

УСТОЙЧИВОСТЬ СКАНДАТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В КСЕНОНЕ

С.В. Гавриш
А.О. Потапенко
С.В. Пучнина
С.Г. Шашковский

svgavr@list.ru
alexu1999pt@gmail.com
svetlanapuchnina@mail.ru
melitta916@gmail.com

ООО «НПП «Мелитта», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследована устойчивость работы скандатного катода импульсной ксеноновой лампы. Приведен подробный анализ факторов, действующих на рабочую поверхность электрода, рассмотрено влияние на эрозию эмиссионного материала конструкции катода, физических и химических свойств эмиттера, состава плазмообразующей среды и параметров импульсного разряда. Значительное внимание уделено технологии изготовления катода изостатическим прессованием порошка, состоящего из 97 % (вес.) молибдена и 3 % (вес.) скандата бария. Рассмотрены конструкция и условия электрического питания исследуемой газоразрядной лампы. Исходя из полученных осциллограмм импульса тока и конструктивных размеров рабочей поверхности катода получено, что значение токовой нагрузки на изучаемый электрод составляет 2,64 кА/см². В ходе ресурсных испытаний изучено влияние эрозии электрода на прозрачность кварцевой оболочки и конфигурацию рабочей части катода. Установлено, что к концу срока службы импульсной лампы сферическая поверхность катода преобразуется в плоскость с множеством капель молибдена на торцевой части электрода. Помощью электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа выявлено, что в течение работы газоразрядной лампы происходит обеднение активирующей добавкой поверхности электрода, контактирующей с плазмой, с образованием пустотелых раковин. Одновременно в течение срока служ-

Ключевые слова

Импульсный разряд, газоразрядная лампа, катод, эмиттер, активирующая добавка, молибден, скандат бария, энергодисперсионный анализ, электронная микроскопия

бы газоразрядной лампы происходит продольная миграция оксида бария из глубины тела катода к рабочей поверхности

Поступила 11.01.2024

Принята 26.02.2024

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 20ГРЭ-С18/91616)

Введение. Импульсный ксеноновый разряд высокого давления представляет собой совокупность взаимосвязанных теплофизических процессов, происходящих одновременно в плазме, кварцевой оболочке и электродах (катоде и аноде). Особая сложность этих явлений заключается в том, что в импульсных газоразрядных лампах к радиально-временной неоднородности плазменного канала добавляется его продольное расслоение, т. е. формирование катодной и анодной областей, ограничивающих разрядный столб дуги [1, 2]. В связи с этим надежность импульсной лампы в значительной степени определяется физическими явлениями в пограничных слоях плазма–поверхность электрода. К таким процессам можно отнести [1]:

- ионизацию газа в приэлектродных областях, формирование объемных зарядов, эмиссию электронов с поверхности катода и др.;
- распространение теплоты в тело электродов, расплавление и испарение их материалов, что приводит к внедрению в состав плазмообразующей среды примесных добавок [3] и запылению внутренней поверхности разрядного баллона [1].

Явление испарения материала электрода носит название эрозии и зависит от свойств эмиссионных материалов, конструктивных особенностей, условий работы катода или анода и является специфическим, требующим внимательного изучения для каждого типа импульсной газоразрядной лампы. В частности, в последнее время активизировались работы по замене электродного материала на основе вольфрама с присадками тория (работа выхода электронов $\varphi = 2,7...3,0$ эВ [4]) вольфрамовым материалом (молибденовым), активированным скандатом бария ($\varphi = 1,5...1,8$ эВ [5]). В связи с этим исследования были направлены на выявление связи долговечности импульсной ксеноновой лампы с эрозионными процессами скандатного катода.

Теоретический анализ факторов, определяющих эрозионные процессы электродов. Формирование представления об электронной эмиссии и физических процессах, протекающих в зоне электродов, о механизме эрозии материалов электродов в различных фазовых состояниях, о связи

этих процессов с электрофизическими параметрами разряда и физическими свойствами материалов необходимо для правильного выбора направления в разработке эрозионно-стойких электродных материалов.

В результате научно-технического анализа [1–8] составлена схема факторов, определяющих распыление электродов в импульсных газоразрядных лампах (рис. 1). Кратко охарактеризуем зависимость механизма эрозии от различных параметров, сгруппированных в четыре основных блока.

