

Температурные поля кварцевых и сапфировых оболочек газоразрядных источников излучения (Обзор)

*С. В. Гавриш, С. Г. Киреев, Д. Н. Кугушев,
В. В. Логинов, Д. Ю. Пугачев, С. В. Пучнина*

Работа посвящена разработке методики пирометрической регистрации температуры нагретых полупрозрачных материалов и рассмотрению результатов исследования тепловых полей кварцевой и сапфировой оболочек различных газоразрядных источников излучения. Показано влияние на температурное состояние оболочки конструктивных параметров лампы, удельной мощности разряда, теплопроводности плазмообразующей среды, свойств материала колбы, условий эксплуатации, пространственного расположения источника излучения.

Ключевые слова: температурное поле, сапфир, кварц, импульсная лампа, разрядная трубка, оболочка, спектральный диапазон пропускания, термопара, тепловизионная система.

Ссылка: Гавриш С. В., Киреев С. Г., Кугушев Д. Н., Логинов В. В., Пугачев Д. Ю., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 4. С. 251.

Reference: S. V. Gavrish, S. G. Kireev, D. N. Kugushev, V. V. Loginov, D. Y. Pugachev, and S. V. Puchnina, Usp. Prikl. Fiz. **8** (4), 251 (2020).

Введение

Оболочки газоразрядных ламп (колбы) являются важным конструктивным элементом, основное назначение которого заключается в изоляции плазмы от атмосферного воздуха, обеспечении выхода излучения за пределы источника, в фиксации положения электродов и тоководов в разрядном объеме и др. [1, 2].

При работе газоразрядной лампы теплофизические процессы (давление разряда, излучение плазмы и электродов, теплопроводность рабочей среды, конвекция и т. д.)

формируют радиальное и продольное распределение температуры колбы. В свою очередь, тепловое состояние оболочки существенно влияет на электрические и оптические характеристики разряда в различных плазмообразующих средах, на механическую прочность и надежность газоразрядной лампы. Например, в лампах с разрядом в парах металлов, тепловое поле оболочки определяет давление компонентов наполнения (ртуть, цезий, натрий и т. д. [1]), а в импульсных ксеноновых газоразрядных лампах испарение мгновенно нагретой до высокой температуры внутренней поверхности кварцевой оболочки способствует насыщению плазмообразующей среды ионами кислорода и кремния, молекулярными соединениями SiO_2 , SiO , O_2 , Si и т. д. [2]. В результате перечисленных теплофизических процессов у газоразрядной лампы меняются КПД излучения плазмы, оптические и механические свойства материала самой оболочки, а именно, снижается коэффициент пропускания и сужаются границы прозрачности, наблюдается явление запирания УФ-излучения, возникают термоупругие напряжения на внутренней поверхности и в толщине стенки

Гавриш Сергей Викторович, нач. отдела, д.т.н.
Киреев Сергей Геннадьевич, нач. лаб.
Кугушев Дмитрий Николаевич, зам. нач. лаб.
Логинов Владимир Владимирович, нач. цеха.
Пугачев Дмитрий Юрьевич, зам. нач. цеха.
Пучнина Светлана Викторовна, нач. лаб., к.т.н.
ООО «НПП «Мелитта».
Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.
E-mail: svgavr@list.ru

Статья поступила в редакцию 15 июля 2020 г.

© Гавриш С. В., Киреев С. Г., Кугушев Д. Н.,
Логинов В. В., Пугачев Д. Ю., Пучнина С. В., 2020

разрядной трубки и т. д. [2]. В итоге, оказывается, что рабочая температура поверхности колбы является одним из важнейших критериев, характеризующим эффективность функционирования газоразрядной лампы. Проблемам разработки методики контроля температуры полупрозрачных оболочек и на ее основе изучения температурных профилей различных газоразрядных источников излучения посвящена данная работа.

Методики исследования продольного распределения температуры оболочки газоразрядного источника

В настоящее время для изучения тепловых полей поверхностей разрядных оболочек широко применяют термометрические методы, что объясняется относительной простотой измерений, возможностью выявления температуры ($T_{об}$) небольших участков колбы (около 1 мм^2) с диапазоном измеряемых температур, полностью перекрывающим рабочие $T_{об}$ [1, 3, 4]. В то же время измерение распределения температуры оболочки имеет ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать при выборе конструкции термометра и оценке погрешности измерения температуры. Во-первых, измеряются температуры поверхности, как правило, тонкостенных оболочек, имеющих коэффициент теплопроводности χ примерно на два порядка ниже, чем χ материала термоэлектродов. Во-вторых, недостаточный тепловой контакт термоспая с измеряемой поверхностью. В-третьих, оболочки, на поверхности которых измеряется температура, прозрачны, и на термометр воздействует лучистый поток, выходящий из разряда. В-четвертых, возникает дополнительная трудность, связанная с анизотропией тепловых свойств корунда, например коэффициент термического расширения. Точечный контакт термокатодов с оболочкой приводит к возникновению внутренних напряжений в месте соприкосновения с разрядной трубкой и, как следствие, к разрушению лампы. Поэтому перечисленные проблемы ставят задачу поиска новых способов регистрации температуры полупрозрачных материалов (стекло, кварц, сапфир) оболочек газоразрядных ламп.

Исключить указанные недостатки позволяют методы пирометрии. В силу объемного

характера излучения оптических полупрозрачных материалов при пирометрическом измерении температуры необходимо использовать специальные ИК-приемники, работающие в области непрозрачности исследуемого объекта [5]. При нагреве от комнатной до рабочей температуры оболочки лампы интервал непрозрачности материала оболочки в диапазоне длин волн, который можно использовать для пирометрии, меняется. Причем при нагреве для большинства материалов наблюдается смещение ИК-границы пропускания, расположенной в области спектральной чувствительности приемника, в коротковолновую область. По этой причине для измерений температуры наиболее пригодной является коротковолновая граница первой колебательной полосы поглощения полупрозрачных материалов, где величина и температурная зависимость коэффициента поглощения k_λ материала оболочки связаны с ангармонизмом колебаний решетки. В этой области k_λ может достигать $k_\lambda = 10^2 \div 10^3 \text{ см}^{-1}$, а излучательная способность нагретой оболочки приближается к единице [5]. В связи с малым значением коэффициента отражения k_r в рабочей области спектра пирометра его влияние на результаты измерений незначительно. Поэтому, если на приемник попадает излучение из этой части области нагретого материала, то сигнал приемника будет однозначно связан с температурой поверхности оболочки из этого материала.

В работе [1] показано, что у кварцевого стекла в спектральном диапазоне 8–10 мкм, а у сапфира выше 7 мкм, коэффициент излучения нагретого материала приближается к единице. В наших экспериментах по определению температурных полей оболочек газоразрядных ламп была использована тепловизионная система SDS HotFind-LXT (рабочий спектральный диапазон 7,5–14 мкм), построенная на использовании многоэлементных приемников излучения, т. е. матриц, число элементов которых позволяет сформировать телевизионный кадр с хорошим пространственным разрешением. Таким образом, наблюдаемое совпадение спектральных диапазонов излучения нагретых исследуемых материалов оболочек с областью чувствительности используемого ИК-приемника, дает полное основание применить тепловизионную систему SDS

HotFind-LXT с достаточной точностью для наших температурных исследований.

