

УДК 621.327

## Разрядные источники излучения с сапфировой оболочкой

С. В. Гавриш

*Рассмотрены основные достижения в области конструирования разрядных источников с сапфировой оболочкой. Показаны преимущества синтетического корунда перед другими оптическими материалами, используемыми в газоразрядных лампах. Проанализированы возможности повышения эффективности натриевых ламп высокого давления (НЛВД), модулируемых ИК-источников и импульсных ксеноновых ламп УФ-излучения. Намечены пути дальнейшего расширения области применения плазмы высокого и сверхвысокого давления, ограниченной сапфировой оболочкой. Рассмотрены конструктивные решения источников излучения коаксиального типа и ВЧ-разряда.*

PACS: 07.50.-e

*Ключевые слова:* сапфир, корунд, плазма, импульс, щелочной металл, натриевый разряд, цезиевый коаксиальный разряд, ВЧ-разряд, короткодуговая лампа, спектр излучения.

### Введение

Данная публикация посвящена рассмотрению основных результатов исследований различных разрядных источников излучения с сапфировой (лейкосапфировой, корундовой) оболочкой, проведенных автором на протяжении более двадцати пяти лет. Интерес к корунду обусловлен его уникальными свойствами. Это прежде всего широкий оптический диапазон прозрачности от 0,2 до 6,0 мкм, устойчивость к воздействию агрессивных сред, в частности щелочных металлов, при температурах вплоть до 1500 °С и т. д.

Однако указанный материал обладает недостатками. Это относительно высокая цена сапфировой трубы и анизотропные термические свойства, создающие трудности в получении герметичного соединения электродного узла с разрядной колбой. Первый недостаток был устранен в результате разработки группового способа выращивания монокристаллов корунда по методу В. А. Степанова [1]. Для решения второй проблемы потребовалось изучение связи между температурными, структурными и прочностными свойствами корунда [2]. Таким образом, в конце прошлого века появились предпосылки промышленного выпуска разрядных источников излучения с сапфировой оболочкой различного назначения.

### Натриевые лампы высокого давления

В настоящее время данный класс газоразрядных источников является наиболее эффективным. Светоотдача (СО) натриевого разряда высокого давления достигает 120 лм/Вт. Существует несколько способов повышения СО НЛВД [3]. Одним из них является использование в качестве оболочки горелки прозрачной трубки из искусственного сапфира вместо традиционно применяемой поликристаллической окиси алюминия (ПОА, поликор). Корунд имеет более высокий (на 5—6 %) коэффициент пропускания. Кроме этого, монокристаллическая структура сапфира препятствует утечке натрия из разряда и, как следствие, повышается срок службы ламп [3].

Авторами была разработана бесштенгельная конструкция НЛВД, представленная на рис. 1. Особенностью такого варианта является использование в качестве соединяющего элемента ниобиевого колпачка 4. Известно, что выращенная сапфировая труба имеет волнистую внутреннюю поверхность. Это явление связано с вибрацией штока с затравкой в процессе направленной кристаллизации трубы из расплава [1]. Поэтому для надежного соединения токоввода с корундовой оболочкой 1 производится подшлифовка ее внутренней поверхности на определенную глубину  $l_1$ . Дополнительно такой прием позволяет удалить зону спая от скопления дефектов на торце трубки после ее обрезки.

Известно [3], что световые и электрические параметры лампы определяются температурой самой холодной точки (т.х.т.) лампы. Учитывая высокую теплопроводность сапфира и ниобия, можно ожидать, что в предложенном варианте конструкции

Гавриш Сергей Викторович, начальник НПК.  
ЗАО «СКБ "Зенит"».

Россия, 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., 10, стр. 5.

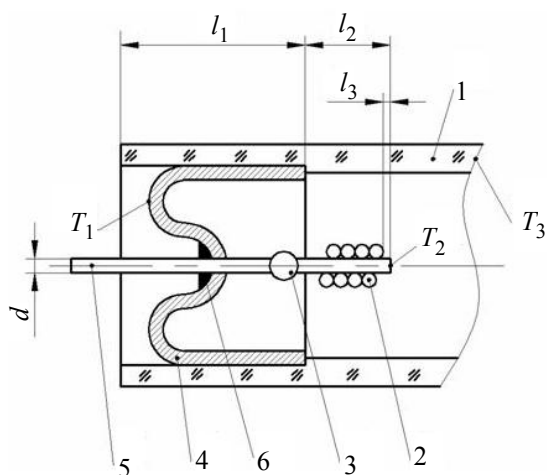
Тел. (495) 983-01-94. E-mail: svgavr@list.ru

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2010 г.

т.х.т. будет зависеть от устройства электродного узла и электрической мощности горелки.



a



b

Рис. 1. Внешний вид натриевой лампы высокого давления:

a — лампа с сапфировой оболочкой;

b — конструкция электродного узла:

1 — разрядная трубка; 2, 3 — вольфрамовые спираль и kern электрода; 4 — ниобиевый колпачок; 5 — ниобиевый проволочный ввод; 6 — герметизирующий титановый припой.

$T_i$  — температурные точки

В ходе проведенных исследований было рассчитано распределение температурных полей оболочки сапфировой горелки, включая электродные зоны, что послужило основой для вычисления спектрально-энергетических характеристик Na—Hg—Xe и Na—Xe-разрядов [4]. В качестве примера на рис. 1 приведено конструктивное исполнение электродного узла с обозначением основных температурных точек  $T_i$ , определяющих теплофизические процессы в натриевом разряде. В расчетах принято, что доля электрической мощности, затрачиваемой на нагрев оболочки, составляет 0,35 [3], а часть мощности, поступающей в виде теплового потока на торец электрода, не превышает 0,03. При вычислениях использованы конструктивные параметры, определенные экспериментальным путем для серийной лампы ДНаТ-250 [3], а именно внутренний диаметр разрядной трубки равен 6,8 мм, толщина сапфировой оболочки — 1,0 мм, диаметр электрода — 1,0 мм, диаметр спирали, намотанной на kern, равен 4,2 мм при диаметре проволоки, равном 0,3 мм.

