

## Новые ксеноновые короткодуговые лампы сверхвысокого давления с сапфировой оболочкой

В. В. Логинов

*В работе выполнены экспериментальные исследования тепловых полей в газоразрядных лампах, позволившие расчетным путем определить конструктивные характеристики ксеноновой лампы сверхвысокого давления с сапфировой оболочкой. Предложенная конструкция газоразрядной лампы обладает большей надежностью, соответствует по световым параметрам источнику излучения с шаровой кварцевой оболочкой, но по габаритным размерам меньше аналога в два раза.*

*Ключевые слова:* газоразрядная лампа, ксенон, сверхвысокое давление, кварц, сапфир, шаровая колба, оболочка, спай сапфира с металлом.

**Ссылка:** Логинов В. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 1. С. 70.

**Reference:** V. V. Loginov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (1), 70 (2019).

### Введение

В настоящее время приобретает актуальность задача создания светотехнических изделий с малыми массогабаритными характеристиками. Понятно, что размеры элементов любой прожекторной системы (отражатель, корпус и т. д.) определяются, в первую очередь, габаритами используемой газоразрядной лампы.

Сегодня наибольшее применение в узконаправленных прожекторах нашли ксеноновые короткодуговые лампы сверхвысокого давления (СВД) с кварцевой шаровой колбой (оболочкой), ограничивающей разряд [1]. Существующие технические решения тоководов, присоединяемых к шаровой поверхности, имеют протяженную (до 100 мм) конструкцию, которая больше всего определяет габаритные размеры лампы. Причем зона соединения шаровой поверхности с тоководом является настолько механически непрочной, что половина происходящих разрушений ламп СВД обусловлена именно наличием термоупругих напряжений в этой области. Поэтому поиск новых конструктивно-технологических решений, позволяющих исключить перечисленные недостатки, интенсивно продолжается.

Целью данной работы является представление результатов расчетно-экспериментальных и кон-

структивных исследований, направленных на создание впервые в России компактной, механически прочной, ксеноновой короткодуговой газоразрядной лампы с оболочкой из монокристаллической окиси алюминия (сапфира, корунда).

### Особенности конструкции короткодуговой газоразрядной лампы с сапфировой оболочкой

При создании газоразрядных источников излучения с сапфировой оболочкой разработчики сталкиваются с рядом конструкторско-технологических проблем, связанных с особенностями монокристаллической окиси алюминия.

Во-первых, на сегодняшний день сапфир в качестве оболочки газоразрядной лампы используется только в виде трубы. Получение других конфигураций разрядного объема (шаров, изогнутых профилей и т. д.) невозможно в силу технологических особенностей выращивания сапфира методом направленной кристаллизации.

Во-вторых, сапфир обладает анизотропией температурного коэффициента расширения в различных кристаллографических направлениях [1]. По этой причине создание посредством механической обработки определенного профиля колбы, например, шара, приведет к возникновению термоупругих напряжений в продольном и радиальном направлениях и, как следствие, к взрыву такой разрядной оболочки при работе лампы.

В-третьих, сапфир обладает более высокой теплопроводностью (3,4 Вт/(м К) [2]) в диапазоне рабочих температур ламп (700 °С) в сравнении с кварцем (1,98 Вт/(м К) [3]), наиболее широко ис-

Логинов Владимир Владимирович, нач. цеха.  
Филиал АО «Стелла-К».  
Россия, 124489, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., 10.  
E-mail: stronzo@bk.ru

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2018 г.

пользуемым в качестве оболочек в ламповом производстве. Поэтому даже при равенстве удельных электрических мощностей разряда любые спаи сапфира с электродными узлами в газоразрядном источнике подвергаются более высоким тепловым нагрузкам в сравнении с вводами в кварцевые колбы шаровых ламп.

Поэтому перечисленные особенности сапфира создают трудности разработчикам не только в поддержании теплофизического состояния разрядной плазмы, но и в создании надежной и технологически воспроизводимой конструкции лампы.