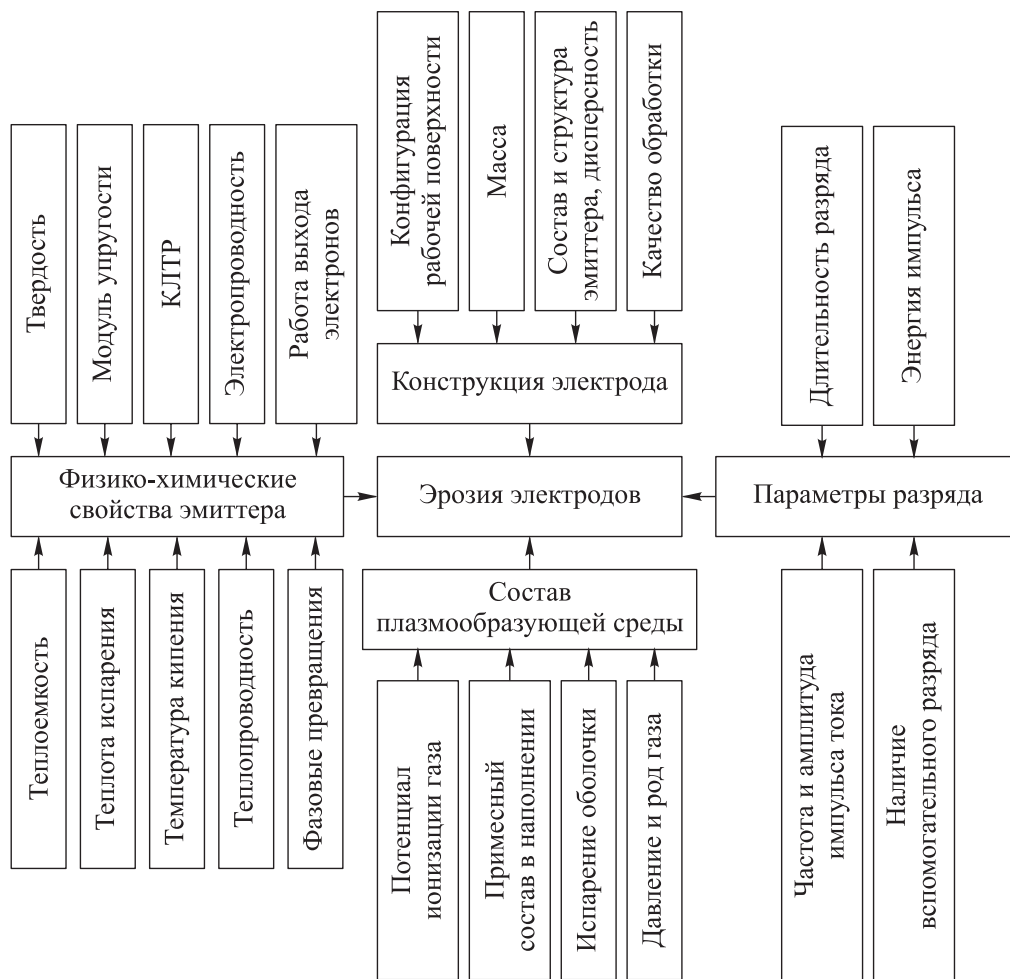


Рис. 1. Схема факторов, определяющих распыление электродов в импульсных газоразрядных лампах

Физико-химические свойства эмиттера. При высокой теплоемкости эмиттера в течение времени прохождения токового импульса только незначительная часть материала электрода успевает разогреться и, следовательно, распылится [2].

При сопоставлении электродов из разных металлов (медь, никель, молибден, ниобий и др.) с различной теплотой испарения и плавления установлено, что наиболее эрозионно-стойкими являются материалы с большими величинами агрегатных превращений [1, 6], например, эрозия молибдена в 4 раза меньше скорости распыления никеля. В дальнейшем данное свойство металлов будет использовано в конструкции катода.

Скорость эрозии электродов, как правило, уменьшается по мере увеличения теплопроводности, теплоемкости, температур плавления и кипения [1, 2, 4, 6]. Существование таких зависимостей подтверждается предположением о решающей роли термических процессов в эрозионном разрушении электродов. Большие значения перечисленных констант сдерживают рост интегральной температуры рабочей поверхности электрода, что существенно влияет на переход от одного типа катодных пятен к другому.