Результаты расчетов показывают, что изменение толщины  $h$  ниобиевой фольги, из которой из-

готовлен колпачок 4, слабо влияют на температурный режим узла. Так, в диапазоне варьирования  $h = 0,15—0,25$  мм при постоянной мощности разряда температура торца электрода  $T_2$  и температура холодной точки лампы  $T_1$  меняются менее, чем на 2 %. Более заметное влияние на указанные температуры оказывает величина вылета электрода  $l_2$ . Увеличение  $l_2$  от 1,0 до 10 мм снижает  $T_1$  на 80 °С, а  $T_2$  — на 35 °С. При этом температура оболочки  $T_3$  меняется слабо.

При увеличении электрической мощности разряда от 150 до 250 Вт температуры  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  увеличиваются до 20 %. При этом, как и ранее, фактором, определяющим тепловое состояние лампы, остается вылет электрода  $l_2$ .

Таким образом, регулировать температуру холодной точки (давление паров в разряде) возможно, прежде всего, за счет варьирования  $l_2$ . Другими воздействующими факторами на  $T_1$  являются диаметр держателя 3, площадь контакта колпачка 4 с держателем 6 и оболочкой 1. Данные способы регулирования т.х.т. имеют важное значение и в дальнейшем были использованы при конструировании других источников с разрядом в парах металлов.

Исследования световых и электрических характеристик экспериментальных образцов НЛВД подтвердили преимущества корундового баллона перед поликоровым. Световая отдача ламп с сапфировой разрядной трубкой, при прочих равных условиях, на 10—15 % выше, чем у натриевых источников света с поликоровой горелкой. В процессе наработки у экспериментальных ламп наблюдается скорость роста напряжения на лампе на 20—30 % ниже по сравнению с поликоровыми горелками.

Проведенные расчеты также показали, что использование НЛВД с сапфировой разрядной трубкой в светильниках позволяет улучшить на 20 % эффективность световых систем за счет отсутствия рассеивания светового потока оболочкой горелки.

В данном разделе не приведены результаты экспериментальных и расчетных работ при участии автора в области создания экологически чистой безртутной натриевой лампы высокого давления [4]. Сложившаяся экономическая ситуация в 80-е годы прошлого века, к сожалению, не позволила продолжить начатые работы в направлении улучшения качества ламп, а именно повышения СО, улучшения цветопередачи и т. д. Однако полученные конструктивные и технологические решения в дальнейшем были использованы при конструировании других разрядных источников излучения.

### Импульсные разрядные источники среднего ИК-диапазона

Данный класс газоразрядных ламп изначально разрабатывался для систем постановки оптико-электронных помех головкам самонаведения управляемых ракет [5]. Полученные научные данные и конструктивные решения позволили внедрить в серийное производство типоряд импульсных цезиевых ламп с двумя сапфировыми оболочками мощностью до 2,5 кВт. Основные экспериментальные результаты и созданные методы математического моделирования импульсной цезиевой плазмы подробно рассмотрены в работах [6—8].

В настоящее время представляет интерес расширение сфер применения созданного класса модулируемых ИК-источников. По этой причине требуется изучение энергетического баланса излучения указанных ламп. Измерениям интегральных по спектру КПД импульсных ламп с разрядом в парах щелочных металлов посвящено ограниченное число работ. В отличие от разряда в инертных газах излучение плазмы щелочного металла зависит от теплового режима горелки, которое, в свою очередь, определяется условиями электрического питания разрядной лампы.

Для измерения КПД в зависимости от электрических режимов работы лампы пригоден метод, суть которого заключается в измерении калориметрическим приемником энергии излучения спектрального интервала, выделенного различными оптическими фильтрами. В этом случае для определения спектральной мощности цезиевой лампы необходимо знать эквивалентный телесный угол (индикатрису), энергию излучения лампы по нормали в различных интервалах длин волн и коэффициенты пропускания используемых фильтров.

Измерение индикатрисы в относительных единицах проводилось при помощи горизонтального поворотного стола через  $10^\circ$ . В качестве приемника ИК-излучения использовался фотодиод ФД119,

для видимого диапазона был применен фотометр Ф005. Каждая точка индикатрисы получалась путем усреднения не менее трех измерений пиковой силы излучения или освещенности.

Эквивалентные телесные углы в видимом и ИК-диапазоне рассчитывались по полученным индикатрисам методом зональных телесных углов [9] с шагом линейного угла  $10^\circ$ .

По полученным индикатрисам был рассчитан эквивалентный угол  $\Omega$  для видимого диапазона — 11,01, а для ИК — 10,51.

Энергия некогерентного излучения лампы по нормали определялась посредством калориметрического измерителя импульсов ИМО-2Н. Этот прибор характеризуется неселективностью в широком спектральном интервале, большим диапазоном линейности, высокой воспроизводимостью и надежностью метрологических свойств. Приемник располагался перпендикулярно оптической оси лампы на расстоянии более 10 значений межэлектродного промежутка (в нашем случае расстояние между плоскостью измерительной диафрагмы и осью канала разряда лампы составляло 90 см). Измерительная головка ИМО-2Н была оборудована специально встроенной точной диафрагмой, площадь которой была равна  $165 \text{ мм}^2$ . Для выделения спектральных диапазонов использовались интерференционные фильтры, диапазоны пропускания и экспериментальные результаты которых приведены в табл. 1. Показания измерителя энергии импульсов ИМО-2Н расчетным путем приводились к 100%-ному пропусканию спектральных фильтров.