Экспериментально-теоретический анализ температурных профилей газоразрядных ламп

В зависимости от конструктивных особенностей оболочек все существующие газоразрядные лампы можно разделить на несколько видов:

- по типу используемого материала – стекло, кварц, поликристаллический (поликор) и монокристаллический (сапфир) оксид алюминия [1, 2, 6, 7];
- по форме разрядного объема – прямые (трубчатые), шаровые (эллипсоидные), сложной конфигурации (U-образные, спиральные и т. д.) полостные (коаксиальные) и т. д. [1, 2];
- по величине воздействующего на оболочку давления плазмообразующей среды – лампы низкого, среднего и сверхвысокого давления [1, 2, 6];
- по длине разрядного промежутка и, как следствие, по распределенной электрической и тепловой удельной нагрузке на внутреннюю поверхность колбы – протяженный плазменный столб ($d/l \ll 1$, где d, l – диаметр и длина разрядного канала) и короткодуговые [1, 2, 6, 7];
- по режиму работы – лампы постоянного и переменного тока, импульсного и импульсно-периодического разряда [1, 2, 6, 7].

В наших исследованиях мы ограничились изучением температурных профилей ламп с кварцевой оболочкой, имеющих прямую и шаровую конфигурацию, и с сапфировой прямой колбой, наполненные средним и сверхвысоким давлением (СВД) различных плазмообразующих компонентов (ксенон, щелочные металлы, ртуть и т. д.). В настоящее время перечисленные газоразрядные источники излучения получили наибольшее распространение в оптико-электронных устройствах для промышленного освещения, медицины, квантовой и плазменной электроники.

Импульсные лампы с прямой оболочкой

Данный тип газоразрядных ламп имеет схожее между собой конструктивное испол-

нение, представляющее собой прямую кварцевую или сапфировую (поликоровую) трубку с герметично установленными на концевых участках электродными узлами [1, 2, 6, 7]. В зависимости от материала оболочки электродные узлы имеют различную конструкцию герметизирующего элемента (молибденовая фольга, коваровый или ниобиевый колпачок, поликоровая втулка и т. д. [1, 2, 6, 7]). Несмотря на то, что электродные узлы оказывают влияние на температурный профиль газоразрядной лампы, основной вклад в тепловое поле принадлежит нагретой оболочке в зоне разрядного промежутка. Необходимо отметить, что некоторые из перечисленных источников излучения имеют вторую наполненную газом – теплоносителем или вакуумированную колбу из стекла, кварца или сапфира [1, 7].

Импульсная ксеноновая лампа высокого давления с кварцевой оболочкой.

Изначально импульсные ксеноновые лампы высокого давления с цилиндрической кварцевой оболочкой получили широкое применение в системах накачки лазеров на алюмоиттриевом гранате, активированном неодимом (АИГ: Nd^{+3}). Подбор давления наполнения, режима электрического питания и условий охлаждения импульсной лампы позволили добиться максимального совпадения ИК-спектра излучения ксеноновой плазмы с полосой поглощения АИГ: Nd^{+3} . Несомненно, что температурное поле газоразрядной лампы накачки, размещенной в осветителе, существенно сказывается на тепловом состоянии оптических элементов лазера и, как следствие, на характеристиках генерируемого излучения [1, 8]. Дальнейшее развитие данного класса источников излучения способствовало их использованию в светосигнальных и УФ оптико-электронных системах промышленного, военного и медицинского назначения. В указанных приборах температурное поле оболочки также играет важную роль, так как нагрев кварца способствует ухудшению прозрачности этого материала [1].

В наших исследованиях температурных полей мы использовали наиболее распространенную импульсную ксеноновую лампу с диаметром плазменного канала 5 мм и длиной 120 мм. Газоразрядная лампа была заполнена ксеноном до давления в холодном состоянии

220 мм рт. ст. (0,029 МПа) и работала в разрядном контуре при энергии импульса 53 Дж. Результаты исследований представлены на рис. 1. Необходимо отметить, что полученный нами продольный тепловой профиль наружной поверхности является самым равномерным распределением температуры оболочки из всех рассматриваемых в данной статье га-

зоразрядных ламп. Практически на протяжении всего разрядного промежутка от -60 до +60 мм температура поверхности оболочки составляет около 400 °С, возрастая на 25 °С в зоне анода ($L = -60$ мм). Этот незначительный рост $T_{об}$ в анодной области обусловлен большим нагревом этого электрода за счет ионной бомбардировки из плазменного канала.

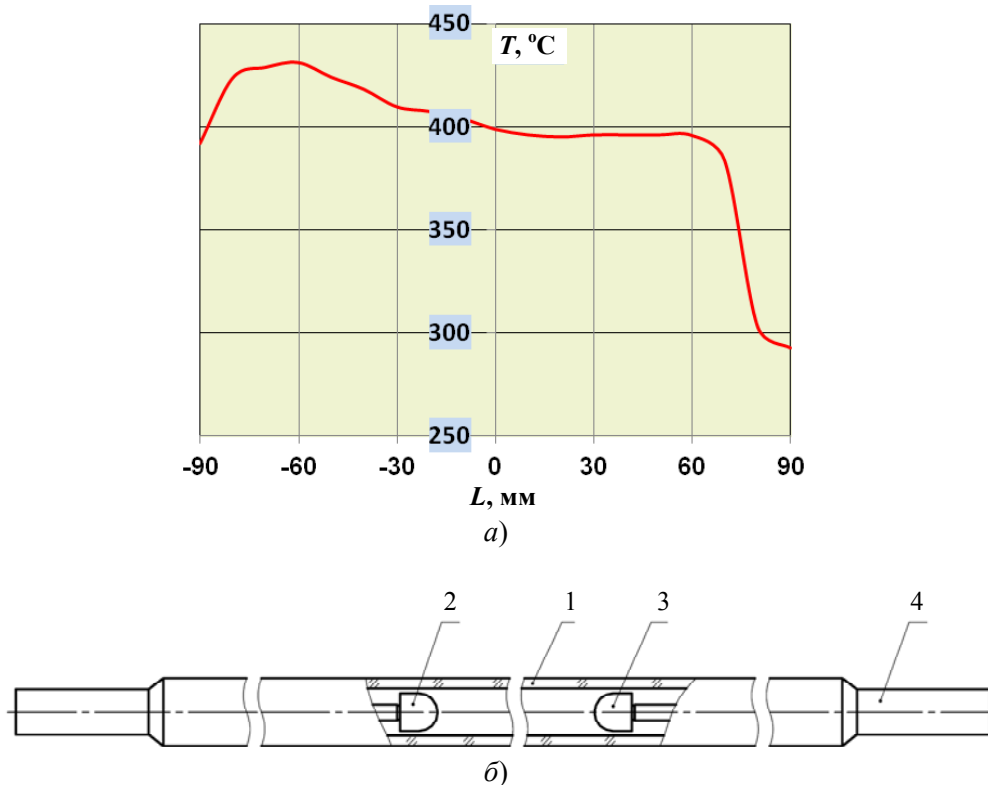


Рис. 1. Продольное распределение температуры оболочки (а) и конструктивное исполнение (б) импульсной ксеноновой газоразрядной лампы.

