

04:07

Исследование эффективности УФ-излучения лампы барьерного разряда для смеси Xe/SF₆

© 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/SF₆ (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 Kr₂Cl* (325 nm), I₂ (342 nm) и XeF* (354 nm) [4]. Одним из основных приложений ламп данного спектрального диапазона является фотополимеризация функционализированных мономеров и олигомеров в присутствии фотoinициаторов, 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 I₂* не превышает 1% [8], эффективность эксиплекса Kr₂Cl* 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 I₂* 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/SF₆ (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/SF₆ (50:1) при различных давлениях смеси (40–180 Torr) и расстояниях между электродами (3–11 mm). Выбор газа определялся его весьма низкой химической актив-

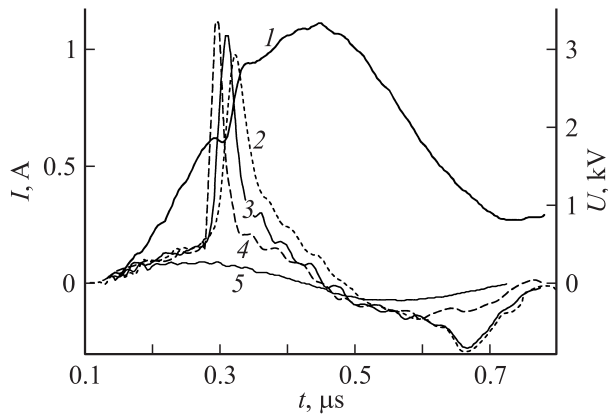


Рис. 1. Зависимость напряжения и тока от времени для $pd = 500 \text{ Torr} \cdot \text{mm}$: напряжение для 65 Torr (1); ток для 45 (2), 65 (3), 166 Torr (4) и ток при отсутствии разряда в ячейке (5).

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 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

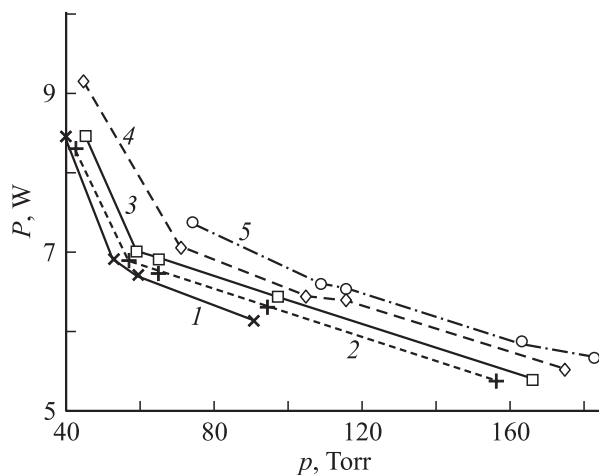


Рис. 2. Электрическая мощность разряда в зависимости от давления и значения pd : 450 (1), 470 (2), 500 (3), 525 (4), 550 Torr·mm (5).

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 ν — 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/SF₆ 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 Xe^* — резонансное (3P_1) и метастабильное (3P_2) состояния атома ксенона, M — третья частица.

При умеренных давлениях смеси Xe/SF₆, 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 8.8×8.8 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_{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 Ω — сферический угол, под которым виден фотоприемник из центра кюветы; $2d$ — расстояние между электродами; L — расстояние от центра ячейки до фотоприемника.

Выражение для Ω 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.

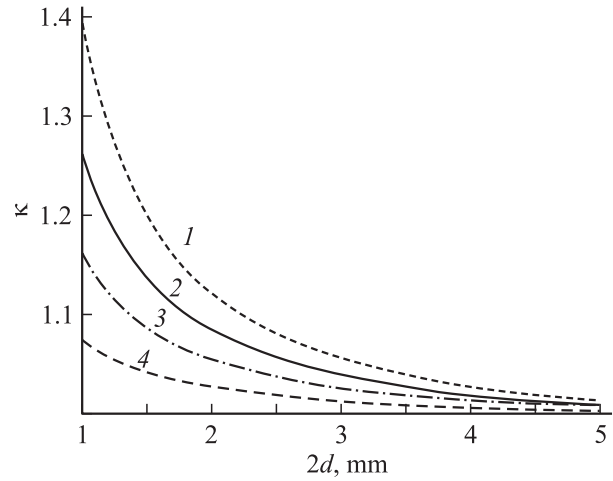


Рис. 3. Коэффициент пересчета κ в зависимости от расстояния между электродами $2d$ и расстояния от центра ячейки БР до фотоприемника L : 100 (1), 137 (2), 200 (3) и 400 mm (4).

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 κ 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

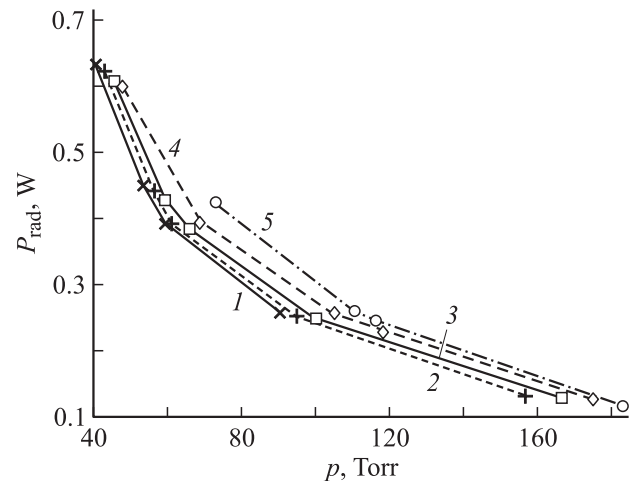


Рис. 4. Мощность излучения разряда в зависимости от давления и значения pd : 450 (1), 470 (2), 500 (3), 525 (4), 550 Torr · mm (5).

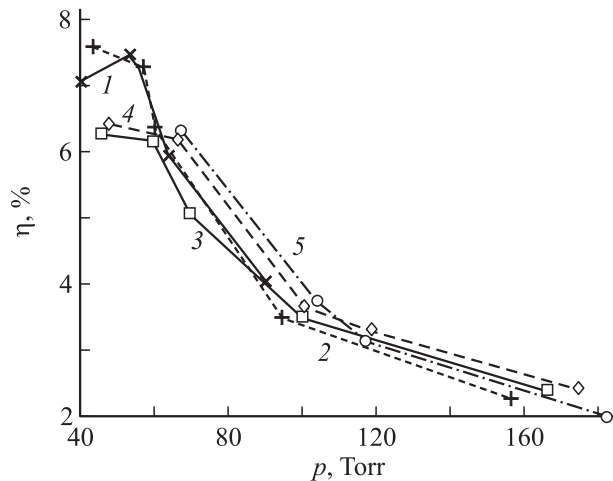


Рис. 5. Эффективность УФ-излучения лампы барьерного разряда η в зависимости от давления и значения pd : 450 (1), 470 (2), 500 (3), 525 (4), 550 Torr · mm (5).

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.