Интенсивность распыления уменьшается при увеличении твердости, модуля упругости, коэффициентов сжатия и линейного теплового расширения (КЛТР), что служит подтверждением роли термоупругого механизма разрушения электрода [4]. Сильный локальный разогрев в катодном пятне приводит к возникновению термических напряжений вследствие больших градиентов температуры на границах пятна. Когда термическое напряжение превышает предел прочности материала электрода, на рабочей поверхности образуется сеть трещин, что в последующем приводит к отрыву микрочастиц и распылению их в разрядный объем.

О влиянии уменьшения работы выхода электрона на замедление скорости эрозии электрода существуют различные мнения. Одни разработчики утверждают, что уменьшение работы выхода электронов вызывает увеличение плотности тока электронной эмиссии с катода и соответствующее снижение доли ионного тока в области катодного пятна [8]. Это, в свою очередь, способствует компенсации части положительного пространственного заряда и, как следствие, снижению катодного падения потенциала. Другие считают, что уменьшение работы выхода электрона облегчает переход к термоэлектронному механизму эмиссии без ярко выраженных катодных пятен [4, 5].

Увеличение электропроводности материала электрода приводит к уменьшению температуры эмиттера, источником которого является джоулев нагрев в пятнах и объеме электрода [4, 7].

Состав плазмообразующей среды. Снижение потенциала ионизации рабочего газа, входящего в состав наполнения газоразрядной лампы,

способствует уменьшению температуры плазмы в приэлектродной области, что положительно сказывается на температурных условиях работы электрода [4, 8] и замедляет скорость эрозии электрода.

Присутствие примесей (водорода, паров воды и др.) в высокотемпературной плазме приводит к их взаимодействию с кварцевой оболочкой и образованию монооксида кремния, в дальнейшем разлагающегося с выделением кислорода, вольфрамов и активных оксидов, имеющих низкую температуру плавления и высокую интенсивность распыления [8].

Физические свойства и давление газового наполнения газоразрядной лампы определяют интенсивность распыления электрода, например, скорость эрозии уменьшается с ростом атомной массы и давления рабочего газа [1, 4]. Одновременно перечисленные характеристики оказывают влияние на размеры и динамику катодных пятен и, как следствие, вызывают различную степень разрушения поверхности электрода, соприкасающейся с плазмообразующей средой.

Конструкция электрода. При исследовании электродов из композиционных материалов установлено, что материалы с мелкозернистой структурой имеют более высокую эрозионную стойкость по сравнению с крупнозернистой структурой в силу динамического равновесия между расходуемой и поступающей на поверхность активной присадки [1]. При работе электрода с температурой более 1000 °С начинается процесс рекристаллизации материала, что приводит к превращению мелкозернистой структуры в крупнозернистую [8]. Наличие активирующих присадок уменьшает рабочую температуру электрода, а их диффузия замедляет темп преобразования структуры материала [8].

Качество высокотемпературной вакуумной обработки электрода определяет содержание в нем газообразных продуктов и легколетучих примесей. В данном случае исследователи связывают скорость эрозии с микроразрушением при бурном газовыделении из образовавшегося расплава металла на поверхности электрода и его распылением [8].

Конфигурация рабочей поверхности (сфера, конус, цилиндр и др.), масса и состояние поверхности (шероховатость) определяют температурное поле электрода и, как следствие, интенсивность эрозии материала [2, 6, 8].

Параметры разряда. При исследовании скорости распыления материалов в импульсном разряде обнаружены дискретные эрозионные лунки на поверхности и получена зависимость их плотности от различных условий разряда. Показано, что с увеличением длительности разряда при постоянной амплитуде прямоугольных импульсов тока число эрозионных следов возрастает [1, 2, 4, 6].

Эрозионный эффект повышается при увеличении энергии разряда и частоты следования токовых импульсов [1, 8]. Предположительно, распыление носит характер микровзрыва и повышается роль термоупругого разрушения электродов. С уменьшением частоты следования импульсов f менее 300 Гц и увеличением амплитуды тока скорость эрозии возрастает. Для каждой конфигурации электрода существует оптимальная сила тока, которая возрастает при увеличении диаметра электрода [8].

