Для всех серий экспериментов период колебаний составил  $(1\pm0,2)\cdot10^{-13}$  с. Это соответствует периоду собственных колебаний химической связи между атомами углерода в полимерной цепочке.

Концентрация дефектов в необлучённых образцах при 296 К составила 10<sup>13</sup> м<sup>-3</sup>. а их размер составлял около 2 мкм. После облучения объём неоднородностей увеличивался в 4...5 раз. Это может быть объяснено накоплением продуктов радиолиза в районе неоднородностей.

Динамика старения образцов эпоксидной изоляции при 77 К одинаково хорошо может быть объяснена двумя способами. Во-первых, изменение динамики старения можно объяснить появлением дополнительных механических напряжений действующих в районе неоднородностей (уменьшение коэффициента *C*). Причём уровень этих ло-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дмитревский В.С. Расчёт и конструирование электрической изоляции. М.: Энергоиздат, 1981. 392 с.
- Дмитревский В.С. Единая теория разрушения материалов и конструкций // Становление и развитие научных исследова-

кально действующих напряжений в два раза превышает предел прочности массивных образцов изоляции при нормальных условиях. Столь же успешно изменение динамики старения при азотной температуре объясняется появлением малоразмерных (5 нм) неоднородностей в количестве 10<sup>18</sup> м<sup>-3</sup>. При этом суммарный объём неоднородностей возрастал более чем в четыре раза. Оба варианта объяснения соответствуют появлению внутренних напряжений в охлаждённом образце.

Основным результатом нашей работы является корректное (с точки зрения математических методов обработки результатов измерений) доказательство справедливости термофлуктуационной теории Журкова—Дмитревского: экспериментальные вариационные ряды были приближены с точностью не хуже 4...10 %.

ний в высшей школе: Сб. трудов Междунар. научной конф., посвящённой 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьёва. – Томск, 2008. – Т. 1. – С. 326–331.

Поступила 15.01.2010 г.

УДК 535-3:53.083

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК KrCl-ЭКСИЛАМП БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Э.А. Соснин<sup>12</sup>, С.М. Авдеев<sup>1</sup>, М.В. Ерофеев<sup>1</sup>, В.М. Цветков<sup>3</sup>, А.А. Пикулев<sup>3</sup>, В.Ф. Тарасенко<sup>12</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

<sup>2</sup>Томский государственный университет

<sup>3</sup>Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров E-mail: pikulev@expd.vniief.ru

Для верификации данных об энергетических характеристиках KrCl-эксиламп барьерного разряда различными способами и в различных условиях возбуждения проведены измерения мощности и эффективности излучения. Показано, что величины эффективности излучения KrCl-эксиламп в исследованных условиях не превышают 7 %.

#### Ключевые слова:

Барьерный разряд, KrCl-эксилампа, эффективность излучения.

## Key words:

Dielectric barrier discharge, KrCl-excilamp, radiation efficiency.

Среди эксиламп с точки зрения практического применения одной из наиболее привлекательных ламп является лампа барьерного разряда на молекуле KrCl\* [1]. Типичный спектр такой лампы представляет собой интенсивную полосу B–X молекул KrCl\* с максимумом на  $\lambda$ =222 нм и полушириной  $\Delta\lambda_{1/2}$ ~1,7 нм. В одной из первых обзорных работ (1991 г.), посвященных барьерному разряду, было указано, что во многих случаях эффективность излучения эксиламп на полосах B–X эксиплексных молекул лежит в диапазоне от 5 до 10 %, но конкретные данные об условиях получения этих вели-

чин приведены не были [2]. Полученные разными авторами впоследствии величины эффективности  $\eta$  отличаются в несколько раз [3–10], а данные об условиях, в которых они были достигнуты, не всегда полны и почти отсутствуют сведения о методиках измерений (табл. 1). Или, напротив, подробно даётся методика измерений без описания условий получения эксиплексной люминесценции [10].