Исследуемая лампа работала в разрядном контуре, в электрических режимах, подробно рассмотренных в работе [7]. Исследовались две мощности на лампе, которые определялись величиной напряжения на разрядном конденсаторе.

Доля излучения источника  $P_{\text{и}}$  от электрической мощности  $P_{\text{л}}$ , вводимой в разряд, определялась по формуле  $\eta_{\text{и}} = (P_{\text{и}}/P_{\text{л}}) \cdot 100 \%$ .

Таблица 1

КПД излучения в различных спектральных интервалах,  $\eta_{\text{и}}$ 

Тип лампы	Режим испытаний	Спектральный диапазон, мкм				
		0,3—3,0	0,8—3,0	2,0—4,0	3,5—6,0	0,3—10,6
7/90	$L = 54 \text{ мкГн}; C = 40 \text{ мкФ}; U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}; P_{\text{ср}} = 1,5 \text{ кВт}; P_{\text{вд}} = 160 \text{ Вт/см}$	35,0	12,0	2,4	<b>2,2</b>	39,0
7/90	$L = 54 \text{ мкГн}; C = 40 \text{ мкФ}; U_{\text{ф}} = 280 \text{ В}; P_{\text{ср}} = 2,5 \text{ кВт}; P_{\text{вд}} = 280 \text{ Вт/см}$	40,0	15,0	2,8	2,4	44,0
7/90	$L = 29 \text{ мкГн}; C = 40 \text{ мкФ}; U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}; P_{\text{ср}} = 1,5 \text{ кВт}; P_{\text{вд}} = 160 \text{ Вт/см}$	35,0	11,0	2,0	1,5	36,0
7/90	$L = 29 \text{ мкГн}; C = 40 \text{ мкФ}; U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}; P_{\text{ср}} = 2,5 \text{ кВт}; P_{\text{вд}} = 280 \text{ Вт/см}$	40,0	15,0	3,6	2,2	35,0
7/90	$L = 73 \text{ мкГн}; C = 60 \text{ мкФ}; U_{\text{ф}} = 238 \text{ В}; P_{\text{ср}} = 2,5 \text{ кВт}; P_{\text{вд}} = 280 \text{ Вт/см}$	40,0	13,0	2,4	2,2	42,0
11/90	$L = 54 \text{ мкГн}; C = 40 \text{ мкФ}; U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}; P_{\text{ср}} = 1,5 \text{ кВт}; P_{\text{вд}} = 160 \text{ Вт/см}$	38,0	10,0	2,4	2,0	40,0
11/90	$L = 54 \text{ мкГн}; C = 40 \text{ мкФ}; U_{\text{ф}} = 280 \text{ В}; P_{\text{ср}} = 2,5 \text{ кВт}; P_{\text{вд}} = 280 \text{ Вт/см}$	44,0	23,0	4,0	3,0	50,0

В данной работе были проведены расчетные исследования спектрального распределения КПД в интервале длин волн. Для этих целей авторами разработана математическая модель и реализующее ее программное обеспечение. В модели учитывается многокомпонентный состав плазмы, нестационарность процессов, перенос излучения в непрерывном и дискретном спектрах в плазме и системе двойных оболочек, газодинамика, внешняя электрическая цепь [8].

В результате ее реализации получено спектральное распределение КПД для различных удельных мощностей разряда  $P_{уд}$ . В табл. 2 приведены результаты расчета КПД в спектральном диапазоне 3,5—5,5 мкм для импульсной цезиевой лампы 7/90 при фиксированном составе плазмообразующей среды Cs—Hg—Xe (5—1—1,5), работающей с частотой 500 Гц.

Сопоставление экспериментальных результатов, приведенных в табл. 1 (см. выделенные ячейки) для лампы, работавшей в оптимизированном разрядном контуре, с расчетными данными табл. 2 для аналогичных режимов электрического питания, показывает удовлетворительную точность математической модели.

Сформированная в [8] математическая модель позволила произвести расчет спектрального рас-

пределения КПД излучения ламп с различными конструктивными характеристиками, работающими в различных электрических цепях. В качестве примера на рис. 2 приведены полученные расчетные результаты для импульсной цезиевой лампы с размерами разрядного промежутка 7/90 при работе с  $P_{уд} = 80$  Вт/см и частотой следования токовых импульсов 500 Гц. Приведенные данные позволяют определить эффективность импульсного цезиевого разряда в любом спектральном диапазоне.

Как следует из рис. 2, значительная часть излучения импульсного цезиевого разряда сосредоточена в видимой части оптического диапазона. По этой причине рассмотренные в работах [5—7] конструкция лампы и схемные электрические решения были использованы автором совместно с сотрудниками лаборатории низкотемпературной плазмы ФТИ им. А. Ф. Иоффе при исследованиях возможности создания импульсного цезиевого источника света, проводимых при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-08-00600-а). Расчетные и экспериментальные результаты изучения импульсно-периодического разряда в парах цезия высокого давления подробно рассмотрены в [10, 11] и в данной работе не приводятся.