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что при разработке газоразрядной лампы требуется проводить многофакторную оптимизацию состава компонентов эмиттера и конструкции электрода во взаимосвязи с условиями его работы в плазмообразующей среде. Необходимо акцентировать внимание на том, что большинство параметров, приведенных в схеме (см. рис. 1), относятся к кристаллическому вольфраму, активированному оксидами иттрия, лантана и тория [1, 4, 8]. В настоящее время в области катодной электроники интенсивно развиваются научные направления, посвященные созданию прессованных и импрегнированных электродов [5, 9–12]. В связи с этим, учитывая многочисленный опыт изучения воздействующих на электрод факторов (см. рис. 1), в настоящей работе будут исследованы и проанализированы процессы деградации катода импульсных ксеноновых ламп в условиях высокой токовой нагрузки на электрод.

Экспериментальные исследования. В настоящее время в приборостроении интенсивно развивается научное направление, нацеленное на создание оптико-электронных УФ-систем обеззараживания с использованием в качестве источника излучения импульсной ксеноновой лампы [13]. Выполнены исследования [14, 15] указанных источников излучения. Показано, что в процессе длительной наработки импульсных газоразрядных ламп наибольшей деградации подвергается катод. Для установления процессов, происходящих на поверхности и в теле рабочей части этого электрода (эмиттера), изготовленной на основе молибдена с активирующей присадкой скандата бария $3\text{BaO} \cdot 2\text{Sc}_2\text{O}_3$, разработана методика, состоящая из следующей последовательности операций:

- изостатическое прессование эмиттеров из одной и той же партии шихты на основе композиционных материалов;
- изготовление шлифов из произвольной выборки эмиттеров, анализ компонентного состава и распределения компонентов по толщине электрода в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 2). Полученные в результате энергодисперсионного рентгеновского анализа значения концентрации присадок усреднялись;

- выпуск по серийной технологии партии импульсных ксеноновых ламп, которые подвергались ресурсным испытаниям;
- разборка лампы (после испытаний образцов), извлечение эмиттера, анализ концентрации активирующей добавки у поверхности и вдоль продольной оси рабочей части электрода.

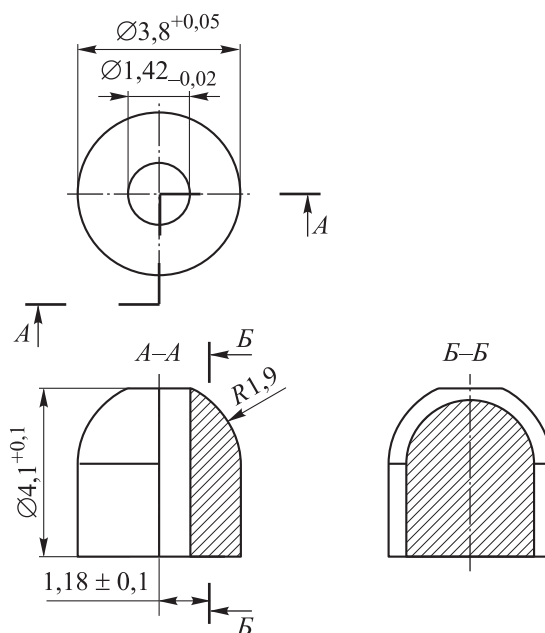


Рис. 2. Конструкция электрода, изготовленного прессованием, и анализируемое сечение Б–Б

Особенности конструкции и технологии исследуемых ламп. Для изготовления катодов изостатическим прессованием использовались мелкодисперсные порошки молибдена и скандата бария $3\text{BaO} \cdot 2\text{Sc}_2\text{O}_3$ с размером зерна в диапазоне значений 5...20 мкм. Экспериментально установлено, что применение частиц большего диаметра не обеспечивает достаточную плотность тела эмиттера при прессовании. Скандат бария получали спеканием смеси оксида скандия с карбонатом бария при температуре 1400 °С в течение 24 ч с последующим измельчением образовавшейся фритты до требуемого гранулометрического размера. Далее составные компоненты эмиттера смешивались в барабане валковой мельницы в соотношении $\text{Mo} : (3\text{BaO} \cdot 2\text{Sc}_2\text{O}_3) = 97 : 3$ % (вес.).

