

04;07;12

Исследование динамического скачка давления в эксилампах барьерного разряда

© В.М. Цветков,¹ А.А. Пикулев,¹ Э.А. Соснин,² С.М. Авдеев,² В.Ф. Тарасенко²

¹ Российский Федеральный Ядерный Центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: pikulev@expd.vniief.ru

² Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 15 октября 2009 г.)

Данные о скачке давления использованы для исследования термодинамических процессов в эксилампах барьерного разряда при диффузном (однородном) разряде и в режимах с микроразрядами. Показано, что линейная зависимость между скачком давления и интенсивностью излучения эксилампы может служить для контроля мощности излучения.

Введение

В настоящее время эксилампы барьерного разряда (БР) находят все большее применение в различных областях технологии, экологии и медицины [1]. Среди преимуществ эксиламп, значимых с практической точки зрения, можно выделить: отсутствие ртути в колбе, что лучше соответствует современным экологическим стандартам; легкость зажигания с быстрым выходом на максимум мощности после зажигания (питание эксиламп барьерного и емкостного разрядов осуществляется импульсами напряжения с амплитудой до нескольких киловольт и частотой до нескольких сотен килогерц, поэтому эти устройства не нуждаются в специальных стартерах); высокие достигнутые полезные сроки службы > 5000 h для хлорсодержащих эксиламп и $> 10\,000$ h — для заполненных инертным газом; узкополосный УФ-или ВУФ-спектр излучения — большая часть лучистого потока эксиламп сосредоточена в сравнительно узкой спектральной зоне полушириной от 2 до 15 nm для эксиплексных молекул и до 30 nm — для эксимеров инертных газов и т. д. [1–4].

При длительной эксплуатации эксиламп необходимо соблюдать тепловой режим эксплуатации и контролировать мощность излучения. Для уменьшения нагрева рабочего газа лампы применяется воздушное или водяное охлаждение эксиламп. Выбор системы охлаждения связан с тепловой мощностью эксилампы и с максимально допустимой температурой рабочего газа. Для контроля мощности излучения обычно используются физические и химические фотоприемники, чувствительные в УФ-диапазоне спектра. Большинство широко используемых фотодетекторов обладает линейной световой характеристикой с насыщением при превышении фотосигналом некоторого порогового уровня интенсивности. Чувствительность физических фотоприемников может заметно снижаться вследствие нарушений приемной

поверхности излучением, особенно если речь идет о регистрации коротковолнового и вакуумного ультрафиолетового излучения. Продолжительная эксплуатация, например, кремниевых фотоприемников при уровне облучения около 10 mW/cm^2 приводит к необратимому снижению чувствительности и накоплению неоднородностей на их поверхности [5]. Поэтому требуется регулярная калибровка таких приборов. Использование химического фотоприемника требует высокой квалификации оператора.

Поиски альтернативных методов контроля мощности УФ-излучения эксиламп БР или режимов их работы являются весьма актуальными. В настоящей работе предложен один из таких методов — измерение амплитуды быстрой части скачка давления (характерное время ~ 100 ms), возникающего в кювете эксилампы при ее включении.

Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Колба эксиламп барьерного разряда 1 имела коаксиальную конструкцию и была выполнена из кварцевых трубок марки ТКг либо из кварца марки КУ-2 (ООО „Технокварц“). Разряд осуществлялся при подаче на электроды 2 и 3 импульсного напряжения от источника 10, а излучение из газоразрядного объема 4 выводилось наружу через перфорированный электрод 2. Параметры эксиламп и источников питания сведены в табл. 1.

Статическое давление в колбе контролировалось по вакуумметру 5, а для измерения динамических параметров скачка давления использовался индуктивный дифференциальный малогабаритный датчик давления ДМИ-0.1-2 (6). Смеси для эксиламп готовились в газовом посту 7, который отсекался от установки.