### Исследования тепловых полей оболочек газоразрядных ламп

Первым этапом разработки источника излучения является научно-технический анализ влияния теплофизических процессов в газоразрядной лампе на температурное состояние отдельных элементов конструкции. Особо остро встает вопрос об изучении тепловых полей в оболочках, ограничивающих разряд. Широко используемый термопарный метод измерений [4] непригоден для газоразрядных ламп в силу ряда недостатков, изложенных далее.

1. Исследование температурных полей с помощью термопар не могут дать правильных количественных результатов, так как ее спай, размещенный на поверхности полупрозрачной оболочки, воспринимает некий эффективный поток излучения, зависящий от теплофизических и оптических свойств сапфира и материала термоэлектродов.

1. Более существенные ошибки могут возникнуть при определении с помощью термопар продольных градиентов температуры оболочки. При размещении контактов термопары на некотором расстоянии друг от друга один спай может дать завышенные результаты, а другой – заниженные, потому что они находятся в разных кондук-

тивных, оптических и геометрических условиях по отношению к оболочке лампы.

2. В силу анизотропии тепловых свойств сапфира точечный контакт термопары с оболочкой приводит к возникновению внутренних напряжений в месте соприкосновения со стенкой разрядной трубки и, как следствие, к разрушению лампы.

Устранить перечисленные недостатки позволяет предложенный нами в работе [5] пирометрический метод контроля температуры оболочек газоразрядных ламп. В связи с объемным характером излучения полупрозрачных кристаллов кварца и сапфира к ним неприменимы стандартные методы термографии. Поэтому для измерения температуры разрабатываются специальные пирометры частичного излучения, работающие за границей пропускания исследуемого объекта [6]. Применительно к нашему методу наиболее интересна коротковолновая граница первой колебательной полосы поглощения кварца и корунда. В этой области коэффициент поглощения  $k_\lambda$  полупрозрачных материалов может достигать  $k_\lambda = 10^2 - 10^3 \text{ см}^{-1}$ , а излучательная способность приближается к единице. Например, по данным работы [6], для корунда при температуре 2000 К в спектральном диапазоне 6–10 мкм 95 % энергии излучается приповерхностным слоем толщиной всего 0,65 мм, что при традиционных толщинах оболочек разрядных ламп (1,5–3,5 мм) позволяет уверенно судить о точности измерения температуры поверхности разрядной трубки. Следовательно, если на приемник попадает излучение из указанной области непрозрачности сапфира или кварца, то сигнал приемника будет однозначно связан с температурой поверхности оболочки из этого материала.

Предложенный метод контроля температуры позволил нам произвести исследование тепловых полей в газоразрядной ксеноновой лампе ДКсШ-500, в обобщенном виде показанной на рис. 1.