Из приведенного на рис. 1, б конструктивного исполнения импульсной ксеноновой лампы становятся понятными причины равномерного температурного профиля лампы. На протяжении всего разрядного промежутка плазменный канал равномерно контактирует с оболочкой 1 и только в зоне катода 2 и анода 3 колба вплотную приближена к электродам. В месте такого теплового контакта наблюдается действие сразу нескольких процессов – теплопроводности оболочки и тела электрода, частичное поглощение излучения из плазмы, конвективный теплообмен в окружающую атмосферу, потери тепла в зоне контакта 4 с присоединительными элементами схемы электрического питания. Как следует из представленного температурного профиля (рис. 1, а), начиная с границы плазменного канала (место

контракции разряда на электроде) потери тепла преобладают над нагревом оболочки. Этот процесс связан с конструктивным исполнением газоразрядной лампы, в котором исключены балластные объемы, за счет плотного прилегания оболочки к электроду. Следует отметить, что представленный на рис. 1, а температурный профиль был изучен у газоразрядной лампы, имеющей минимальный срок эксплуатации. При длительной эксплуатации газоразрядного прибора наблюдается распыление электродов на внутреннюю поверхность оболочки, формирование тонкого слоя кристобаллита и т. д., которые меняют тепловое поле и оптическую прозрачность разрядной части лампы. Подробно данное явление было рассмотрено в работе [9]. Наши результаты аналогичного исследования шаро-

вой импульсной ксеноновой лампы будут представлены ниже.

Газоразрядные лампы высокого давления с разрядом в парах щелочных металлов.

Лампы с разрядом в парах металлов занимают важное место в широкой номенклатуре газоразрядных источников излучения. Это связано с возможностью достижения высокой эффективности излучения разряда. Подбирая состав плазмообразующей среды и варьируя давлением компонентов, можно добиться удовлетворительного совпадения спектра излучения разряда со спектральной чувствительностью приемника. Например, в УФ-области эффективен ртутный разряд, обеспечивающий высокий КПД в установках фотолитографии [1], натриевые лампы высокого давления (НЛВД) имеют на сегодняшний день рекордную светоотдачу [1, 6], спектр разряда в парах калия идеально совпадает с полосой накачки АИГ:Nd⁺³ [6, 8] и т. д.

Важно отметить, одну конструктивную особенность рассматриваемых ламп, связанную с химической агрессивностью применяемых плазмообразующих сред. При использовании в составе наполнения разрядного объема ртути или металлогалогенных соединений в качестве материала оболочки используется кварцевое стекло, а при разряде в парах щелочных металлов допустимо применение только поликора или сапфира. Поэтому в силу свойств указанных материалов и технологических особенностей изготовления газоразрядных ламп, оболочке из кварца можно придать любую требуемую форму (шар, эллипсоид и т. д.), в то время как для разряда в парах щелочных металлов сапфир или поликор применяется исключительно в виде трубок. В итоге, эти особенности естественным образом отражаются на температурных полях газоразрядных источников света.

Импульсная лампа с разрядом в цезий–ртуть–ксеноновой смеси.

Основными характеристиками данного класса газоразрядных ламп являются пиковая сила излучения (I), постоянная составляющая (I_n), длительность импульса ($t_{0,5}$) и глубина модуляции, рассчитываемая по формуле: $m = [I - I_n]/I \times 100 \%$ [6, 7]. Из приведенного выражения следует, что одним из определяющих факторов величины m служит интенсивность излучения I_n нагретой до высокой температуры сапфировой оболочки. Понятно, чем выше температура колбы, тем сильнее свечение нагретого сапфира и ниже глубина модуляции. Кроме этого, повышение температуры приводит к сдвигу ИК-границы прозрачности корунда в сторону коротких длин волн [10], что отрицательно сказывается на функциональных характеристиках газоразрядной лампы. Для устранения указанных негативных эффектов при эксплуатации данного класса ламп применяется принудительное воздушное охлаждение. В силу анизотропных термических свойств сапфира непосредственное охлаждение разрядного объема невозможно, так как при этом возникают значительные продольные и поперечные градиенты температур в стенке сапфировой трубки, приводящие к ее разрушению. Поэтому применяется вторая термостатирующая оболочка, наполненная неоном, позволяющая за счет теплопередачи снизить возникающие температурные градиенты [7]. В то же время, наличие второй оболочки, экранирующей излучение разрядной трубки, не позволяет изучить ее температурные поля. Ниже приводятся разработанная нами оригинальная методика исследования тепловых полей в лампах с двумя оболочками и полученные результаты двух типов ламп с конструктивными характеристиками, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Конструктивные характеристики импульсных ламп с разрядом в цезий–ртуть–ксеноновой смеси

Тип лампы	Электрическая мощность лампы, P_l , кВт	Размеры разрядного канала, мм		Состав наполнения
		Диаметр, d	Длина, l	
СП 7/90	2500,0	7,0	90,0	9 мг Cs, 7 мг Hg, 50 мм рт. ст. Хе
СП 11/35	1500,0	11	35	4 мг Cs, 5 мг Hg, 70 мм рт. ст. Хе

На рисунке 2 представлено распределение температуры вдоль оболочки лампы СП 7/90. Для наглядности на фото рис. 2, б приведено распределение температуры в цветном отображении на мониторе пирометра SDS HotFind-LXT. Данный импульсный источник ИК-излучения работал при переменной электрической мощности. Увеличение мощности

осуществлялось за счет повышения длительности импульса напряжения при его постоянной амплитуде 120 В. Такой режим выбран специально, чтобы можно было сопоставить с температурным распределением нагретой поликоровой оболочки натриевой лампы высокого давления, построенным по данным работы [11] и представленным на рис. 3.

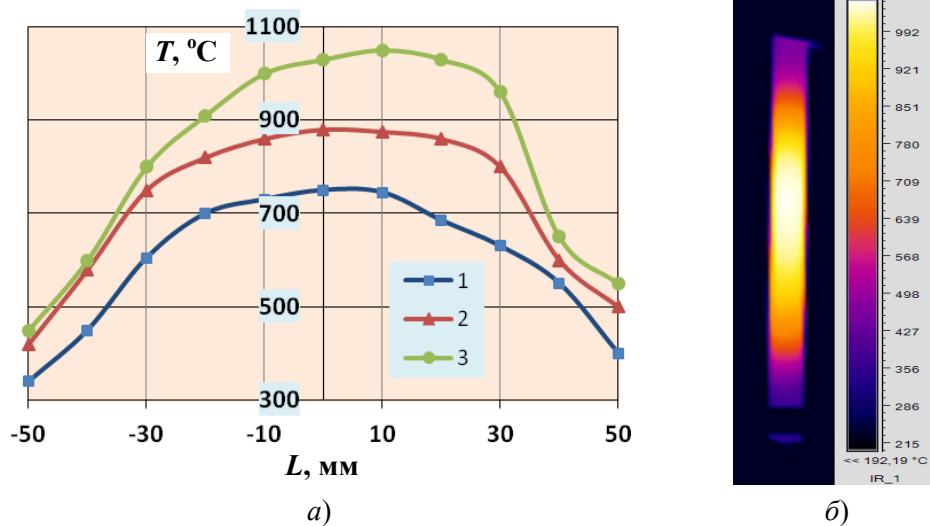


Рис. 2. Распределение температуры вдоль сапфировой оболочки в импульсной лампе СП 11/35 (а) при электрической мощности: 1 – 250 Вт, 2 – 430 Вт, 3 – 900 Вт и фото работающей лампы на дисплее пирометра (б).