Таблица 1. Параметры эксиламп и источников питания

	KrCl	Cl ₂
Рабочая молекула		
Тип спектра	узкополосный, максимум на $\lambda = 222$ nm	узкополосный, максимум на $\lambda = 257.8$ nm
Внешний и внутренний диаметры, nm	43/20	43/22
Длина рабочей области, cm	30	12
Смесь	Kr-Cl ₂ = (50–400)–1	Ar-Cl ₂ = (200–400)–1
Диапазон давлений, 10 ³ Pa	3–38	9–50
Параметры источника питания:		
тип полярности	двуполярный	однополярный
максимум напряжения, kV	4.5	4
частота, kHz	100	15–70

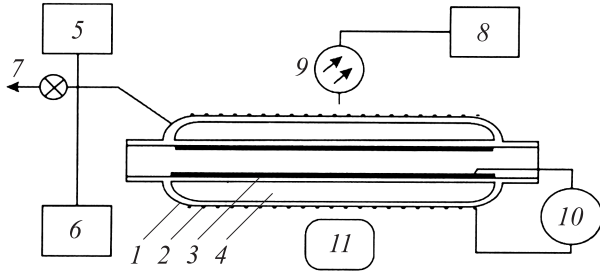


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — колба лампы; 2 — перфорированный внешний электрод; 3 — внутренний электрод-отражатель; 4 — газоразрядный объем; 5 — вакуумметр; 6 — датчик давления; 7 — отвод к откачному посту; 8 — спектрофотометр; 9 — оптоволоконно; 10 — импульсный источник питания; 11 — фотоприемник.

Мощность излучения лампы в диапазоне $\lambda = 200–350$ nm определялась с помощью фотоприемника 11 HAMAMATSU H8025-222 (с максимумом спектральной чувствительности на 222 nm) или детектора UV-818, работающего совместно с измерителем мощности Newport 1830-C Picowatt Digital Optical Power Meter. Обзорный спектр излучения разряда регистрировался через оптоволоконно 9 с известным спектром пропускания спектрометром StellarNet EPP2000-C25 (StellarNet Inc.) на основе многоканальной пзс-линейки Sony ILX511 (рабочий диапазон 200–850 nm, спектральная полуширина его аппаратной функции не превышает 1.5 nm).

Мощность разряда определялась по осциллограммам импульсов напряжения и тока. Осциллограммы тока с токового шунта и напряжения от делителя напряжения регистрировались осциллографами TDS 3014B и TDS 224 (Tektronics Inc.).

Экспериментальная часть

Мощность разряда и мощность излучения KrCl-эксилампы в зависимости от давления и концентрации хлора в смеси приведены на рисунке 2.

Из рис. 2, *a* видно, что максимум мощности разряда находится в области давлений 15–24 · 10³ Pa, а максимальная мощность, потребляемая эксилампой,

составляет около 50 W и достигается для смесей Kr-Cl₂ = 300–1 и 400–1 при давлении 18–24 · 10³ Pa.

Максимум мощности излучения (рис. 2, *b*) смещается в сторону ббльших давлений при уменьшении содержания хлора и достигает максимального значения 4 W при давлении 24 · 10³ Pa (Kr-Cl₂ = 300–1). Дальнейшее уменьшение содержания хлора в смеси (ниже 300–1) приводит к снижению мощности излучения.

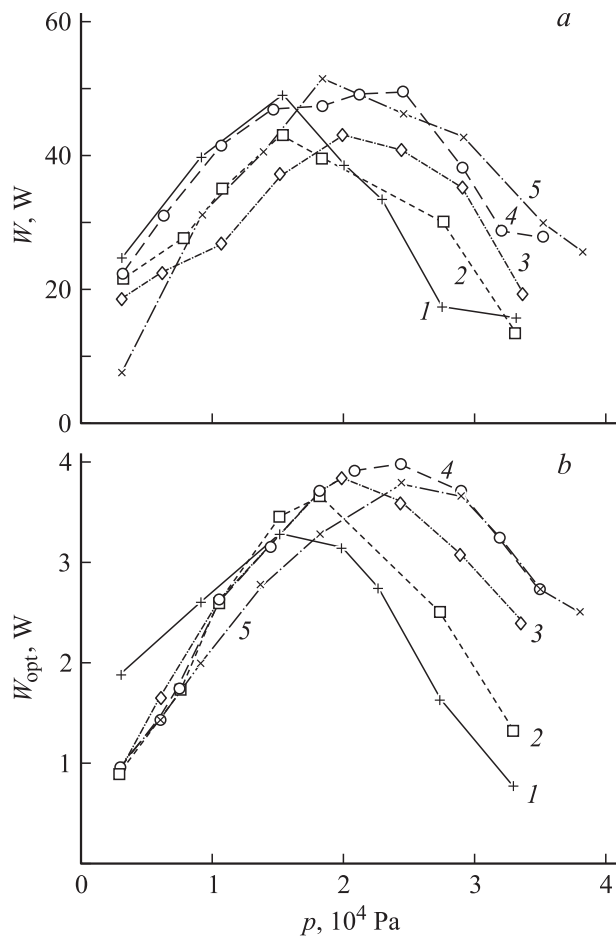


Рис. 2. Зависимость мощности разряда (*a*) и мощности излучения (*b*) KrCl-эксилампы от давления и состава смеси Kr-Cl₂: 50–1 — 1, 100–1 — 2; 200–1 — 3; 300–1 — 4; 400–1 — 5.

