области спектра (от 320 до 400 nm) [6], поскольку такое излучение, с одной стороны, практически не поглощается в воздухе, а с другой — безвредно для человека и поэтому не требует использования специальных защитных экранов. В этот диапазон попадает излучение эксиплексов Kr<sub>2</sub>Cl\* (325 nm), I<sub>2</sub>\* (342 nm) и XeF\* (354 nm) [4]. Одним из основных приложений ламп данного спектрального диапазона является фотополимеризация функционализированных мономеров и олигомеров в присутствии фотоинициаторов, спектр поглощения которых начинается в области 360–380 nm [7].

Отметим, что лампы, в которых используется излучение вышеуказанных экситомеров и эксиплексов, обладают существенными недостатками: достигнутая эффективность спонтанного излучения димера I<sub>2</sub>\* не превышает 1% [8], эффективность эксиплекса Kr<sub>2</sub>Cl\* еще ниже [9], а источник на основе молекулы XeF\*, хотя и имеет достаточно высокую эффективность (около 10%), не обеспечивает стабильности спектра излучения и достаточно высокого срока службы излучателя [10]. Это связано с тем, что фторсодержащие смеси приводят к коррозии материала колбы УФ-лампы. Несмотря на вышеуказанные недостатки работы по созданию УФ-источников на основе димера I<sub>2</sub>\* и эксиплекса XeF\* продолжается, что связано с отсутствием реальной альтернативы этим источникам в спектральном диапазоне 320–400 nm.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию эффективности УФ-излучения лампы БР с плоскими электродами для газовой смеси Xe/SF<sub>6</sub> (50:1) в зависимости от давления смеси (40–180 Torr) и расстояния между электродами (3–11 mm). Кроме того, в работе исследованы такие параметры разряда, как ток через ячейку, электрическая мощность, потребляемая разрядом, и мощность УФ-излучения на длине волны 354 nm.

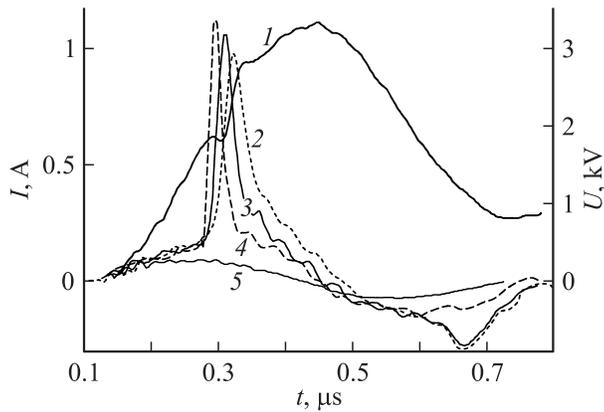
### Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились на ячейке БР с плоскими электродами, подробное описание которой приведено в работе [11]. Конструкция электродов, использованная в данной ячейке, позволяет изменять расстояние между ними или производить их замену.

При проведении экспериментов был использован импульсный источник питания высокой мощности. Выходное напряжение источника представляет собой периодическую последовательность биполярных импульсов с амплитудой 3 kV, длительностью порядка 1 μm и частотой 100 kHz. Стандартная форма импульса напряжения приведена на рис. 1 (кривая I).

Регистрация импульсов напряжения и тока проводилась с помощью осциллографов Tektronix TDS 3014B и TDS 3052. Для измерения импульса тока применялся шунт, контрольные измерения проводились с помощью импульсного токового щупа Tektronix p6022. Для регистрации формы напряжения применялся емкостной делитель. Мощность излучения определялась с помощью измерителя пиковаттных мощностей оптического излучения фирмы Newport.

Эксперименты проводились для смеси Xe/SF<sub>6</sub> (50:1) при различных давлениях смеси (40–180 Torr) и расстояниях между электродами (3–11 mm). Выбор газа определялся его весьма низкой химической актив-

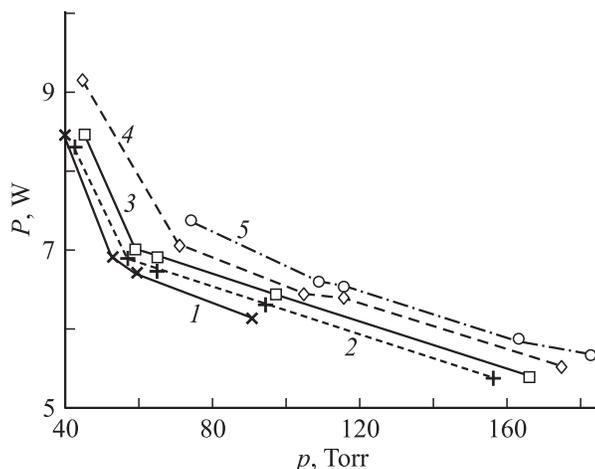


**Рис. 1.** Зависимость напряжения и тока от времени для  $pd = 500 \text{ Torr} \cdot \text{mm}$ : напряжение для 65 Torr (1); ток для 45 (2), 65 (3), 166 Torr (4) и ток при отсутствии разряда в ячейке (5).