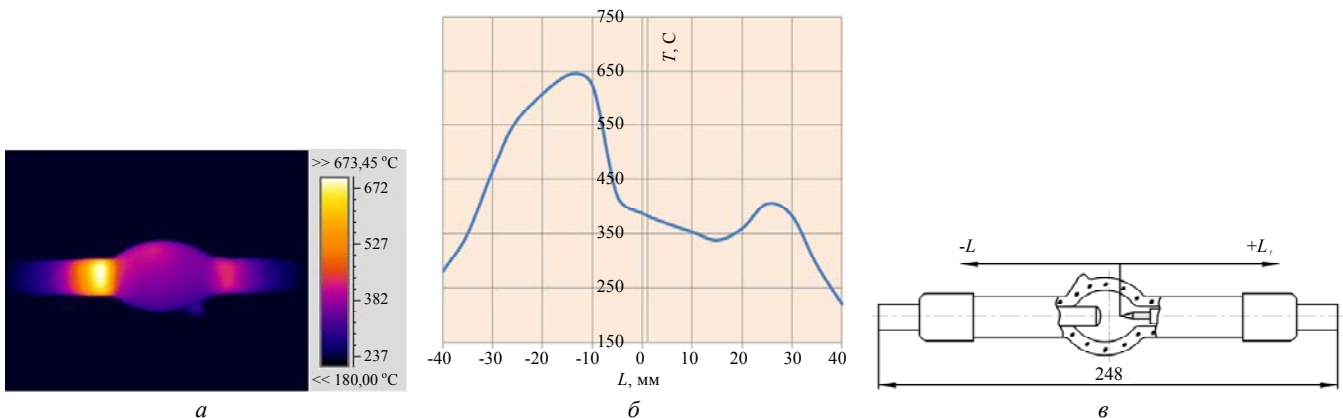


Рис. 1. Тепловые поля в газоразрядной ксеноновой лампе ДКсШ-500: а – фото температурных полей ксеноновой лампы ДКсШ-500; б – продольное распределение температуры колбы при работе лампы в горизонтальном положении; в – блок-схема измерений тепловых полей.

Из полученных результатов (рис. 1, а, б) следует, что максимальная температура 650 °С достигается в анодной области. При этом на расстоянии 25 мм от максимума температурной кривой в сторону анодного токоввода (рис. 1, б) значение продольного градиента температуры достигает величины 15 °С/мм.

В таких температурных режимах эксплуатация газоразрядной лампы СВД с сапфировой оболочкой проблематична. Однако использование в конструкции прямой цилиндрической сапфировой трубы позволяет ликвидировать данный недостаток за счет создания принудительного продольного ламинарного воздушного потока воздуха, обеспечивающего равномерный теплообмен с оболочкой газоразрядной лампы. В случае шаровой формы колбы лампы равномерное охлаждение поверхности разрядной оболочки создать невозможно.

### Расчет толщины оболочки лампы СВД

Следующим этапом разработки конструкции ксеноновой лампы СВД с сапфировой оболочкой были расчетные исследования толщины стенки разрядной трубки. Следует учесть некоторые особенности работы кварцевых ксеноновых короткодуговых ламп [1, 7], 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 обусловлено высоким давлением наполняющего газа и термическими напряжениями из-за температурных градиентов в стенках оболочки и в зонах спае сапфира с металлом. Разрушение сапфировой колбы происходит в случае, когда наибольшие растягивающие усилия достигают предела прочности.

Если внутреннее давление превышает внешнее, то колба испытывает разрывные усилия. Возникающее при этом в цилиндрической колбе осевое напряжение  $\sigma_o$  равно [1]:

$$\sigma_o = (pd)/(2h), \quad (1)$$

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 сверхвысокого давления с естественным охлаждением показала, что для большинства ламп запас прочности порядка 10 достаточен [1]. Следова-

тельно, необходимо проводить расчет толщины стенки в центре колбы для случая, когда максимальное значение суммарных разрывающих напряжений не превосходит допустимой величины  $\sigma_o/10$ . Согласно рис. 1, б, температура колбы в зоне анодного узла составляет  $T_{об} = 650$  °С. Учитывая более высокую теплопроводность сапфира, можно ожидать значения температуры  $T_{об}$  в этом месте до 800 °С. Как следует из приведенных в работе [8] данных, предельная прочность разрушения сапфировой безблочной трубы при такой температуре составляет  $10^7$  Па. Тогда, согласно формуле (1), толщина стенки сапфировой трубы должна быть не менее  $h = 1,65$  мм для ксеноновой лампы СВД при внутреннем диаметре колбы 15 мм и давлении наполнения ксенона 1,5 МПа.

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, но предусмотренный запас прочности позволяет сохранить расчетные значения толщины стенки при конструировании ксеноновых ламп СВД с сапфировой оболочкой.