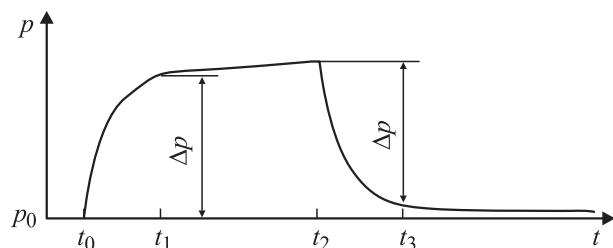


Рис. 3. Типичная осциллограмма скачка давления.

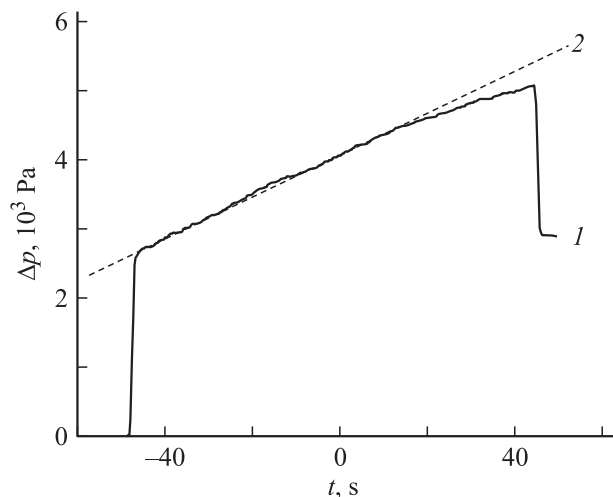


Рис. 4. Рост давления при работе эксилампы без использования охлаждения: эксперимент 1; линейная аппроксимация 2 (смесь Кг–Cl₂ = 300–1, начальное давление $2.4 \cdot 10^4$ Pa).

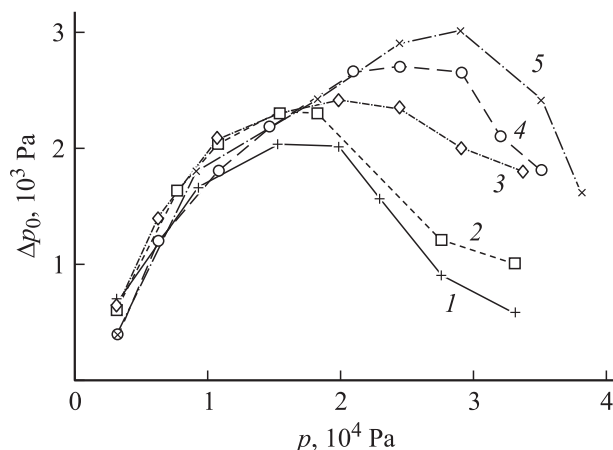


Рис. 5. Зависимость амплитуды быстрой части скачка давления в КгCl-эксилампе от давления и состава смеси Кг–Cl₂: 50–1 — 1; 100–1 — 2; 200–1 — 3; 300–1 — 4; 400–1 — 5.

Типичная осциллограмма скачка давления представлена на рис. 3. После включения лампы давление быстро возрастает (за характерное время 20–100 ms) на величину Δp . Далее происходит медленный рост давления (~ 100 s), который на больших временах стремится к насыщению. После выключения лампы происходит

быстрое снижение давления на Δp (30–160 ms), которое сменяется медленным экспоненциальным спадом.

На рис. 4 представлена осциллограмма скачка давления при работе КгCl-эксилампы в течение 100 s без использования охлаждения (смесь Кг–Cl₂ = 300–1, давление $24 \cdot 10^3$ Pa). Из рисунка видно, что рост давления является практически линейным и за 100 s составляет $2.5 \cdot 10^3$ Pa (для изохорического процесса повышение температуры равно 31 К). Мощность нагрева составляет 48 W, что хорошо согласуется со значением 50 W, полученным выше.

Через 100 s после выключения лампы давление линейно понизилось на $5 \cdot 10^2$ Pa, т.е. характерное время остывания колбы без охлаждения составляет около 500 s.