Из приведенных на рис. 2 зависимостей можно сделать следующие заключения:

- с увеличением электрической мощности на лампе наблюдается рост температуры в каждой точке разрядной трубки (рис. 2, а);
- в различных частях оболочки наблюдается своя скорость роста температуры (рис. 2, а). При увеличении электрической мощности на лампе в зоне катода происходит увеличение температуры на 200 $^{\circ}\text{C}$, в то время как в анодной области этот прирост температуры составляет на 400 $^{\circ}\text{C}$. Такая трансформация теплового поля разрядной трубки приводит к возникновению значительных продольных градиентов температуры, следствием которых является возникновение разрушающих термоупругих напряжений;
- при мощности около 400 Вт и выше кривая $T_{об} = f(P_{л})$ максимум температуры на длине разрядной части оболочки (рис. 2, а) смещается в сторону анода.

Предположительно, при повышении мощности разряда такое поведение темпера-

турных кривых связано с ростом интенсивности электронной бомбардировки анодной поверхности, приводящей к возрастанию его температуры и увеличению тепловых потоков от электрода на оболочку. Приведенные на рис. 3 температурные поля поликоровых горелок натриевых ламп высокого давления подтверждают сделанное предположение.

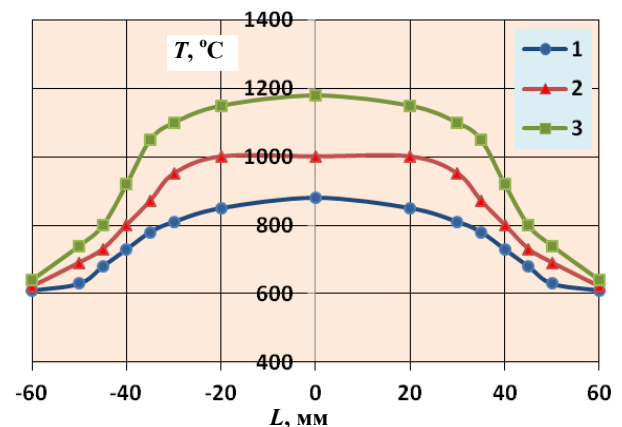


Рис. 3. Распределение температуры по длине горелки НЛВД в зависимости от мощности разряда [4]: 1 – 150 Вт; 2 – 250 Вт; 3 – 40 Вт.

Дело в том, что НЛВД работает на переменном токе, т. е. каждые полпериода сетевого напряжения любой из электродов поочередно выполняет либо функцию анода, либо является катодом. Поэтому тепловое поле разрядной трубки имеет симметричный характер, в то время как на рис. 2, *a* при положительных значениях L (анодная область) температурный профиль отличается от катодной части. Даже в области спаия анодного узла ($L = 50$ мм) температура выше на 100°C , чем у катодного токоввода. Эти результаты важны при конструировании разрядных ламп с двумя оболочками. Для снижения воздействия указанного эффекта необходимо в конструкции разрядного источника обеспечить надежный теплосъем с анодного узла. Обычно это достигается жестким соединением анодного узла разрядной трубки с внешней оболочкой.

В тоже время у натриевой лампы высокого давления при электрической мощности 400 Вт температура оболочки в центре разрядного промежутка составляет около 1200°C (рис. 3), в то время как для разрядной трубки с цезий–ртуть–ксеноновой плазмообразующей средой при аналогичной удельной нагрузке (кривая 2, рис. 2) температура на 300°C ниже. Это связано с различием в теплопроводности рабочих составов наполнения. В связи с тем, что радиус атома натрия значительно меньше размера атомов ртути и цезия, то и теплопроводность разряда в НЛВД выше. Данный факт объясняет более высокую температуру в центре оболочки натриевой лампы. Для доказательства сделанного предположения о влиянии на теплопроводность атома излучающего элемента в разряде на рис. 4 приведена зависимость теплопроводности насыщенных паров смеси ртути с цезием, рубидием и калием.

Как мы видим из представленных кривых, чем меньше размер атома щелочного металла, тем выше теплопроводность плазмообразующей среды на основе его паров.

Наличие минимумов в полученных расчетных зависимостях связано с переходом разряда из насыщенных паров в ненасыщенное состояние. В случае разряда в насыщенных парах, т. е. при наличии жидкой амальгамы металлов, давление каждого компонента зависит от их весового соотношения, массы сплава и рабочей температуры газоразрядной лампы. При нагреве лампы сплав может полностью испариться, например, как это наблю-

дается на рис. 4 при температурах около $1000\text{--}1100\text{ K}$, и теплопроводность будет определяться излучающим элементом. В подтверждение сделанному предположению, на рис. 5 приведены температурные поля двух идентичных по условиям разряда ламп, наполненных амальгамой цезия и чистой ртутью.

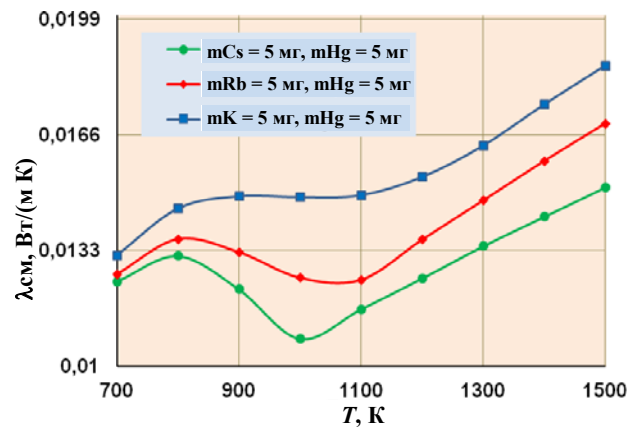


Рис. 4. Зависимость теплопроводности насыщенных паров смеси ртути с цезием, рубидием и калием от температуры холодной точки газоразрядной лампы.

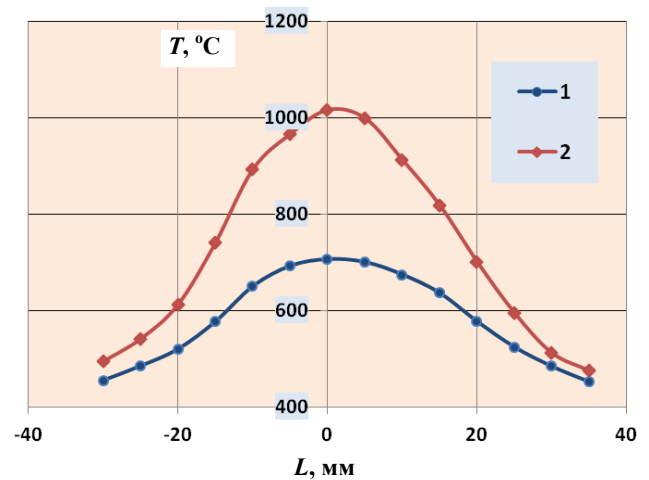


Рис. 5. Температурные профили разрядных трубок 7/90 с Cs–Hg–Xe (1) и Hg–Xe (2) наполнением.

Как видно из представленного графика, в случае разряда в плазмообразующей среде на основе амальгамы цезия температура сапфировой оболочки в центре разрядного промежутка в 1,3 раза выше, чем у ртутной лампы. Важно подчеркнуть, что спектральный состав излучения рассматриваемых разрядов не вносит значительного вклада в нагрев материала колбы, потому что значительная часть энергии сосредоточена в резонансных линиях λ_p . Например, у натрия самообращенные резонансные линии сосредоточены в области длин

волн 589,59 и 589,99 нм [1], а у цезия вокруг $\lambda_{рез.}$ 894,35 и 852,11 нм [1]. В указанном диапазоне длин волн коэффициент пропускания сапфира или поликора близок к 80–90 % [11].