### Исследование экспериментальных образцов ксеноновых ламп СВД с сапфировой оболочкой

В результате расчетно-экспериментальных и конструкторских исследований нами разработана конструкция ксеноновой короткодуговой газоразрядной лампы СПКс-500, фотография которой приведена на рис. 2.



Рис. 2. Конструктивное исполнение ксеноновой лампы СВД с цилиндрической сапфировой оболочкой СПКс-500.

Для проверки правильности выполненных расчетных оценок проведены исследования тепловых полей экспериментального образца газоразрядной лампы СВД с сапфировой оболочкой, результаты которых представлены на рис. 3.

Газоразрядная лампа работала при электрической мощности 500 Вт в режиме стабилизации напряжения. Как следует из представленных на рис. 3 результатов, максимальная температура в зоне анода значительно снизилась (на 300 °С), градиенты температуры за счет более высокой тепло-

проводности сапфира также уменьшились. Так, в анодной области тепловой градиент составляет  $5^\circ\text{C}/\text{мм}$ , что в три раза меньше в сравнении с температурным полем аналогичной области лампы с

кварцевой оболочкой (см. рис. 1). Поэтому можно предположить, что надежность лампы СВД в сапфировом исполнении будет значительно выше.

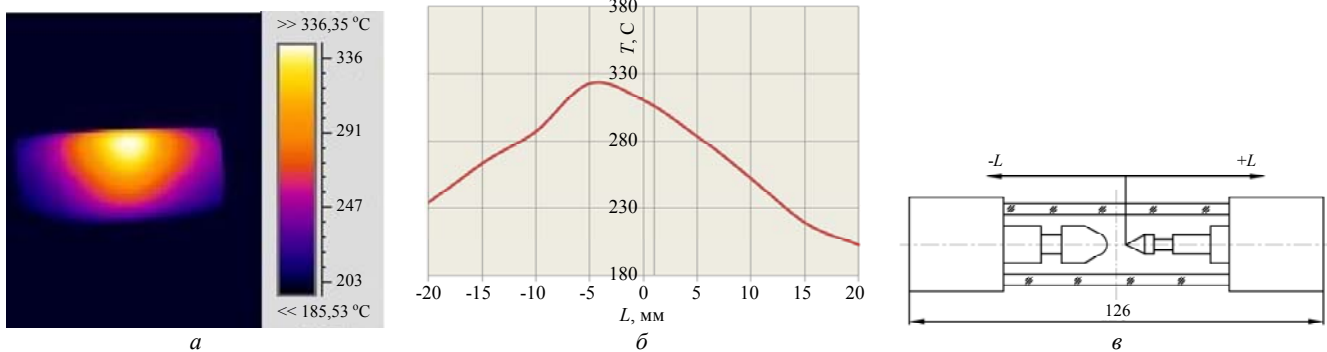


Рис. 3. Тепловые поля ксеноновой лампы СПКс-500: а – фото температурных распределений; б – продольное распределение температуры колбы при работе лампы в горизонтальном положении; в – блок-схема измерений тепловых полей.

В результате предложенных конструктивных решений нам удалось создать источник излучения по габаритным размерам в два раза меньше шаровой кварцевой лампы (см. рис. 1, в и 3, в). С другой стороны, уменьшение диаметра разрядной колбы с 30 мм в случае лампы с кварцевой оболочкой до 15 мм у сапфировой трубы привело к ощутимому влиянию радиальных конвективных потоков разогретого ксенона на температуру оболочки (см. рис. 1, а и 3, а). Из рис. 3, а видно, что при горизонтальном положении лампы в верхней части разрядной оболочки тепловое воздействие выше, чем в нижней зоне. Такая ситуация способствует появлению значительных радиальных градиентов температуры. Тем не менее, проведенные нами исследования [8] механической прочности сапфировой трубы в зависимости от совершенства структуры монокристалла (дислокации, блоки, пузыри и т. д.) механическая устойчивость оболочек ламп к воздействию прикладываемых радиальных усилий достигает 800 МПа. Именно это свойство сапфира обеспечивает работоспособность лампы СВД в условиях конвекции плазмообразующей среды.