Поэтому к настоящему времени актуальной с практической точки зрения является задача достоверного определения величины эффективности излучения, задающей предельные возможности тех-

Питание эксиламп					14
Форма импульса напряжения	Частота следования импульсов ƒ, кГц	Смесь Kr-Cl <sub>2</sub>	Давление <i>р</i> , кПа	η, %	информации
-	≥100	-	-	6,522,5	[3]
-	125375	660-1	30	815	[4]
Синусоида	17		-	811	
Однополярный	10100	(200400)-1	-	1115	[5]
Двухполярный	10100		-	-	
Двухполярный	40	400-1	24	5,2	[6]
Синусоида	4	He-100-1	19,4	11	[7]
-	280	(2001000)-1	~33	>6	[8]
Синусоида	22	Ne-40-1	60	13	[9]
-	-	_	_	718	[10]

Таблица 1. Данные об эффективности KrCl-эксиламп

нологий, в которых могут быть использованы эксилампы. Следует отметить, что используемые для определения мощности излучения приемники также могут давать различия в результатах измерений.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка литературных данных об энергетических характеристиках KrCl-эксиламп при различных условиях возбуждения с использованием современных фотоприёмников. Для большей надёжности проверка осуществлялась в двух независимых организациях — в Институте сильноточной электроники CO PAH (г. Томск) и во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (г. Саров). В нашей работе наиболее пристальное внимание мы уделили исследованию смесей Kr–Cl<sub>2</sub>=(100...200)–1, т. е. таких, в которых может быть достигнут значительный ресурс работы эксилампы [11].

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 или переменного напряжения от источника – 9, а излучение из газоразрядного объёма – 4 выводилось наружу через перфорированный электрод – 2. Параметры эксиламп и источников питания сведены в табл. 2. Частота следования импульсов напряжения в опытах была фиксирована и составляла 50 кГц. Диаметр внешней трубки составлял 43 мм.

Статическое давление в колбе контролировалось по вакуумметру – 5. Смеси для эксиламп готовились в газовом посту – 7, который отсекался от установки.



Рис. 1. Экспериментальная установка: 1) колба лампы; 2) перфорированный внешний электрод; 3) внутренний электрод-отражатель; 4) газоразрядный объём; 5) вакуумметр; 6) отвод к откачному посту; 7) спектрофотометр; 8) оптоволокно; 9) импульсный источник питания; 10) фотоприёмник

Мощность излучения ламп в диапазоне длин волн  $\lambda$ =200...350 нм определялась с помощью фотоприемника — 10 НАМАМАТЅU H8025-222 (с максимумом спектральной чувствительности на 222 нм) и детектором UV-818, работающим совместно с измерителем мощности Newport 1830-C Picowatt Digital Optical Power Meter. Обзорный спектр

Источники питания							
	ИП1	ИП2	ИПЗ				
Форма импульса напряжения	Разнополярные пички,	Прямоугольные, скважность <i>S</i> =13	Разнополярные, треугольные, с крутым фронтом τ <sub>1</sub> =120 нс и спадом τ <sub>1</sub> =9,8 мкс				
Длительность импульса на полувысоте $\tau_{0,5}$ , мкс	~1	~1,4	2				
U <sub>max</sub> , кВ	±4,2	4,8	±3,5				
Колбы							
	K1	K2	K3				
Диаметр внутренней трубки, мм	25	20	23				
Рабочая длина, мм	120	300	300				

Таблица 2. Параметры эксиламп и источников питания

излучения разряда регистрировался через оптоволокно — 8 с известным спектром пропускания спектрометром StellarNet EPP2000-C25 (StellarNet Inc.) на основе многоканальной п.з.с.-линейки Sony ILX511 (рабочий диапазон 200...850 нм, спектральная полуширина его аппаратной функции не превышает 1,5 нм).