Таблица 2

Расчетные значения КПД излучения в спектральном интервале 3,5—5,5 мкм,  $\eta$

$I$ , А	$E$ , В/см	$T_0$ , К	$T_{ст}$ , К	$P_{Xe}$ , мм рт. ст.	$P_{Cs}$ , мм рт. ст.	$P_{уд}$ , Вт/см	$\eta_{3,5-5,5}$ , %
50	27,1	4204	900	80	280	81,2	4,1
100	25,7	4861	1100	67	235	<b>154</b>	<b>2,8</b>
200	26,9	5701	1300	53	185	322	1,7
300	29,7	6448	1700	44	156	534	1,2

Примечание.  $I$  — пиковое значение тока;  $E$  — градиент напряжения;  $T_0$ ,  $T_{ст}$  — температура на оси и стенке разрядной трубки;  $P_{Cs}$ ,  $P_{Xe}$  — рабочее давление ксенона и цезия;  $P_{уд}$  — удельная мощность разряда.

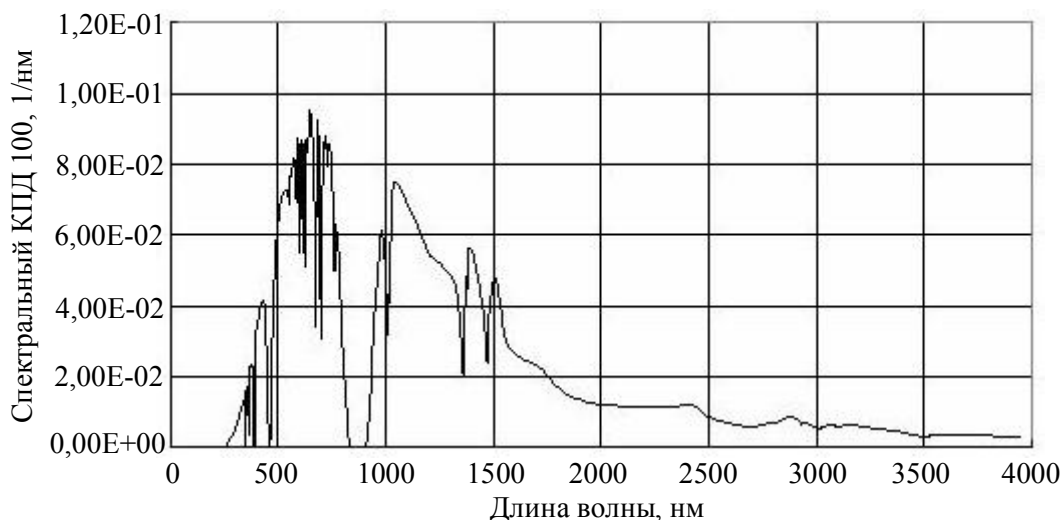


Рис. 2. Спектральное распределение КПД излучения импульсного цезиевого разряда

### Импульсная ксеноновая лампа УФ-излучения

В настоящее время является актуальным вопрос создания эффективных источников УФ-излучения для медицины, санитарии и микробиологии. Использование свечения импульсной ксеноновой лампы с кварцевой оболочкой имеет ряд преимуществ перед традиционно применяемым ртутным разрядом низкого давления. Это, прежде всего, максимальная эффективность бактерицидного действия на микроорганизмы, определяемая высокой интенсивностью излучения в спектральном диапазоне 200—300 нм [12].

Однако у данного класса ламп наблюдается эффект "запирания" УФ-излучения [13], связанный с изменением агрегатного состояния (мгновенное кипение и испарение кварца при температуре 2500 °С). Причиной поглощения УФ-излучения может быть термохимический распад структуры  $\text{SiO}_2$  с образованием новых поглощающих центров  $\text{SiO}$ ,  $\text{Si}$  [13]. Учитывая, что температура кипения монокристаллической окиси алюминия (сапфира, корунда) равна 3500 °С [14], можно ожидать отсутствие эффекта "запирания" УФ-излучения в импульсных ксеноновых лампах с корундовой оболочкой. Исследованию возможности создания таких ламп посвящены описанные ниже исследования.

Работа проводилась в два этапа. Для обоснованного выбора конструктивных параметров и режимов работы ламп была использована математическая модель нестационарного сильноизлучающего разряда, стабилизированного стенкой [8]. На основе модели выполнено исследование влияния геометрических размеров разрядной трубки, давления наполнения плазмообразующей среды, а также параметров разрядного контура на выход излучения в спектральной области от 200—450 нм.

Полученные расчетные данные показывают, что пиковая сила излучения  $I$  в УФ-области существенно зависит от мгновенной удельной электрической мощности разряда  $w$ , в то время как рост давления практически не оказывает влияния на  $I$ .

Например, при фиксированном радиусе плазменного канала  $R = 0,25$  см и давлении ксенона в холодном состоянии  $p_0 = 100$  мм рт. ст. увеличение пиковой удельной электрической нагрузки  $w$  от  $10^3$  до  $1,2 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>3</sup> приводит к росту  $I$  от 8,8 до 190 Вт/ср. В то время как при постоянной величине  $w$ , например,  $10^3$  Вт/см<sup>3</sup>, рост давления Хе от 100 до 400 мм рт. ст. способствует незначительному увеличению пиковой силы УФ-излучения с 8,8 до 11 Вт/ср.

На рис. 3, а показано конструктивное исполнение разработанной импульсной ксеноновой лампы

с сапфировой оболочкой. На разрядную трубку 1 в зоне А наносится и вжигается металлизированное покрытие, с которым посредством специального припоя соединяются тонкостенные металлические колпачки 2. Предварительно собранный электрод 3 с держателем 4 (токоввод в лампу) спаивается с колпачком 2. Через установленный в одном из электродных узлов металлический штенгель 5 производится откачка и наполнение ксеноном разрядного объема.