Заключительным этапом разработки ксеноновой лампы СВД являлось проведение сравнительных исследований характеристик излучения двух ламп, а именно, ДКсШ-500 и СПКс-500. Так как лампы предназначены для использования в качестве источника излучения ближнего инфракрасного диапазона прожекторных систем направленного действия [9], то сопоставление интенсивности необходимо проводить в диапазоне длин волн  $\lambda$  от 0,8 до 1,2 мкм.

Для оценки идентичности характеристик излучения указанных ламп выбран критерий совпадения спектрального распределения излучения обеих газоразрядных ламп при неизменной аппа-

ратной функции используемого в наших исследованиях спектрометра МДР-206 и равенства электрической мощности на источниках излучения. Данная методика позволяет наглядно продемонстрировать преимущество одного источника излучения перед другим.

В нашем случае практическая цель исследований состояла в разработке именно конструктивного аналога лампы ДКсШ-500, но при уменьшенных габаритных размерах, так как параметры излучения указанного источника удовлетворяли потребителя. На рис. 4 приведены спектры излучения ламп ДКсШ-500 (тонкая линия) и экспериментального образца СПКс-500 (толстая линия), работавших при средней электрической мощности 500 Вт. Как видно из приведенных спектральных кривых, расхождение в интенсивности излучения в спектральном диапазоне 0,3–0,8 мкм не превышает 8–10 %, а в интервале длин волн 0,8–1,0 мкм – величины 3–5 %.

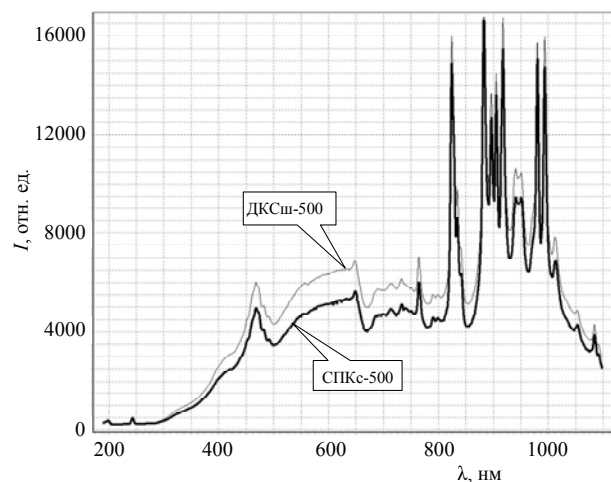


Рис. 4. Спектральные характеристики излучения ламп ДКсШ-500 (тонкая линия) и СПКс-500 (толстая линия).

Наблюдаемое расхождение в интенсивности континуума и спектральных линий излучения разряда связано с различием в давлении наполнения ламп. В случае лампы СПКс-500 нами впервые применена технология прямого заполнения разрядного объема газоразрядной лампы ксеноном до давления 15 атм. В то время как лампа ДКсШ-500 наполняется испарением расчетного количества сжиженного ксенона. Следовательно, ошибки в расчетах массы жидкой фазы газа или в измерениях разрядного объема шаровой колбы обеспечивают завышение давления инертного газа над требуемым значением наполнения. В результате происходит увеличение яркости разряда, но, как уже сказано, снижается надежность лампы.

Таким образом, можно сделать вывод о соответствии характеристик излучения разработанной конструкции газоразрядной лампы СПКс-500 аналогу ДКсШ-500. Испытание на воздействие одиночных ударов (40g) синусоидальной вибрации 2000 Гц, изменениям температуры от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  и т. д. подтвердили правильность расчетно-экспериментальных исследований и выбранных конструктивных решений.