В итоге, из рассмотренных выше данных следует важный вывод, что на температурное поле оболочки влияет радиус разрядного канала, теплопроводность плазмообразующей среды и режимы электрического питания газоразрядной лампы.

Далее рассмотрим более сложную задачу. Это исследование температурного распределения коаксиально расположенных сапфировых разрядной трубки и внешней колбы работающей лампы СП 11/35 (см. табл. 1).

Для изучения температурного распределения по длине разрядного промежутка разрядной трубки и внешней колбы нами была сконструирована экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис. 6.

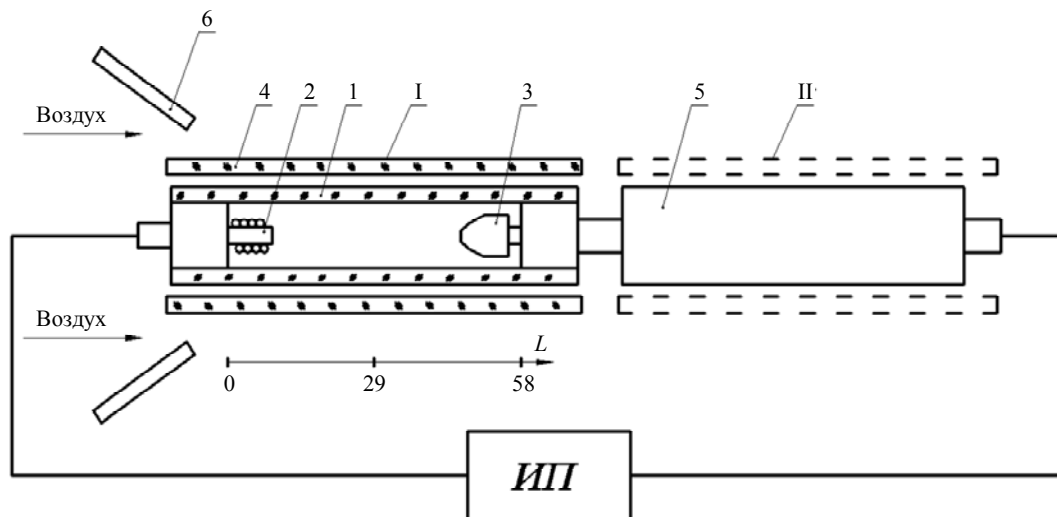


Рис. 6. Схема экспериментальной установки исследования продольных температурных полей лампы с двумя сапфировыми оболочками: 1 – разрядная трубка; 2 – катод; 3 – анод; 4 – внешняя оболочка; 5 – прутки из черного алюминия; 6 – сопло для подачи потока воздуха на внешнюю оболочку; ИП – источник электрического питания лампы.

Электрическое питание лампы осуществлялось от силового выпрямителя с транзисторным модулятором и блоком дежурной дуги [7] при напряжении 120 В и частоте следования токовых импульсов 425 Гц. Регулирование потребляемой электрической мощности производилось изменением длительности импульса напряжения. Поток воздуха от трех вентиляторов посредством специального сопла 6 обеспечивал ламинарное охлаждение внешней оболочки.

Измерения проводились по методике, описанной в начале статьи. Отличие заключалось в том, что в момент выключения лампы внешняя колба 4 смещалась из положения I в положение II. Это позволяло, во-первых, измерить температуру разрядной трубки и внешней колбы независимо. Во-вторых, давало возможность исключить взаимное влияние друг на друга. В-третьих, в случае внешней колбы размещение внутри ее черного цилиндра исключало радиационное взаимодействие двух стенок трубки между собой.

Полученные результаты для двух режимов работы лампы приведены на рис. 7.

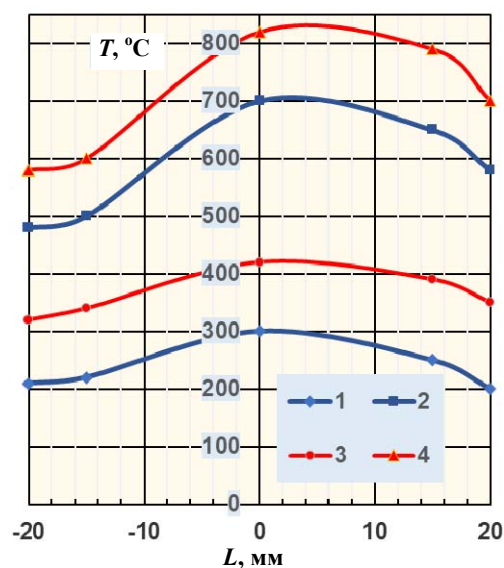


Рис. 7. Температурное распределение вдоль разрядной трубки (2, 4) и внешней оболочки (1, 3) лампы СП 11/35 при электрической мощности 770 Вт (1, 2) и 1,36 кВт (3, 4).

Как следует из полученных данных, в такой конструкции спай в горелке имеют более высокую температуру (400–700 °С), чем это наблюдается на рис. 2. Градиент температуры от катода ($L = -20$ мм) до центра ($L = 0$ мм) разрядного промежутка достигает 12,6 град/мм при $P_{\text{л}} = 1,36$ кВт. Учитывая анизотропию тепловых свойств сапфира, можно предположить, что в каждой точке разрядной трубки будут возникать определенные термические напряжения, разность которых может привести к деформациям и разрушению оболочки.

Сопоставление рисунков 2 и 4 позволяет сделать следующие выводы:

- уменьшение длины плазменного канала увеличивает продольные градиенты температуры оболочки;
- наличие принудительного теплоотвода с внешней колбы снижает температуру оболочки разрядной трубки пропорционально прикладываемой электрической нагрузке.

Лампы высокой интенсивности с разрядом СВД в инертном газе.

В данном классе газоразрядных ламп высокой интенсивности используется разряд в тяжелых инертных газах (аргон, криптон, ксенон) при больших плотностях тока и давлениях от нескольких единиц до сотен атмосфер. В отличие от ртутного разряда СВД [1, 12] давление инертного газа остается постоянным независимо от температурного состояния колбы и, как следствие, электрические параметры и характеристики излучения остаются неизменными.

Исследования температурных полей ксеноновых ламп СВД с шаровой кварцевой колбой (рис. 8, з) проводились с конструктивными и электрическими характеристиками, приведенными в таблице 2.

Измерение температуры колбы производилось через 10 минут после достижения номинальной электрической мощности лампы. В результате такого прогрева распределение температуры вдоль оболочки стабилизирова-

лось и принимало вид, приведенный на рис. 8. Для наглядности полученных температурных профилей кварцевой шаровой колбы (рис. 8, б) на указанных рисунках представлены фотографии с монитора тепловизора.

Из полученных данных следует, что ход температурных кривых исследуемых ламп идентичен. Наблюдается расхождение в $T_{\text{об}}$ двух ламп в плоскости, проходящей через катодное пятно перпендикулярно оси лампы. Данное явление связано с различием в межэлектродном расстоянии $l_{\text{м.э.}}$, обеспечивающем в случае ДКсШ-150 большие потери разряда излучением на колбу. Важной особенностью полученных результатов является наличие высоких продольных градиентов температур оболочки лампы, обусловленных значительными потерями мощности за счет теплопроводности ксенона и воздействием излучения нагретого анода на близко прилегающую часть шаровой колбы [1, 12]. В данном классе источников излучения реализован разряд, которому присущи высокие анодные и катодные падения напряжения, приводящие к интенсивному нагреву электродов. В силу массивности анода и интенсивной ионной бомбардировки его температура значительно превышает температуру катода.