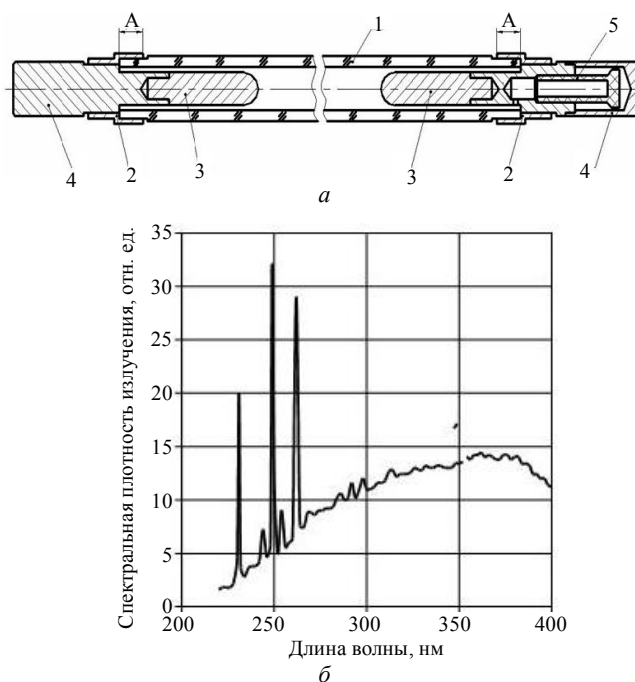


Рис. 3. Импульсная ксеноновая лампа:

а — конструкция лампы; б — спектральное распределение излучения в максимуме тока ( $w = 3,07 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>3</sup>):

1 — сапфировая разрядная трубка; 2 — коваровый колпачок; 3 — электрод; 4 — защитный колпачок; 5 — откачной штенгель

Исследуемый образец импульсной ксеноновой лампы с сапфировой оболочкой имел внутренний диаметр разрядного канала 0,5 см, межэлектродное расстояние 10,0 см и давление Хе в холодном состоянии 300 мм рт. ст. Работа источника УФ-излучения осуществлялась в разрядном контуре при напряжении  $U = 1400$  В на накопительном конденсаторе емкостью  $C = 60$  мкФ и с частотой следования токовых импульсов 3 Гц. Таким образом, энергия в импульсе составляла 60 Дж, а средняя мощность не превышала 180 Вт.

Контроль электрических характеристик осуществлялся осциллографом TDS 2022 посредством пояса Роговского и делителя напряжения 1:1000. При работе лампы в указанных выше режимах при напряжении 820 В амплитудное значение тока достигало 750 А. Таким образом, мгновенное сопротивление лампы составляет 0,96 Ом, пиковые значения мощности и удельной электрической нагрузки, соответственно,  $6,15 \cdot 10^5$  Вт и  $3,07 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>3</sup>.

Для исследования излучательных характеристик в УФ-диапазоне был использован фотодиод UV20SF, область спектральной чувствительности которого составляет 200—400 нм. Спектральные измерения ламп проводились по методике, описанной в [15].

На рис. 3, б приведено полученное в данной работе спектральное распределение излучения импульсной ксеноновой лампы в максимуме тока (квазистационарная стадия). В спектре четко наблюдаются линии ксенона 230, 244, 251 и 261 нм, что свидетельствует о достаточно низкой оптической плотности разряда. По этой причине можно ожидать высокую эффективность излучения в УФ-области.

Проведенные исследования пиковой силы излучения показали, что в указанных выше режимах электрического питания ( $w = 3,07 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>3</sup>) разрядная лампа обеспечивает пиковую силу излучения  $I_0 = 900$  Вт/ср в спектральном диапазоне 200—400 нм. После 300 ч работы падение пиковой силы  $I_0$  излучения составило 15—20 %. Данный эффект обусловлен активизацией поглощающих центров в сапфире [16]. Дальнейший спад интенсивности УФ-излучения имел близкую к линейной зависимость и при достижении  $6,5 \cdot 10^6$  импульсов пиковая сила излучения равнялась  $0,5I_0$ . Как показали проведенные исследования, что даже после такой наработки уровень бактерицидной эффективности излучения лампы достаточен для эффективного обеззараживания помещений. В случае импульсной ксеноновой лампы с кварцевой оболочкой аналогичный уровень  $I$  достигался при сроке службы не более  $10^5$  импульсов.

### Перспективные направления развития разрядных источников с сапфировой оболочкой

#### Короткодуговые ксеноновые лампы сверхвысокого давления с сапфировой колбой

Актуальность создания данного класса источников связана с необходимостью расширения спектрального диапазона излучения ламп до 6 мкм и модернизации широко применяемых в военной технике прожекторов ОУ-5 и Л-4 [17] для использования в качестве средств активных оптических помех головкам самонаведения управляемых ракет.

Описанная в предыдущем разделе технология соединения кова с сапфиром была применена при изготовлении короткодуговых модулируемых ламп с прямой сапфировой оболочкой (СПКМ-250). Конструктивное исполнение таких ламп приведено на рис. 4.