В случае использования охлаждения (обдув колбы эксилампы потоком сжатого воздуха) максимальное повышение медленной части скачка давления составляет $1.6 \cdot 10^3$ Pa, что эквивалентно нагреву колбы лампы на 20 К. После выключения лампы снижение давления происходит по экспоненциальному закону с характерным временем 50 s.

Зависимость амплитуды быстрой составляющей скачка давления от начального давления и состава смеси приведена на рис. 5. Из него видно, что при уменьшении содержания хлора в смеси Кг–Cl₂ максимум скачка давления повышается и смещается в сторону больших значений давления, при этом максимальный скачок давления составляет $3 \cdot 10^3$ Pa.

Аналогичные закономерности поведения скачка давления наблюдались и для Cl₂-эксилампы в режиме с охлаждением. Например, при уменьшении концентрации хлора в смеси Аг–Cl₂ максимум скачка давления также повышается и смещается в сторону больших давлений.

Анализ и обсуждение результатов

Оценим тепловую мощность разряда, идущую на непосредственный нагрев газа в кювете. Поскольку теплоемкость газа на три порядка ниже, чем теплоемкость кварцевой колбы, тепловые процессы в газе можно считать происходящими при квазистационарных граничных условиях (т.е. считать, что стенки колбы лампы имеют постоянную температуру).

Распределение температуры в газоразрядном промежутке при стационарных условиях нагрева приблизительно описывается следующим соотношением для распределения температуры между двумя плоскопараллельными пластинками [6]

$$\lambda \frac{d^2 \Delta T}{dx^2} = \frac{W}{V_0}, \quad (1)$$

где ΔT — скачок температуры газа; λ — коэффициент теплопроводности; V_0 — разрядный объем лампы; W — тепловая мощность, идущая на нагрев газа.

Для среднего по сечению разрядного промежутка скачка температуры $\langle \Delta T \rangle$ и распределения скачка температуры имеем выражения

$$\langle \Delta T \rangle = \frac{Wd^2}{12\lambda V_0}, \quad \Delta T(x) = \frac{Wx}{2\lambda V_0} \{d - x\}, \quad (2)$$

где d — ширина разрядного промежутка.

Скачок давления и $\langle \Delta T \rangle$ связаны следующим соотношением (предполагается, что они малы по сравнению с начальным давлением и температурой):

$$\frac{\langle \Delta T \rangle}{T_0} = \frac{V}{V_0} \frac{\Delta p}{p_0}, \quad (3)$$

где T_0 , p_0 — начальная температура и давление газа; Δp — скачок давления, V — полный объем газа в колбе эксилампы, включая разрядный и буферный.

Из соотношений (2) и (3) получаем следующую связь скачка давления и тепловой мощности, вкладываемой в газ W :

$$W = \frac{12\lambda \Delta p V T_0}{p_0 d^2}. \quad (4)$$

Рассмотрим условия, оптимальные для возбуждения Cl_2 -эксилампы на смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$. Как показали более ранние эксперименты [7] и подтвердило текущее исследование, наибольшая эффективность излучения полосы $^3\text{P}_{2g} \rightarrow ^3\text{P}_{2u}$ молекулы Cl_2^* с максимумом на 257.8 nm в барьерном разряде достигается при использовании буферного газа аргона в смесях $\text{Ar}-\text{Cl}_2 = 400-1$ при давлениях от 16 до $35 \cdot 10^3$ Pa (что зависит от величины газоразрядного промежутка). Поскольку доля хлора в смеси невелика, будем считать, что его ролью в процессе теплопроводности можно пренебречь. Для чистого аргона коэффициент теплопроводности при нормальных условиях $0.0167 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Поскольку ширина газоразрядного промежутка составляет $d = 8 \text{ mm}$, полный объем газа в эксилампе — $V \sim 170 \text{ cm}^3$, для указанной смеси Cl_2 -эксилампы при начальном давлении $2.64 \cdot 10^4$ Pa и скачке давления $\Delta p = 2.4 \cdot 10^3$ Pa тепловая мощность, вкладываемая в газ, равна 14 W. При этом электрическая мощность разряда, определенная по импульсам напряжения и тока через эксилампу, составляет около 35 W. В этом случае лампа излучала $\sim 0.6 \text{ W}$, а эффективность излучения полосы $^3\text{P}_{2g} \rightarrow ^3\text{P}_{2u}$ молекулы Cl_2^* по вложенной энергии составляла $\eta \sim 1.6\%$, что согласуется с величинами эффективности для этого сорта ламп, полученными ранее [7]. Таким образом, на непосредственный нагрев газа идет около 40% мощности разряда, около 1.6% тратится на УФ-излучение полосы $^3\text{P}_{2g} \rightarrow ^3\text{P}_{2u}$ молекулы Cl_2^* , неизвестная нам часть идет на излучение эксиплекса ArCl^* ($\lambda = 175 \text{ nm}$, в наших опытах она не оценивалась поскольку материал стенки колбы не пропускает вакуумное ультрафиолетовое излучение), а остальная мощность приводит к нагреву стенок колбы эксилампы за счет бомбардировки электронами и ионами.