Мощность разряда определялась по осциллограммам импульсов напряжения и тока, регистрируемым осциллографами TDS 3014B и TDS 224 (Tektronics Inc.). Импульсы напряжения снимали посредством ёмкостного делителя напряжения. Импульсы тока снимали калиброванным поясом Роговского и токовым шунтом. Активная мощность, вкладываемая в колбу определялась как

$$P = 2f \int_{0}^{T/2} I(t) \cdot U(t) dt,$$
 (1)

где T – период; I(t) и U(t) – мгновенные значения тока и напряжения.

Кроме того, активную мощность определяли по вольт-кулоновским характеристикам (циклограммам) U(q) [6], где q — заряд, переносимый током разряда

$$q(t) = C_q \int_{0}^{T/2} U_q(t) dt,$$
 (2)

где  $C_q$  – ёмкость, установленная вместо токового шунта, причем  $C_q >> C_6$  ёмкости диэлектрических барьеров и заполняющей их газовой среды (обычно  $C_6$  не превышает нескольких десятков пФ), а  $U_q(t)$  – напряжение на ёмкости  $C_q$ . Тогда активная мощность есть интеграл от циклограммы:

$$P = f \diamondsuit U(q) dq.$$

В ходе исследований были проведены измерения энергетических характеристик эксиламп на бинарных смесях  $Kr-Cl_2$  с соотношениями компонент (100...400)–1 при  $4 \le p \le 60$  кПа. Обратимся к лучшим полученным результатам:

При использовании генератора разнополярных треугольных ИПЗ и колбы КЗ наибольшие значения интенсивности излучения были получены для смесей Kr-Cl<sub>2</sub>=(300...350)-1. При *p*~27 кПа обеспечивалось лучшее заполнение рабочего объема микроразрядами. Наибольшая плотность мощности излучения полосы B-X молекул KrCl\* в этих условиях 7,5 мВт/см<sup>2</sup>, что соответствует полной мощности излучения лампы 3,2 Вт. При данных параметрах газовой смеси достигается равномерное распределение филаментов по объему разряда. Активная мощность разряда, рассчитанная по ур. (1), составила 106 Вт, соответственно, эффективность составила около 3 %, что при учете пропускания внешнего электрода (60 %) дает полную эффективность около 5 %. В этих условиях разряд состоял только из диффузных микроразрядов.

При использовании генератора однополярных импульсов трапециевидной формы ИП2 и колбы К1 наибольшие значения интенсивности излучения были получены для смесей Kr–Cl<sub>2</sub>~200–1. При  $p \sim 18 \text{ к} \Pi a$  обеспечивалось лучшее заполнение рабочего объема микроразрядами по сравнению с более высокими величинами *р* (рис. 2). При снижении *р* на фоне микроразрядов развивается объёмное свечение, которое далее становится преобладающим. При этом мощность излучения падает. Наибольшая плотность мощности излучения полосы В-Х молекул KrCl\* в этих условиях 9,4 мВт/см<sup>2</sup>, что соответствует полной мощности излучения лампы 2,3 Вт. Активная мощность разряда, рассчитанная по ур. (2), составила 42,5 Вт, соответственно, эффективность составила 3,6 %, что при учете пропускания внешнего электрода (66 %) дает полную эффективность около 5,5 %.



Рис. 2. Зависимость средней мощности ультрафиолетового излучения и эффективности лампы К1, возбуждаемой от генератора ИП2 от давления в смеси Kr-Cl<sub>2</sub>=200-1

При использовании генератора разнополярных пичков треугольной формы ИП1 и колб К1, К2 наибольшие значения интенсивности излучения были получены для смесей Kr-Cl<sub>2</sub>~(200...300)-1. При *p*~22,5 кПа для колбы К1 обеспечивалось лучшее заполнение рабочего объема микроразрядами. Наибольшая плотность мощности излучения полосы B-X молекул KrCl\* в этих условиях 14,4 мВт/см<sup>2</sup>, что соответствует полной мощности излучения лампы 2,3 Вт. Активная мощность разряда, рассчитанная по ур. (2), составила 89,5 Вт (рис. 3), соответственно, при  $\eta = 2,6$  %, что с учётом пропускания внешнего электрода полную эффективность около 4 %. Для колбы К2 наибольшие величины эффективности и мощности были получены в смесях Kr-Cl<sub>2</sub>~400-1. Это можно объяснить большой величиной газоразрядного промежутка, что требует меньшего содержания галогена в смеси для облегчения зажигания и стабильного горения разряда. В оптимальных условиях получены мощность и эффективность излучения 3 Вт и 3,5 %, соответственно.