Полученная шихта в строго фиксированном количестве размещалась в специальной технологической форме, в которой проводилось прессование. Полученная конфигурация эмитирующей части электрода (см. рис. 2)

устанавливалась специально сформированным по оси внутренним цилиндрическим отверстием на молибденовый держатель, полученная сборка подвергалась термической обработке при температуре 1750...1800 °С в течение 30 мин. Происходящая при указанном тепловом воздействии усадка пресованной детали способствовала прочному сцеплению эмиттера с молибденовым держателем.

Конструкция прямых импульсных ламп подробно описана в [1, 14, 15] и представляет собой кварцевую трубку, на концах которой посредством огневой обработки герметично установлены электродные узлы. Пространство между узлами заполнено рабочим газом ксеноном. Экспериментальные лампы изготавливались по типовой технологии [16]. Диаметр разрядного промежутка исследуемых образцов составлял 5 мм, межэлектродное расстояние — 120 мм, давление ксенона не превышало 210 мм рт. ст.

Аппаратное обеспечение экспериментов. Испытания лампы на продолжительность срока службы проводились в разрядном контуре при емкости накопительного конденсатора 60 мкФ и напряжении 1,38 кВ при средней электрической мощности 200 Вт и частоте следования токовых импульсов 3 Гц. Для пробоя разрядного промежутка использовался высоковольтный импульс с амплитудой 20 кВ и длительностью первой полуволны 1 мкс.

Для контроля электрических параметров испытываемой лампы в разрядном контуре использованы:

- три низкоиндуктивных делителя напряжения типа Pintek HVP-39, размещенные в разных участках электрической цепи питания для контроля потерь мощности в контуре;
- токовый шунт SDN-001, который во избежание влияния высоковольтного импульса поджига на осциллограммы, расположен между накопительным конденсатором и устройством зажигания.

Полученные осциллограммы напряжений и тока приведены на рис. 3.

Из экспериментальных данных следует, что максимальный ток разряда достигается по истечении 75 мкс с момента пробоя межэлектродного промежутка и стремится к значению 660 А. Визуальные наблюдения посредством проекции изображения электрода на матовый экран позволили определить, что ксеноновый разряд полностью охватывает сферическую поверхность электродов (см. рис. 2), т. е. площадь контакта плазмы с эмиттером составляет 0,25 см². Таким образом, плотность тока в момент максимума достигает значения 2,64 кА/см². В результате анализа [5, 9, 11] выявлено, что исследований структурных изменений в эмиттерах при указанных токовых нагрузках ранее не проводилось.

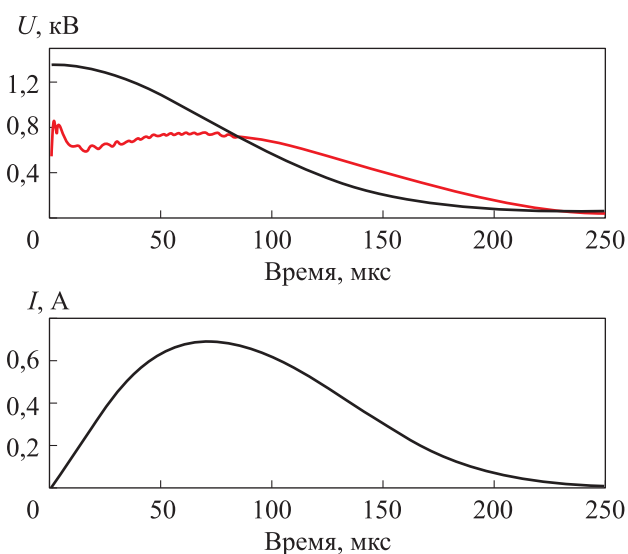


Рис. 3. Осциллограммы напряжений U и тока I исследуемой лампы (—) и накопительного конденсатора (—)

Для анализа микроструктуры эмиттера задействован растровый электронный микроскоп (РЭМ) с вольфрамовым катодом Tescan VEGA II LMN (Чехия) с использованием метода построения изображения, основанного на фазовом контрасте. Для изучения химического состава в разных точках поверхности среза эмиттера (см. рис. 2) в исследованиях применялся способ энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, позволяющий регистрировать спектр рентгеновского излучения, генерируемого образцом-мишенью под действием электронной бомбардировки. В качестве примера на рис. 4 приведена качественная картина трансформации спектра рентгеновского излучения характерных линий молибдена, скандия и бария, зафиксированная в ходе увеличения срока службы импульсной ксеноновой лампы посредством энергодисперсионного анализатора INCA 350 (Великобритания).