Нами построена зависимость амплитуды быстрой составляющей скачка давления от мощности излучения $\Delta p_0(W_{\text{opt}})$ и мощности разряда $\Delta p_0(W)$ для KtCl -эксилампы. Они хорошо ложатся на линейные функции вида $\Delta p_0 = A_{\text{opt}} + B_{\text{opt}}W_{\text{opt}}$ ($\Delta p_0 = A + BW$). Относительная погрешность не превосходит 20–30%. Неплохим приближением является также линейная аппроксимация $\Delta p_0 = B'_{\text{opt}}W_{\text{opt}}$ ($\Delta p_0 = B'W$).

В табл. 2 приведены коэффициенты линейных аппроксимаций для зависимостей следующего вида: 1) $\Delta p_0 = A + BW$; 2) $\Delta p_0 = A_{\text{opt}} + B_{\text{opt}}W_{\text{opt}}$; 3) $\Delta p_0 = B'W$ и 4) $\Delta p_0 = B'_{\text{opt}}W_{\text{opt}}$. Коэффициенты аппроксимации определялись методом наименьших квадратов [8].

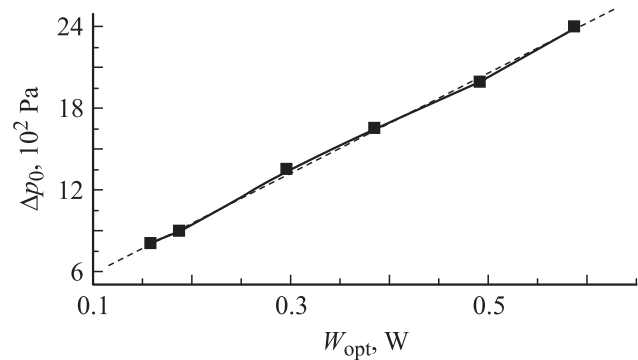


Рис. 6. Зависимость скачка давления от мощности излучения смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2 = 400-1$ (сплошная кривая) и линейная аппроксимация $\Delta p = A_{\text{opt}} + B_{\text{opt}}W_{\text{opt}}$ (пунктир), $A_{\text{opt}} = 2.28 \cdot 10^2$ Pa, $B_{\text{opt}} = 36.6 \cdot 10^2$ Pa.

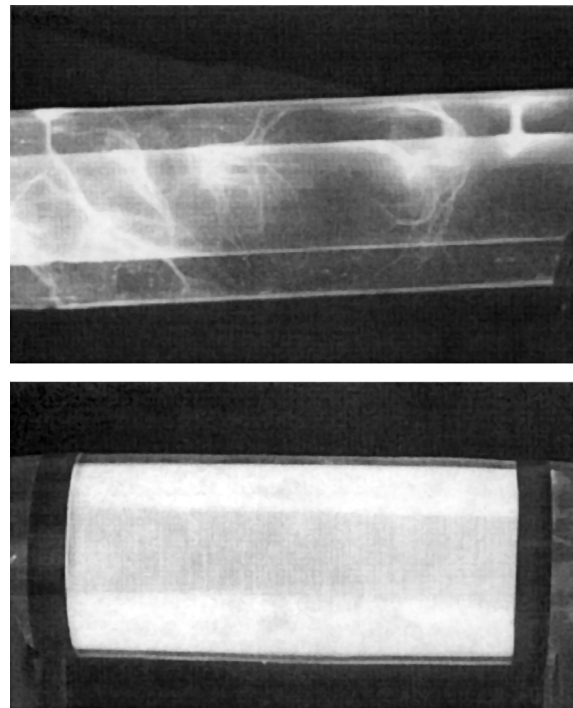


Рис. 7. Форма разряда при давлении около $4 \cdot 10^4$ Pa в KtCl -эксилампе (вверху) и Cl_2 -эксилампе (внизу).