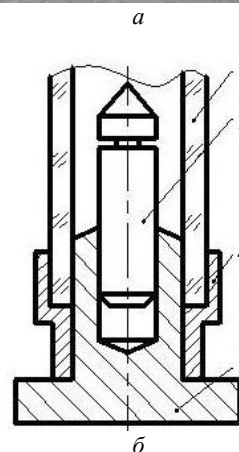


Рис. 4. Короткодуговые лампы сверхвысокого давления: а — с прямой сапфировой (сверху) и эллипсоидной кварцевой оболочками; б — конструкция катодного узла лампы СПКМ-250: 1 — разрядная трубка; 2 — катод; 3 — держатель (цоколь); 4 — коваровый колпачок

Следует учесть некоторые особенности работы кварцевых ксеноновых короткодуговых ламп, которые могут существенно сказаться на работоспособности аналогичных источников с сапфировой оболочкой. Колбы ламп высокой интенсивности должны быть рассчитаны таким образом, чтобы возникающие в сапфировой трубке механические напряжения не вызывали их разрушения. Появление напряжений вызывается высоким давлением наполняющего газа и термическими напряжениями из-за градиентов температур в стенках оболочки и в зонах соединения сапфира с металлом. Разрушение сапфировой колбы происходит в случае, когда наибольшие растягивающие усилия достигают предела прочности.

Если внутреннее давление превышает внешнее, колба испытывает разрывные усилия. Возникающее при этом в цилиндрической колбе осевое напряжение  $\sigma_o$  равно [3]:

$$\sigma_o = (pd) / (4h), \tag{1}$$

где  $d$  — внутренний диаметр разрядной колбы;  $h$  — толщина стенки сапфировой трубы;  $p$  — давление наполняющего газа.

Данное выражение справедливо, если толщина стенки  $h$  составляет незначительную часть внутреннего диаметра колбы  $d$ . Длительная практика эксплуатации и испытаний кварцевых ламп сверх-

высокого давления с естественным охлаждением показала, что для большинства ламп запас прочности достаточен порядка 10. Следовательно, необходимо проводить расчет толщины стенки в центре колбы для случая, когда максимальное значение суммарных разрывающих напряжений не превосходит допустимой величины  $\sigma_0/10$ . Согласно работе [3], температура колбы в центре разрядного промежутка  $T_{об}$  составляет 625 °С. Учитывая более высокую теплопроводность сапфира, можно ожидать повышения  $T_{об}$  в этом месте до 800 °С. Как следует из полученных автором результатов [2], предельная прочность разрушения сапфировой безблочной трубы при такой температуре составляет  $10^7$  Па.

Согласно конструкторской документации в серийной лампе ДКсЭл-250 внутренний диаметр колбы равен ~12 мм и применяемое в модулируемых короткодуговых лампах давление ксенона 15 атм (1,5 МПа). Из приведенных данных и формулы (1) следует, что минимальная толщина стенки должна составлять 0,45 мм.

Необходимо отметить, что приведенные расчетные оценки получены для давления наполняющего газа при комнатной температуре. Увеличение температуры наполняющего газа приведет к возрастанию давления газа в несколько раз. Поэтому в представленном на рис. 4 макете лампы СПКМ-250 была использована разрядная трубка с внутренним диаметром 11 мм и толщиной стенки 1,2 мм. Этот выбор обусловлен также безопасными напряжениями, возникающими в соединении сапфир—ковар, подробный расчет которого приведен в [2].

В настоящее время проводятся испытания разработанных экспериментальных образцов ламп. Преимущество разработанной конструкции заключается в простоте и технологичности изготовления лампы. Базовый размер расположения острия катода выставляется на этапе сборки его с крепежным цоколем. После этого проводится дальнейшее изготовление лампы, которое не влияет на этот размер [18].

Необходимо отметить, что изготовленные ранее ксеноновые короткодуговые лампы с сапфировой оболочкой с диаметром разрядной трубки 36 мм и межэлектродным расстоянием 6 мм подтвердили свою эффективность в среднем ИК-диапазоне при мощности 1500 Вт. Испытания проводились в МГТУ им. Н. Э. Баумана в системах, идентичных прожекторам ОУ-5 и Л-4.

#### ***Импульсный цезиевый ИК-источник с коаксиальным разрядом в сапфировой оболочке***

Лампы с коаксиальным разрядом в инертном газе (источники света полостного типа) были раз-

работаны в 50-х гг. прошлого века. Они представляют собой разрядный объем, образованный двумя соосными кварцевыми трубками, пространство между которыми заполнено инертным газом, а с торцов загерметизировано электродными узлами. Такие источники предназначены, в основном, для накачки активных лазерных сред, которые располагаются во внутренней трубке лампы.

Анализ литературных источников показал, что попытка получить разряд полостного типа в парах щелочных металлов ранее не проводилась, что объясняется, во-первых, отсутствием химически стойких к щелочному металлу оболочек. В случае ламп с кварцевыми оболочками щелочной металл активно взаимодействует с разрядной колбой и лампа быстро выходит из строя [3]. Только замена материала оболочек на поликор или сапфир позволит устранить этот недостаток. Во-вторых, давление паров в разряде определяется самой холодной точкой лампы, которая для нормального функционирования прибора должна быть 700—750 °С [3] (в противном случае щелочной металл или ртуть не заполняют разрядный канал). В этом случае требуются специальные конструкторские решения для обеспечения теплового режима работы лампы, выполненной по типу коаксиальной.

В данной работе впервые приводятся результаты исследования принципиальной возможности получения коаксиального цезий—ртуть—ксенонового разряда. Цель таких экспериментов — создание в будущем высокоэффективного источника ближнего ИК-излучения.