Рис. 3. Зависимость средней мощности ультрафиолетового излучения и эффективности излучения лампы К1, возбуждаемой от генератора ИП1 от давления в смеси Kr-Cl₂=200-1

Следует отметить, что величины  $\eta$ , полученные для колбы К2, близки к приведенным в [6, 8] и мо-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Boyd I.W., Zhang J.-Y., Kogelschatz U. Development and Applications of UV Excimer Lamps // In Book: Photo-Excited processes, Diagnostics and Applications / Ed. A. Peled. – The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003. – P. 161–199.
- Eliasson B., Kogelschatz U. Modeling and applications of silent discharge plasmas // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1991. – V. 19. – № 2. – P. 309–323.
- Zhang J.-Y., Boyd I.W. Lifetime investigation of excimer UV sources // Applied Surface Science. – 2000. – V. 168. – P. 296–299.
- Zhang J.-Y., Boyd I.W. Efficient excimer ultraviolet sources from dielectric barrier discharge in rare-gas/halogen mixtures // J. Applied Physics. – 1996. – V. 80 (2). – P. 633–638.
- Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Мощная и эффективная KrCl эксилампа барьерного разряда // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28. – Вып. 1. – С. 74–80.
- Шитц Д.В., Ерофеев М.В., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Авдеев С.М. Эксилампы барьерного разряда с воздушным охлаждением // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 6. – С. 114–118.
- Neiger M. Dielectric barrier discharges: an unusual new light source // Proc. Int. Symp. on Science & Technology of Light Sources (Budapest 10.08–03.09.1992). – Budapest, 1992. – 13: I – P. 75–82.

гут быть несколько увеличены, если использовать кварц с лучшим пропусканием в B-X полосе молекулы KrCl\*: в нашем случае в максимуме указанной полосы (222 нм) кварц марки TKr имеет пропускание 67 %. Если оценить эффективность излучения так, как если бы кварцевая оболочка его не поглощала, то получим эффективность ~7 %, что близко к данным [4, 5, 8, 10].

# Выводы

Измерения энергетических характеристиках KrCl-эксиламп барьерного разряда, проведенные в различных лабораториях с использованием современных фотоприёмников, показали, что наибольшие значения эффективности излучения при большом сроке службы рабочей смеси составляют 3,5...5,5 %. При определении активной мощности разряда использовались различные методы измерений, которые дали сопоставимые результаты.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 3583р).

- Arnold E., Driskemper R., Reber S. High power excimer sources // Proc. of the 8<sup>th</sup> International Symposium on the Science and Technology of Light Sources (LS-8), Greifswald, Germany, 30 Aug.-3 Sept. 1998. – Greifswald, 1998. – IL12. – P. 90–98.
- Boichenko A.M., Skakun V.S., Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. Emission Efficiency of Exciplex and Excimer Molecules Pumped by a Barrier Discharge // Laser Physics. – 2000. – V. 10. – № 2. – P. 540–552.
- Heering W. Goniophotometric measurements on high power UV lamps // 196<sup>th</sup> PTB-Workshop on Traceability in UV Dosimetry – Applications and Requirements, Karlsruhe, Sept. 22, 2004. – Karlsruhe, 2004. – P. 24.
- Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Факторы, ограничивающие срок службы отпаянных эксиламп барьерного разряда, содержащих хлор // Оптический журнал. 2009. Т. 77. Вып. 1. С. 11–17.
- Самойлович В.Т., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М. Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.

Поступила 06.11.2009 г.