ностью. Соотношение компонент газовой смеси было определено экспериментально по максимальной мощности УФ-излучения. Расстояния и давления подбирались таким образом, чтобы сохранялось неизменным произведение  $pd$  (где  $p$  — давление,  $d$  — расстояние между электродами). Значения  $pd$  в экспериментах составили 450, 470, 500, 525 и 550 Torr·mm. Рабочая площадь электродов составляла  $10.2 \text{ cm}^2$ , суммарная емкость диэлектрических барьеров — 30 pF.

## Электрические параметры разряда

Импульсы напряжения и тока через ячейку БР для случая  $pd = 500 \text{ Torr} \cdot \text{mm}$  представлены на рис. 1. Импульс напряжения приведен для давления 65 Torr, а импульсы тока — для давлений 45, 65 и 166 Torr. Из рисунка видно, что длительность импульса тока существенно меньше длительности импульса напряжения



**Рис. 2.** Электрическая мощность разряда в зависимости от давления и значения  $pd$ : 450 (1), 470 (2), 500 (3), 525 (4), 550 Torr·mm (5).

и составляет порядка 50 ns. При повышении давления длительность импульса тока уменьшается, амплитуда незначительно растет, а передний фронт становится круче. Из рисунка видно, что в момент пробоя на кривой напряжения возникает небольшой провал. Кроме того, на заднем фронте импульса напряжения наблюдается обратный, более слабый, чем на переднем фронте, импульс тока.

Для остальных значений  $pd$  зависимости импульсов тока от времени подобны приведенным на рис. 1. Эксперименты показывают, что для  $pd = \text{const}$  плотность тока практически не зависит от давления (точнее, немного снижается с уменьшением давления), а длительность импульса тока снижается с увеличением давления по закону  $\sim 1/p^{0.3}$ .

Графики зависимости электрической мощности, рассеиваемой в ячейке БР, от  $pd$  и давления приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что мощность, потребляемая разрядом, составляет 5–9 W. Максимальное значение мощности разряда можно оценить по формуле

$$P_{\text{max}} = \nu \frac{CU^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\nu$  — частота;  $C$  — суммарная емкость барьеров;  $U$  — максимальное напряжение на диэлектрических барьерах. Формула (1) указывает на то, что вся электрическая энергия, запасенная в конденсаторе (который образован диэлектрическими барьерами), полностью диссипируется в разряде. Для вышеприведенных условий получим  $P_{\text{max}} = 13.5 \text{ W}$ , что на 30–70% выше, чем полученные экспериментальные значения. Такое различие может быть связано с неполной диссипацией энергии в разряде, т.е. часть тока через ячейку является реактивной (помимо тока холостого хода).

Из рис. 2 видно, что электрическая мощность разряда падает при увеличении давления по закону  $\sim 1/p^{0.25} - 1/p^{0.30}$  и имеет слабую, практически линейную, тенденцию (в исследованных пределах 450–550 Torr·mm) к росту при повышении  $pd$ . Такая зависимость объясняется тем, что при увеличении расстояния между электродами ( $pd = \text{const}$ ) разряд переходит из диффузной формы в стримерную, отличающуюся большей степенью диссипации энергии, что связано с более высокой концентрацией электронов в стримере. Увеличение мощности разряда при повышении  $pd$  ( $p = \text{const}$ ) связано с переходом разряда от диффузного к стримерному типу при увеличении длины разрядного промежутка.

## Мощность и эффективность УФ-излучения

Основным источником УФ-излучения для смеси Xe/SF<sub>6</sub> является  $B \rightarrow X$ -переход эксиплекса XeF\* (354 nm), ширина полосы излучения которого при давлении 100 Torr составляет  $\sim 8 \text{ nm}$  на полувысоте. Основ-

ными каналами образования эксиплексов XeF\* являются [6]:

- 1) гарпунная реакция  $\text{Xe}^* + \text{SF}_6 \rightarrow \text{XeF}^* + \text{SF}_5$ ,
- 2) ион-ионная рекомбинация  $\text{Xe}^+ + \text{F}^- + M \rightarrow \text{XeF}^* + M$ , где  $\text{Xe}^*$  — резонансное ( $^3P_1$ ) и метастабильное ( $^3P_2$ ) состояния атома ксенона,  $M$  — третья частица.