Теоретические предпосылки для этого следующие. Коэффициент оптического поглощения Cs—Hg—Xe плазмы  $k_\nu$  в ближней ИК-области спектра достаточно высок [6], так что разряд излучает в этом диапазоне спектра относительно тонкий поверхностный слой. При этом излучение из глубинных слоев плазмы в процессе диффузии к ее поверхности превращается в тепловую энергию и сбрасывается в дальнейшем на стенку теплопроводностью, т. е. для повышения абсолютного выхода и КПД инфракрасного излучения требуется плазменный слой относительно небольшой толщины, но с большой площадью поверхности. Вместе с тем появление дополнительной внутренней поверхности у плазменного объема должно приводить к увеличению безызлучательных энергетических потерь разряда и несколько снижать его эффективность.

Таким образом, уменьшая толщину излучающей плазмы и одновременно развивая поверхность излучения, можно поднять поток и, возможно, КПД инфракрасного излучения.

На рис. 5, а приведено конструктивное исполнение исследованного макета коаксиальной лампы. Молибденовые тороидальные электроды 1 посредством электронно-лучевой сварки соединяются с ниобиевыми колпачками 4. После установки сапфирового стержня 3 в отверстия электродов высокотемпературной пайкой колпачок герметично соединяется с оболочкой 2. Материалы соединяемых деталей согласованы по КТР и конструкция предусматривает свободное расширение стержня 3 в отверстиях электродов. Внутренний диаметр оболочки 2 равен 11 мм, разрядный зазор составил 4 мм, а межэлектродное расстояние — 35 мм.

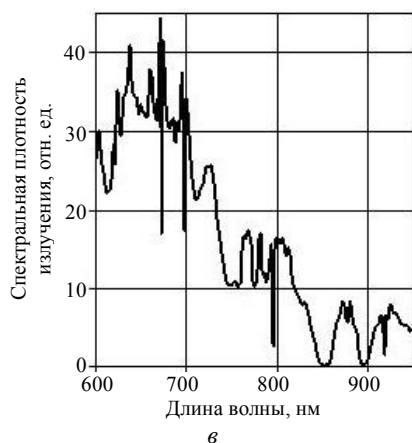
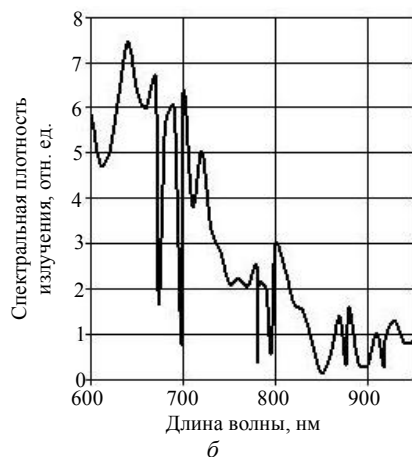
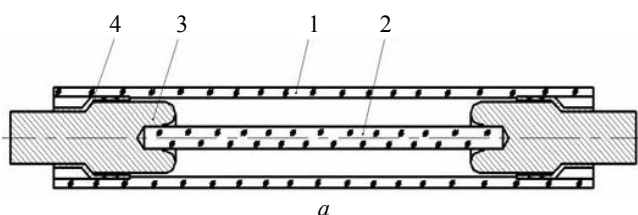


Рис. 5. Конструкция экспериментального коаксиального источника (а); спектры излучения экспериментального источника (б) и трубчатой импульсной Cs—Hg—Xe-лампы 11/35 (в)

Лампа работала в режиме с "дежурной дугой" при напряжении 120 В, частоте следования импульсов 425 Гц и при мощности на лампе 1,0 кВт. Все полученные результаты сравнивались с характеристиками трубчатой импульсной цезиевой лам-

пы 11/35 (диаметр/длина разрядного канала), которая работала в аналогичных электрических режимах и схеме, описанной в [7]. Сравнение полученных данных показывает, что скорости нарастания тока на переднем фронте в обоих случаях близки. Это свидетельствует об идентичном механизме расширения плазменного канала. Развитие основного разрядного импульса в этом случае происходит в уже частично ионизованной плазме за счет симметричного расширения канала дежурной дуги. Более высокое пиковое значение тока у лампы 11/35 связано с повышенной температурой на оси и менее крутыми пристеночными температурными распределениями разряда, влияющими на электрическое сопротивление плазменного цилиндра.

Спектральные характеристики макета коаксиальной лампы изучались в режимах максимума импульса тока на установке и по методике, подробно описанной в [15]. В отличие от испытаний трубчатой лампы в данном случае на входную щель монохроматора МДР-23 проецировался центр разрядного зазора. На рис. 5, б и в показаны полученные результаты. Приведенные спектральные характеристики позволяют сделать заключение о схожести радиационных процессов в обеих лампах. Если сравнивать величины спектрального интервала между максимумами самобращенной резонансной линии цезия (852,11 нм) для указанных ламп, то они одинаковы. Это свидетельствует о равенстве давления паров [3] в исследуемом макете и лампе 11/35.

Таким образом, при мощности 1,0 кВт в обоих случаях лампы имеют близкие электрические и спектральные характеристики, что свидетельствует об идентичности теплофизических и радиационных процессов в лампах обоих типов.

В работе также проведено исследование зависимости пиковой силы излучения в ближнем ИК-диапазоне от электрической мощности разряда. Полученные результаты подтверждают теоретические предпосылки, что, начиная с 1,1 кВт, излучение коаксиального разряда имеет большее значение, чем в случае классического плазменного канала.