Как следует из таблицы 2, удельная электрическая нагрузка на единицу внутренней поверхности шаровой колбы одинакова и плотности тока $j_{\text{ан}}$ на аноде соизмеримы, поэтому температуры поверхности колбы в анодной зоне обеих ламп близки и не превышают 700 °С. Минимальная температура шаровой оболочки наблюдается на удалении 15–20 мм от острия катода и находится в диапазоне 180–350 °С в зависимости от типа лампы и ее рабочего положения в пространстве. Указанный диапазон температур связан с конвекцией ксенона при изменении положения лампы. На фото рис. 8 видно, что при расположении катода сверху за счет конвективных потоков внутри разрядного объема повышается температура оболочки в его окружении почти на 100 °С.

Таблица 2

Конструктивные и электрические характеристики ламп типа ДКсШ-150 и ДКсШ-500

Тип лампы	Конструктивные параметры				Электрические характеристики				
	d_1 , мм	d_2 , мм	$l_{\text{м.э.}}$, мм	p_{Xe} , МПа	$P_{\text{л}}$, Вт	$U_{\text{л}}$, В	$I_{\text{л}}$, А	$j_{\text{ан}}$, А/см ²	$P_{\text{уд}}$, Вт/см ²
ДКсШ-150	20	14	2,5	2,0	154	18,8	8,4	60,0	25,0
ДКсШ-500	30	26	1,3	1,2	514	13,6	38	54,3	24,2

Примечание: d_1 и d_2 внешний и внутренний диаметр шаровой колбы, соответственно.

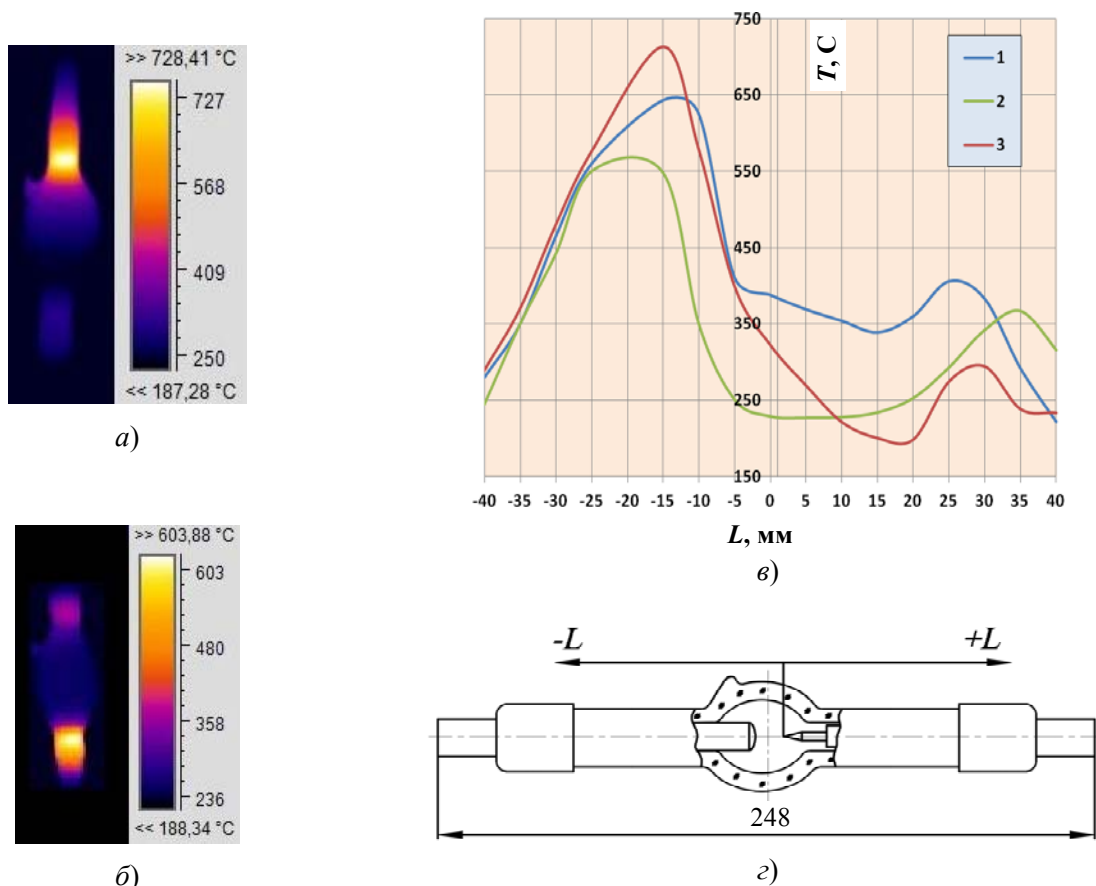


Рис. 8. Фото температурных полей ксеноновой лампы ДКсШ-150 при вертикальном рабочем положении с анодом (а) и катодом (б) сверху и продольное распределение температуры колбы (в) при работе лампы в горизонтальном (1) и вертикальном положениях с катодом (2) и анодом (3) сверху.

Важной особенностью данного класса ламп является наличие высоких плотностей тока на электродах, приводящее к распылению их материала на внутреннюю поверхность кварцевой оболочки. Несомненно, этот процесс не может не сказаться на температурном поле кварцевой колбы. В большинстве случаев бракованных ламп наблюдается наличие на внутренней поверхности шаровой колбы локализованного пятна распыленного вольфрама, образовавшегося в результате взрывной эмиссии отдельного незначительного участка электрода.

В наших экспериментах использовалась газоразрядная лампа сверхвысокого давления типа ДКсШ-500 с межэлектродным расстоянием 1,75 мм и давлением ксенона 12 атм. Лампа работала при среднем токе 32 А и напряжении 16,5 В. Источник электрического питания лампы позволял в режиме непрерывно горящей дуги производить контроль среднего тока и падения напряжения на лампе, а при импульсном питании регистрировать пи-

ковое значение, длительность и частоту следования импульсов тока.

Для исследования влияния потемнения оболочки на спектральное пропускание кварцевого стекла использовались лампы, имеющие на поверхности колбы пятна высокой плотности. Изучение темных налетов под микроскопом показало, что непрерывный слой напыления представляет собой систему упорядоченных частиц размером менее 1,0 мкм с одиночными каплями размером от 10 до 30 мкм. Учитывая, что размер основного состава частиц слоя вольфрама соизмерим с длиной волны в видимом диапазоне, то прохождение света сквозь него сопровождается рассеянием и поглощением энергии. В инфракрасном диапазоне такого эффекта не наблюдается в силу больших длин волн. Данные процессы приводят к дополнительному подогреву колбы и трансформации тепловых полей.

На рисунке 9 приведены температурные профили лампы в случае наличия темного пятна в зоне видимости входного окна тепло-

визора и без него. За точку отсчета принято местоположение катодного пятна ксенонового разряда. При отсутствии напыления на поверхности (кривая 1) распределение температуры связано с конструктивными особенностями лампы (см. рис. 8, *з*), т. е. расположением электродов, их массой, диаметром и т. д. Например, наблюдаемый рост температуры между точками соответствующими 15 и 25 мм обусловлен наличием массивного анода диаметром 10 мм. В случае кривой 2 на рис. 9 наблюдаемая трансформация температуры в рассматриваемой области связана с наличием пятна вольфрама, обеспечивающего дополнительный подогрев оболочки.