При умеренных давлениях смеси Xe/SF<sub>6</sub>, использованных в наших экспериментах (40–180 Torr), основным каналом образования ионов и возбужденных состояний атома ксенона является электронный удар. Образование эксиплексов XeF\* происходит в основном при участии гарпунных реакций, что связано с тем, что при давлении до ~200 Torr вклад трехчастичных реакций и соответственно ион-ионной рекомбинации незначителен [10].

Регистрация мощности излучения разряда производилась с помощью измерителя пиковаттных мощностей оптического излучения фирмы Newport с площадью чувствительного элемента  $8.8 \times 8.8$  mm, который располагался в плоскости симметрии электродов на расстоянии 137 mm до их общей оси.

При определении полной мощности излучения лампы по показаниям фотоприемника предполагалось, что разряд является однородным в межэлектродном пространстве и излучает изотропно по всем направлениям. В этом случае переход от показаний фотоприемника  $P_f$  к полной мощности излучения лампы  $P_{\text{rad}}$  осуществляется по формуле (в пренебрежении поглощением и рассеянием излучения в воздухе и ячейке БР)

$$P_{\text{rad}} = \eta P_f, \quad \eta(d, L) = \frac{4\pi}{\Omega(d, L)}, \quad (2)$$

где  $\Omega$  — сферический угол, под которым виден фотоприемник из центра кюветы;  $2d$  — расстояние между электродами;  $L$  — расстояние от центра ячейки до фотоприемника.

Выражение для  $\Omega$  имеет следующий вид:

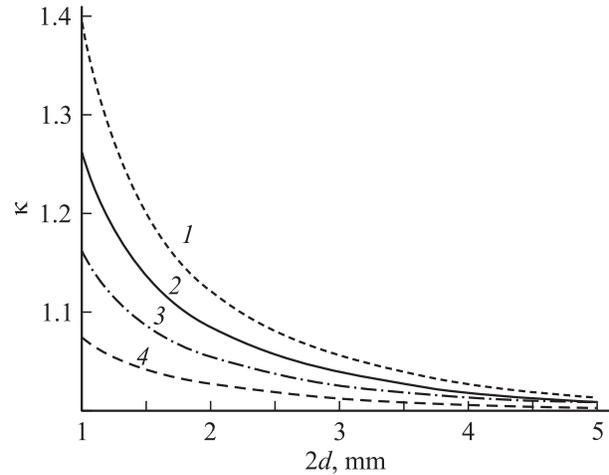
$$\left\{ \begin{aligned} \Omega(d, L) &= \frac{4h}{\pi d R^2} \int_0^R dz \int_0^d dy \int_{-r(z)}^{r(z)} \frac{\phi(x, y, z, d, L)}{L+x} dx, \\ r(z) &= (R^2 - z^2)^{1/2}, \\ \phi(x, y, z, d, L) &= \min \left\{ \frac{d-y}{x+r(z)}, \frac{h-y}{L+x} \right\} \\ &+ \min \left\{ \frac{d+y}{x+r(z)}, \frac{h+y}{L+x} \right\}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где  $R$  — радиус электродов;  $2h$  — линейный размер площадки фотоприемника.

В случае, если размер фоточувствительного элемента фотоприемника существенно меньше, чем расстояние между электродами, справедливы следующие простые соотношения:

$$\Omega(\infty, L) = \frac{S_f}{L^2}, \quad \eta(\infty, L) = \frac{4\pi L^2}{S_f}, \quad (4)$$

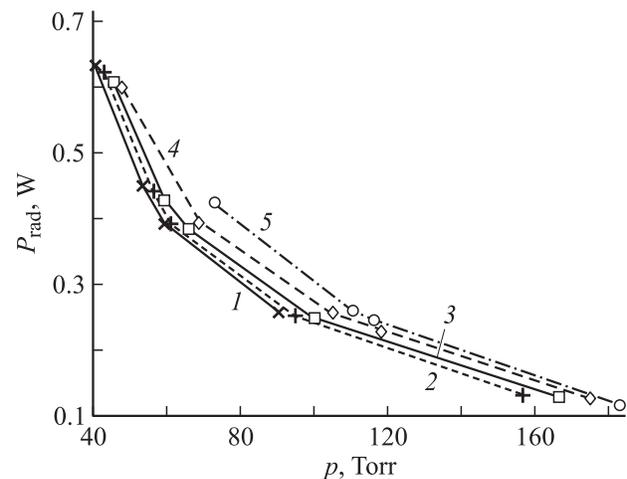
где  $S$  — площадь фоточувствительного элемента.