Таблица 2. Коэффициенты линейных аппроксимаций скачка давления в KrcI-эксилампе

Отношение компонент	Коэффициенты линейных аппроксимаций					
	$A, 10^2 \text{ Pa}$	$B, 10^2 \text{ Pa/W}$	$A_{\text{opt}}, 10^2 \text{ Pa}$	$B_{\text{opt}}, 10^2 \text{ Pa/W}$	$B', 10^2 \text{ Pa/W}$	$B'_{\text{opt}}, 10^2 \text{ Pa/W}$
50:1	-0.73	0.45	-0.9	6.3	0.44	6.0
100:1	-0.37	0.54	2.7	5.7	0.53	6.7
200:1	3.8	0.48	3.7	5.5	0.6	6.8
300:1	-1.9	0.57	-0.47	6.9	0.52	6.8
400:1	2.7	0.53	-2.1	8.5	0.59	7.8
Среднее	0.71	0.51	0.58	6.6	0.54	6.8

Для Cl_2 -эксилампы экспериментальные зависимости $\Delta p_0(W_{\text{opt}})$ и $\Delta p_0(W)$ также хорошо ложатся на линейные аппроксимации. Пример зависимости $\Delta p_0(W_{\text{opt}})$ для смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2 = 400-1$ при начальном давлении $2.64 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ приведен на рис. 6. При использовании линейных аппроксимаций для контроля мощности излучения эксиламп следует иметь в виду тот факт, что в зависимости от условий возбуждения (давление, состав смеси, амплитуда и частота импульсного напряжения) форма разряда может изменяться, что ведет к изменениям в распределении энергии по объему. Например, барьерный разряд эксиламп на диагольгенах Cl_2^* , Br_2^* , I_2^* в широком диапазоне давлений (примерно до $6 \cdot 10^4 \text{ Pa}$) является диффузным [7,9]. В диффузном разряде нагрев газа определяется только плазмохимическими процессами, и можно применять линейную аппроксимацию без серьезных оговорок (см. рис. 6). В KrcI-эксилампах барьерного разряда при давлении ниже $5 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ разряд также является диффузным. Но в диапазоне $5-10 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ на фоне слабеющего диффузного свечения уже развивается большое количество микроразрядов. С ростом давления до $(2-3) \cdot 10^4 \text{ Pa}$ наблюдаются только микроразряды (филаменты) без фонового свечения, расстояние между ними растет, а эффективность излучения начинает падать. Снижается и однородность ввода энергии в среду. С последующим ростом давления формируются отдельные протяженные искры, неравномерно заполняющие внутренний объем лампы (рис. 7). В этом случае нагрев газа уже частично осуществляется в процессе диссипации энергии акустических колебаний, и линейная аппроксимация зависимости $\Delta p_0(W_{\text{opt}})$ неприменима.

Заключение

Исследования термодинамических процессов в KrcI- и Cl_2 -эксилампах барьерного разряда, проведенные с помощью измерения скачка давления, показали, что при включении (выключении) лампы зависимость скачка давления от времени состоит из быстрой ($\sim 100 \text{ ms}$) и медленной частей (100 s). Показано, что для контроля мощности излучения и качества разряда эксиламп можно использовать линейные зависимости между скачком

давления и интенсивностью ультрафиолетового излучения, полученные для конкретных условий, в которых возбуждается эксилампа.

Авторы выражают свою признательность Э.Н. Абдуллину за полезные обсуждения и М.В. Ерофееву за помощь в экспериментах. Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 3583р).

Список литературы

- [1] Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F. // J. Photochemistry and Photobiology C. 2006. Vol. 7. P. 145–163.
- [2] Eliasson B. and Kogelschatz U. // Appl. Phys. B. 1988. Vol. B46. P. 299–303.
- [3] Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Скаун В.С., Ерофеев М.В., Лисенко А.А. // ПТЭ. 2006. № 5. С. 5–26.
- [4] Соснин Э.А. // Светотехника. 2006. № 6. С. 25–31.
- [5] Zhang J.-Y., Boyd I.W. // Appl. Surface Sci. 2000. Vol. 168. P. 296–299.
- [6] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
- [7] Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Квант. электрон. 2008. Т. 38. № 8. С. 791–793.
- [8] Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
- [9] Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 4. С. 554–560.