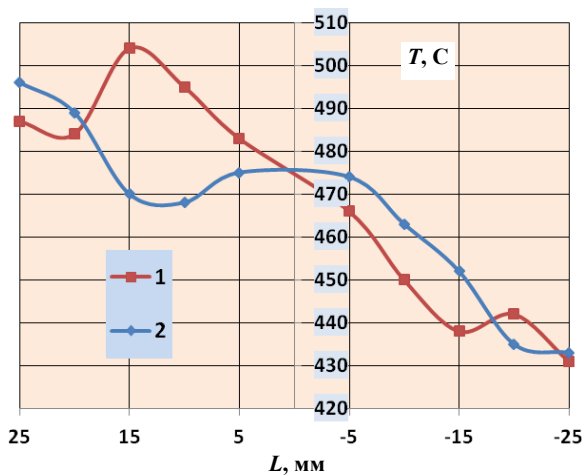


Рис. 9. Температурное поле ксеноновой лампы СВД с вольфрамовым напылением (1) и без него (2).

Изменение температурного поля оболочки влияет на другие характеристики ламп СВД. Как следует из приведенных данных, наличие темных налетов в зоне анода ($L = 15$ мм) и катода ($L = -20$ мм) приводит к росту температуры от 10 до 35 °C. Несмотря на достаточно незначительные изменения температуры при появлении налетов на поверхности колбы, данный эффект имеет отрицательные последствия. Во-первых, снижаются модуляционные характеристики лампы за счет роста излучающей способности поверхности кварцевой колбы. Во-вторых, увеличивается продольный градиент температуры колбы, что в условиях воздействия сверхвысокого давления на внутреннюю поверхность оболочки может привести к ее разрушению. Статистика анализов причин разрушения ламп СВД подтверждает правомочность этого утверждения.

Ярким подтверждением высоких конвективных потоков в ксеноновой плазме корот-

кодуговых ламп являются проведенные исследования разработанных нами ксеноновых ламп сверхвысокого давления с сапфировой оболочкой. Использование шаровой формы для колбы из кварцевого стекла обусловлено необходимостью обеспечения равномерной удаленности внутренней поверхности оболочки от высокотемпературного катодного пятна. Учитывая, что распределение температуры оболочки зависит не только от удельной электрической мощности, но и от рабочего положения лампы (рис. 8 и 10), можно ожидать, что замена формы колбы на сапфировый цилиндр неизбежно приведет к трансформации температурного поля лампы. Это связано с высокой теплопроводностью сапфира и различием конвективных потоков в рассматриваемых лампах. В свою очередь, в силу анизотропных свойств коэффициента температурного расширения корунда возникновение высоких температурных градиентов в стенке сапфировой трубы может привести к разрушению оболочки.

Исследование теплового поля по описанной выше методике проводилось на лампе СВД с сапфировой оболочкой типа ИСКс-500, условное конструктивное исполнение которой приведено на рис. 10, *з*, а основные технические характеристики сведены в таблицу 3.

Результаты исследования продольного распределения температуры цилиндрической сапфировой оболочки ксеноновой лампы СВД при средней электрической мощности 350 Вт приведены на рис. 10, *в*.

Наиболее высокая температура колбы наблюдается в плоскости, проходящей через катодное пятно перпендикулярно оси лампы. Это связано с нагревом сапфировой оболочки излучением плазмы. Наблюдаемый плавный градиент температуры в область катода и анода около 5°/мм связан с несколькими конструктивными особенностями лампы:

1. Электроды по всей своей длине имеют значительный зазор (3,5 мм у анода и 6 мм в случае катода) с внутренней поверхностью сапфировой трубки.

2. Электроды закреплены в металлических токовводах, обладающих высокой теплопроводностью, что обеспечивает надежный отвод тепла от их рабочей поверхности.

3. Сапфир обладает в пятнадцать раз большей теплопроводностью, чем кварц (30 в сравнении с 1,7 Вт/(м град)) при температуре 100 °C и в три раза выше при температуре 1000 °C [11].

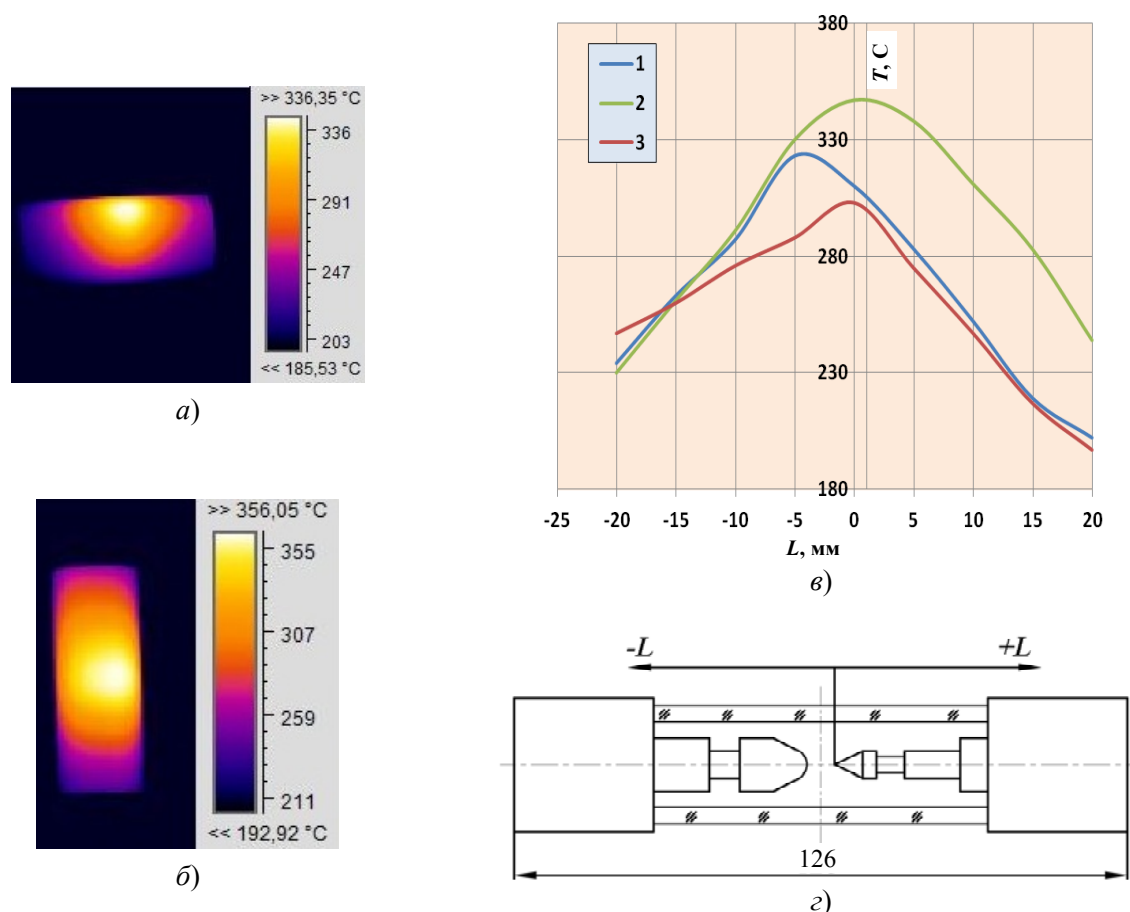


Рис. 10. Фото температурных полей ксеноновой лампы ИСКс-500 при горизонтальном (а) и вертикальном рабочем положении с анодом (б) сверху и продольное распределение температуры колбы (в) при работе лампы в горизонтальном (1) и вертикальном положениях с катодом (2) и анодом (3) сверху.