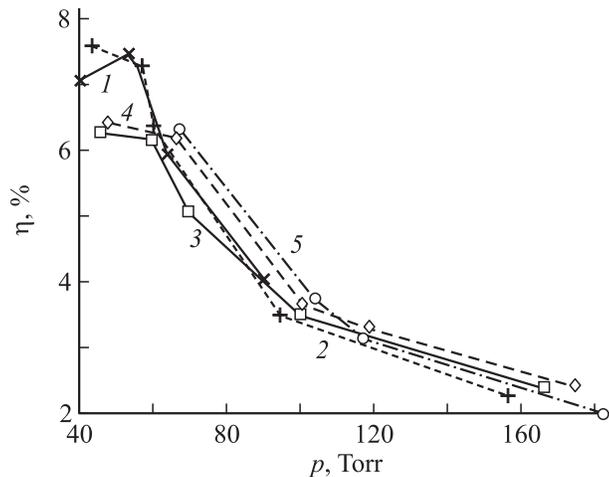
**Рис. 3.** Коэффициент пересчета  $\kappa$  в зависимости от расстояния между электродами  $2d$  и расстояния от центра ячейки БР до фотоприемника  $L$ : 100 (1), 137 (2), 200 (3) и 400 mm (4).

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента  $\kappa = \eta(d, L)/\eta(\infty, L)$  от расстояния между электродами для нескольких значений  $L = 100, 137, 200$  и  $400$  mm ( $h = 4.4$ ,  $R = 18$  mm). Эксперименты проводились для  $L = 137$  mm. Из рисунка видно, что коэффициент  $\kappa$  уменьшается при увеличении расстояния между электродами и расстояния от фотоприемника до центра кюветы. В случае  $h < d$  и  $L \gg R$  можно считать, что  $\kappa \approx 1$ .

Зависимости полной мощности излучения от давления и  $pd$ , пересчитанные по формуле (2), представлены на рис. 4. Для мощности излучения справедливы приблизительно те же зависимости, что и для мощности разряда (см. рис. 2): при увеличении  $pd$  ( $p = \text{const}$ ) и при понижении давления ( $pd = \text{const}$ ) наблюдается возрастание мощности излучения. Отметим, что мощность УФ-излучения с высокой степенью точности обратно



**Рис. 4.** Мощность излучения разряда в зависимости от давления и значения  $pd$ : 450 (1), 470 (2), 500 (3), 525 (4), 550 Torr · mm (5).



**Рис. 5.** Эффективность УФ-излучения лампы барьерного разряда  $\eta$  в зависимости от давления и значения  $pd$ : 450 (1), 470 (2), 500 (3), 525 (4), 550 Torr · mm (5).

пропорциональна давлению ( $pd = \text{const}$ )  $P_{\text{rad}} \sim 1/p$ , т. е. зависимость от давления более ярко выражена, чем для мощности разряда ( $P \sim 1/p^{0.25} - 1/p^{0.30}$ ).

На рис. 5 представлены зависимости эффективности УФ-излучения лампы (в процентах) от давления и  $pd$ . Эффективность определялась как отношение полной мощности УФ-излучения к мощности разряда. Из рисунка видно, что для давления газа, большего 80 Torr, эффективность уменьшается при увеличении давления как  $\sim 1/p^{0.75} - 1/p^{0.80}$  и практически не зависит от значения  $pd$  (по крайней мере, в исследованных пределах 450–550 Torr · mm). Максимум эффективности находится в области 30–60 Torr и имеет некоторую тенденцию к увеличению при уменьшении  $pd$ . Максимальная эффективность составляет  $\sim 8\%$  и достигается для  $pd = 450 \text{ Torr} \cdot \text{mm}$  при давлении 40 Torr.

В заключение отметим, что в наших экспериментах максимальная эффективность УФ-излучения разряда наблюдалась в случае, когда микроразряды представляли собой два конуса с соединенными вершинами, при этом основания конусов покрывали всю поверхность электродов. Это наблюдение полностью совпадает с результатами работ [8,10,12].

Настоящая работа выполнена при поддержке проекта МНТЦ (№ 3098).

## Список литературы

- [1] Kogelschatz U. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. Vol. 46. P. B65–B75.
- [2] Oppenländer T., Gliese S. // Chemosphere. 2000. Vol. 40. P. 15–21.
- [3] Esrom H. // Appl. Surf. Sci. 2000. Vol. 186. P. 1–4.
- [4] Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 4. С. 546–552.

- [5] Boyd I.W., Zhang J.Y. // Nuclear Instrum. Meth. B. 1997. Vol. 121. P. 349–356.
- [6] Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Газоразрядные источники спонтанного ультрафиолетового излучения: Физика процессов и экспериментальная техника. Эксилампы: Уч. пособие. Томск: ТГУ, 1998. 108 с.
- [7] Lecamp L., Youssef B., Bunel C., Lebaudy P. // Polymer. 1999. Vol. 40. P. 6313–6320.
- [8] Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 1. С. 107–110.
- [9] Xu X. // Thin Solid Films. 2001. Vol. 390. P. 237–242.
- [10] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [11] Пикулев А.А., Цветков В.М. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 9. С. 22–27.
- [12] Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 86–92.