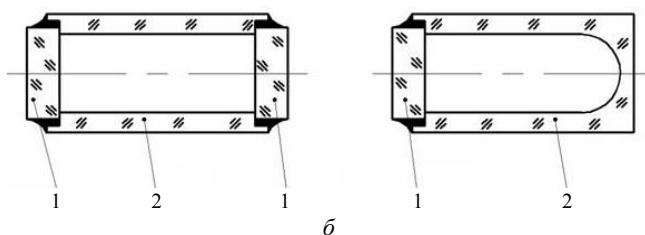
### Высокочастотные лампы

Исходной задачей разработки являлось создание высокочастотной рубидиевой лампы, используемой в качестве опорного сигнала в стандартах частоты. Применяемые ранее стеклянные источники имели низкую долговечность (5—10 тыс. ч), обусловленную процессами ухода рубидия через стенку. Нами была разработана конструкция (рис. 6) и технология высокочастотных сапфировых источников, обеспечивающих наработку до 60 тыс. ч.





а



б

**Рис. 6. Калиевая ВЧ-ячейка (а) и конструкция разрядного объема (б):**

- 1 — выходное сапфировое окно;  
2 — разрядная сапфировая трубка

Использование бесштенгельной технологии сборки, формирование ростовым путем закрытого торца разрядной трубки [1], а также применение методики ускоренных испытаний, основанных на рассмотрении термодинамических и кинетических процессов миграции рубидия, создает предпосылки для реализации нового качества лампы. В частности, разработка прецизионных магнито-кардиографов и магнито-энцефалографов и других приборов, способных регистрировать сверхслабые электромагнитные поля человека, его отдельных органов (мозга, сердца, мышц и т. д.) потребовала создание новой безэлектродной ВЧ-лампы с разрядом в парах калия.

Проведенные совместно с институтом ядерной физики МГУ исследования по наработке экспериментального образца калиевой лампы показали снижение интенсивности резонансной линии К на 1 % через 3,5 тыс. ч. Такие результаты достаточны для успешного применения калиевого разряда в гироскопах для авиации, автомобилестроения и т. д.

Дальнейшие исследования данного класса источников необходимо направить на оптимизацию способа возбуждения разработанных ламп, их внешнего исполнения (уменьшение габаритных размеров, нанесение на наружную поверхность электродов, диэлектрического отражателя), формовку и применение колец стеклокерамического цемента в технологическом цикле изготовления ламп, выбор наполнения в зависимости от предназначения прибора и режима его работы.

## Заключение

В данной работе рассмотрены основные достижения в области конструирования разрядных источников с сапфировой оболочкой. Показаны преимущества синтетического корунда перед другими оптическими материалами, проанализированы возможности повышения эффективности существующих газоразрядных ламп и намечены пути дальнейшего расширения области применения разряда высокого и сверхвысокого давления, ограниченного сапфировой оболочкой.

*Автор выражает благодарность всем своим коллегам, совместно с которыми на протяжении двадцати пяти лет разрабатывались и реализовывались новые технические решения разрядных ламп.*

## Литература

1. Браиловский В. Б. Технологические процессы производства профилированных монокристаллов корунда и изделий из них. — Тверь: Астер Плюс, 2003.
2. Gaidukov E. N., Brailovskii V. B., Gavrish S. V., Ryzhkov A. E. // Light & Engineering. 1998. V. 6. No. 1. P. 37.
3. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Градов В. М., Гавриш С. В., Колодный Н. П. Математические модели и исследование натриевых ламп высокого давления с ртутным и безртутным наполнением // МЭИ Светотехника/1992: Тез. докл. Междунар. семинара. — М., 1992. С. 36.
5. Гавриш С. В., Гайдукоев Е. Н., Константинов Б. А., Никифоров В. Г., Самодергин В. А. // Светотехника. 1998. № 3. С. 22.
6. Гавриш С. В., Градов В. М., Тереньтьев Ю. И. // Светотехника. 2008. № 2. С. 12.
7. Гавриш С. В., Градов В. М., Кобзарь А. И., Кузусhev Д. Н. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 85.
8. Gradov V. M., Gavrish S. V. // Light & Engineering. 1997. V. 5. No. 3. P. 16.
9. Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия. — М.: Энергия, 1977.
10. Бакуит Ф. Г., Гавриш С. В., Каплан В. Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 24. С. 55.
11. Бакуит Ф. Г., Гавриш С. В., Каплан В. Б. и др. // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 83.
12. Камруков А. С., Козлов Н. П., Шаиковский С. Г. и др. // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 1. С. 32.
13. Белов С. Н., Демидов М. И., Огурцова Н. Н. // ЖПС. 1969. Т. 10. № 3. С. 408.
14. Рубин и сапфир/Под ред. М. В. Классен-Неклюдовой, X. С. Багдасарова. — М.: Наука, 1974.
15. Гавриш С. В. // Светотехника. 2009. № 1. С. 27.
16. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 45.
17. Басов Ю. Г., Раквишвили А. Г., Сысун В. В. Специальная светотехника. — Минск: Изд. центр БГУ, 2008.
18. Гавриш С. В., Жмаев В. С., Кобзарь А. И. и др. Пат. 88210. Короткодуговая ксеноновая лампа для устройства оптико-электронного противодействия. 27.10.2009. Бюл. № 30.

## Discharge sources of radiation with a sapphire capsule

*S. V. Gavrish*

Zenit Special Design Office, 8/5 Panfilov av., Zelenograd, Moscow, 124489, Russia

E-mail: [svgavr@list.ru](mailto:svgavr@list.ru)

*Principal achievements of making the discharge sources with a sapphire capsule have been investigated in this work. It is demonstrated that synthetic corundum has the bulge on other optical materials used for gas-discharge lamps.*

PACS: 07.50.-e

*Keywords:* sapphire, corundum, plasma, pulse, radiation spectrum.

Bibliography — 18 references.

*Received December 27, 2010*

\* \* \*