Таблица 3

Конструктивные и электрические характеристики лампы ИСКс-500

Конструктивные параметры				Электрические характеристики				
d_1 , мм	d_2 , мм	$l_{м.э.}$, мм	p_{Xe} , МПа	$P_{л.}$, Вт	$U_{л.}$, В	$I_{л.}$, А	$j_{ан.}$, А/см ²	$P_{уд.}$, Вт/см ²
20	15,5	1,3	1,2	514	13,6	38	30,4	26,5

Примечание: d_1 и d_2 внешний и внутренний диаметр цилиндрической сапфировой колбы, соответственно.

Необходимо отметить, что использование принудительного охлаждения через конический конфузор направленным потоком воздуха со стороны анода, позволяет сохранить температурное распределение вдоль поверхности колбы в аналогичном виде приведенном на рис. 10. При этом градиент температуры при увеличении электрической мощности разработанной лампы до 500 Вт, практически остается неизменным. Другое расположение лампы, например, под углом 45° к горизонтальной плоскости, незначительно смещает максимум температуры разогретой поверхности оболочки в сторону расположенного выше электрода. При этом температуры поверхно-

сти оболочки занимают промежуточное положение между кривыми 1 и 2 на рис. 10.

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 теплоотвод с оболочки газоразрядной лампы. В случае шаровой формы колбы лампы равномерное охлаждение поверхности разрядной оболочки создать невозможно.

Заключение

В результате проведенных нами исследований и научного анализа результатов, полученных другими авторами, в данной работе обобщены и графически представлены температурные профили основных типов импульсных газоразрядных ламп, получивших на сегодняшний день наибольшее применение в оптико-электронных устройствах для медицины, гражданской и военной промышленности. На основании выполненных экспериментов выявлены основные факторы, определяющие тепловые поля оболочек, ограничивающих разряд в различных плазмообразующих средах. Полученные данные можно представить в виде обобщенной блок-схемы, приведенной на рис. 11.



Рис. 11. Основные факторы, определяющие температурные поля оболочек газоразрядных источников излучения.

Как следует из представленной диаграммы, проектирование газоразрядного источника излучения представляет собой многофакторную задачу, требующую учета особенностей конструкции, условий работы и эксплуатации импульсной лампы. Авторы выражают надежду, что представленные в данном обзоре результаты позволят разработчикам плазменных устройств сократить область экспериментального исследования при создании оптимальной конструкции прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Маршак И. С., Дойников А. С., Жильцов В. П. и др. Импульсные источники света, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.
3. Пчелин В. М., Розовский Е. И., Рохлин Г. Н. Особенности измерения температуры колб высокоинтенсивных источников света термометрическим способом // Светотехника. 1980. № 11. С. 11.
4. Рохлин Г. Н., Семенов Н. Я. Экспериментальное определение температуры горелок натриевых ламп высокого давления // Светотехника. 1978. № 12. С. 4.
5. Лингарт Ю. К., Петров В. А. Измерение температуры поверхности некоторых полупрозрачных материалов // ТВТ. 1980. Т. 10. № 1. С. 174.
6. Гавриш С. В. Разрядные источники излучения с сапфировой оболочкой // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 42.
7. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. Импульсные газоразрядные источники ИК-излучения для оптико-электронных систем // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.
8. Белостоцкий Б. Р., Любавский Ю. В., Овчинников В. М. Основы лазерной техники. Твердотельные ОКГ. – М.: Советское радио, 1972.
9. Волкова Г. А. Эрозия электродов импульсных ламп и спектр их излучения в ультрафиолетовой области // Светотехника. 1973. № 9. С. 8.
10. Aric Loytty. A new ark tube for HPS lamps // Lighting Design and application. 1976. February. P. 14.
11. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. – М.: Наука, 1965.
12. Капцов Н. А., Гоухберг Д. А. Лампы сверхвысокого давления // УФН. 1951. Т. XLIII. № 4. С. 620.

Temperature fields of quartz and sapphire envelopes of gas discharge radiation sources (*a review*)

S. V. Gavrish, S. G. Kireev, D. N. Kugushev, V. V. Loginov, D. Y. Pugachev,
and S. V. Puchnina

Scientific and Production Enterprise “Melitta”, Ltd
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia

Received July 15, 2020

The work is devoted to the development of a pyrometric method for recording the temperature of heated translucent materials and the consideration of the results of studying the thermal fields of quartz and sapphire envelopes of various gas-discharge radiation sources. It is shown the influence on the temperature state of the envelope of the design parameters of the lamp, the specific power of the discharge, the thermal conductivity of the plasma-forming medium, the properties of the material of the bulb, operating conditions, and the spatial location of the radiation source.

Keywords: temperature field, sapphire, quartz, pulsed lamp, discharge tube, envelope, transmission spectral range, thermocouple, thermal imaging system.

REFERENCES

1. G. N. Rokhlin, *Discharge light sources* (Energoatomizdat, Moscow, 1991).
2. I. S. Marshak, A. S. Doinikov, V. P. Zhiltsov and others, *Pulse light sources. 2nd ed., Rev. and add.* (Energy, Moscow, 1978).
3. V. M. Pchelina, E. I. Rozovsky, and G. N. Rokhlin, *Features of measuring the temperature of envelopes of high-intensity light sources using a thermocouple method*, *Lighting engineering*, № 11, 11 (1980).
4. G. N. Rokhlin and N. Ya. Semenov, *Experimental determination of the temperature of high-pressure sodium lamp burners*, *Lighting engineering*, № 12, 4 (1978).
5. Yu. K. Lingart and V. A. Petrov, *Measurement of the surface temperature of some translucent materials*, *Thermophysics of High Temp.* **10** (1), 174 (1980).
6. S. V. Gavrish, *Discharge radiation sources with a sapphire envelope*, *Applied Physics*, No. 4, 42 (2011).
7. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, *Pulsed gas-discharge sources of IR radiation for optoelectronic systems*, *Successes in Applied Physics* **6** (4), 333 (2018).
8. B. R. Belostotsky, Yu. V. Lyubavsky, and V. M. Ovchinnikov, *Basics of laser technology. Solid state Optical Quantum Generators* (Soviet Radio, Moscow, 1972).
9. G. A. Volkova, *Erosion of the electrodes of pulsed lamps and the spectrum of their radiation in the ultraviolet region*, *Lighting engineering*, № 9, 8 (1973).
10. Aric Loytty, *A new ark tube for HPS lamps*, *Lighting Design and application*, February, 14 (1976).
11. E. M. Voronkova, B. N. Grechushnikov, G. I. Distler, and I. P. Petrov, *Optical materials for infrared technology* (Nauka, Moscow, 1965).
12. N. A. Kaptsov and D. A. Gouhberg, *Lamps of ultrahigh pressure*, *Physics-Uspekhi* **XLIII** (4), 620 (1951).