### Заключение

В работе выполнены экспериментальные исследования тепловых полей в газоразрядных лампах, позволившие расчетным путем определить конструктивные характеристики ксеноновой лампы сверхвысокого давления с сапфировой оболочкой. Предложенная конструкция газоразрядной

лампы обладает большей надежностью, соответствует по параметрам излучения источнику излучения с шаровой кварцевой оболочкой, но по габаритным размерам меньше аналога в два раза.

Можно сделать вывод о соответствии характеристик излучения разработанной конструкции газоразрядной лампы СПКс-500 аналогу ДКсШ-500. Испытание на воздействие одиночных ударов (40g) синусоидальной вибрации 2000 Гц, изменениям температуры от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  и т. д. подтвердили правильность расчетно-экспериментальных исследований и выбранных конструктивных решений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Рохлин Г. Н.* Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. *Добровинская Е. Р., Литвинов Л. А., Пиццик В. В.* Энциклопедия сапфира. – Харьков: Институт монокристаллов, 2004.
3. *Физические величины: Справочник / под ред. И. Е. Григорьева, Е. З. Мейлихова.* – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. *М., Розовский Е. И., Рохлин Г. Н.* // Светотехника. 1980. № 11. С. 11.
5. *Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. и др.* // Оборонный комплекс России – научно-техническому прогрессу. 2014. № 1. С. 49.
6. *Лингарт Ю. К., Петров В. А.* // ТВТ. 1980. Т. 10. № 1. С. 174.
7. *Капцов Н. А., Гоухберг Д. А.* // УФН. 1951. Т. XLIII. № 4. С. 620.
8. *Gavrish S. V.* // Russian journal of nondestructive testing. 2010. Vol. 46. No. 8. P. 603.
9. *Басов Ю. Г., Раквиашвили А. Г., Сысун В. В.* Специальная светотехника. – Минск: Изд. центр БГУ, 2008.

PACS: 07.50-e

## New high-pressure xenon short-arc lamps with sapphire shell

*V. V. Loginov*

Branch of Stella-K, JSC  
10 Panfilovsky av., Moscow, Zelenograd, 124489, Russia  
E-mail: stronzo@bk.ru

*Received December 11, 2018*

***In the present work, the temperature fields of gas discharge lamp researches have been obtained. This has an important bearing on the constructive parameters of the xenon gas discharge lamp of the ultra-high pressure with a sapphire shell. The proposed design of the lamp is more reliable and it corresponds on irradiative parameters to a ball light source with the quartz shell, but it is smaller in two times.***

***Keywords:*** gas discharge lamp, xenon, ultra-high pressure, quartz, sapphire, ball bulb, shell, sealing sapphire with metal.

## REFERENCES

1. G. N. Rohlin, *Discharge sources of light*. (Moscow, Energoatomizdat Publ. 1991) [in Russian].
2. E. R. Dobrovinskaya, L. A. Litvinov, and V. V. Pischik, *Encyclopedia of sapphire* (Kharkov, Institut monocystallov, 2004) [in Russian].
3. *Physical quantities. Handbook*. Edited by I.E. Grigor'eva, E.Z. Melikhova. (Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991) [in Russian].
4. V. M. Pchelin, E. I. Rozovskii, and G. N. Rohlin, *Svetotekhnika*, No. 11, 11 (1980).
5. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, S. V. Puchnina, and A. V. Surdo, *Oboronnyi complex – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*, No. 1, 49 (2014).
6. Yu. K. Lingart and V. A. Petrov, *High Temperature (Sov.)* **10** (1), 174 (1980).
7. N. A. Kaptsov and D. A. Gouhberg, *Physics-Uspekhi (Sov.)* **63** (4), 620 (1951).
8. S. V. Gavrish, *Russian journal of nondestructive testing* **46** (8), 603 (2010).
9. Yu. G. Basov, A. G. Rakviashvily, and V. V. Sisun, *Special lights and engeneering* (Minsk, Izdatelskii Tsenter BGU, 2008) [in Russian].