Согласно приведенным примерам двух рентгеновских спектров по истечении срока службы $\sim 10^6$ импульсов значительное число интенсивных линий исчезает, что свидетельствует об обеднении приповерхностной зоны активирующей добавкой.

Полученные результаты исследований и их обсуждение. Как отмечено выше, в импульсных ксеноновых лампах наиболее интенсивной эрозии подвержен катод из-за агрессивного воздействия ионного потока, высокотемпературного состояния, необходимого для поддержания устойчивой эмиссии электронов, физико-химических свойств (см. рис. 1) при-

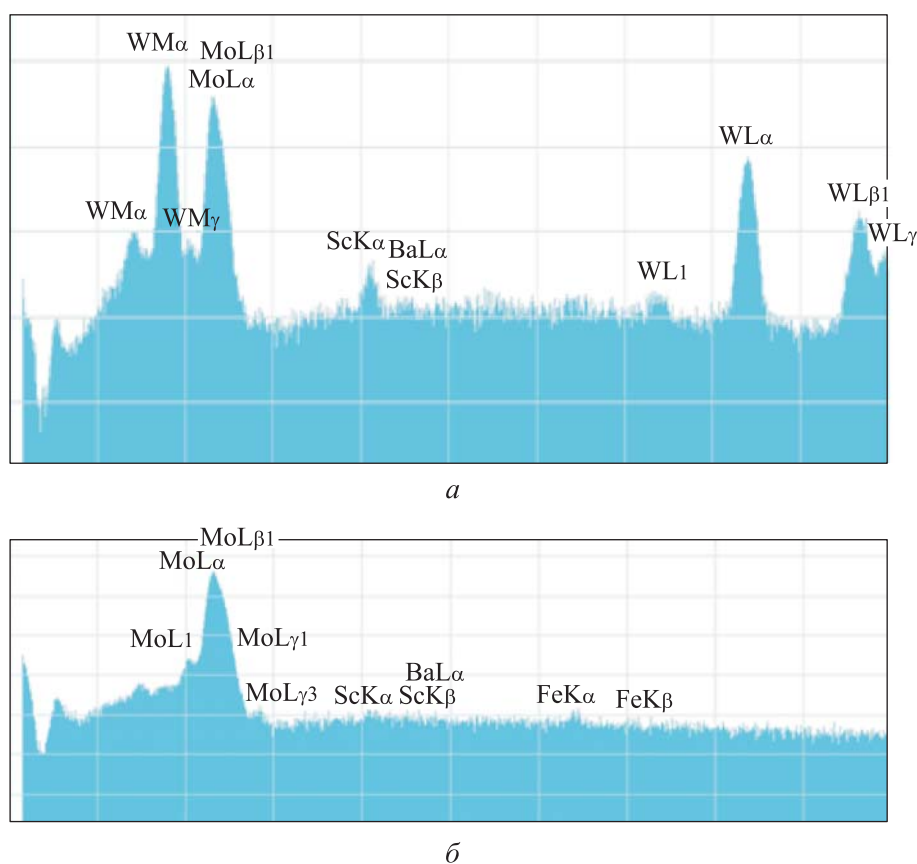


Рис. 4. Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектр излучения компонентов эмиттера на рабочей поверхности катода в начале работы (а) и по истечении 10^6 импульсов (б)

меняемых материалов и т. д. [1, 2, 12, 14, 15]. В качестве примера в табл. 1 приведены фотографии исследуемой импульсной ксеноновой лампы в начале и конце срока службы.


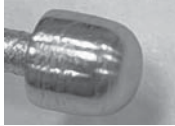


Наблюдаемый серо-желтый налет на внутренней поверхности кварцевой оболочки свидетельствует об интенсивном распылении эмиттера. Неравномерность цветовой гаммы окрашенной колбы связана с разными скоростями диффузных потоков распыляемых частиц в зону высокотемпературного разряда и с продольным градиентом температуры поверхности оболочки, влияющим на толщину осаждаемого слоя в соответствии с уравнением Герца — Кнудсена [17].

Образовавшаяся пленка распыленного материала не только способствует снижению прозрачности оболочки импульсной ксеноновой лампы и, как следствие, приводит к снижению потока излучения (параметрический

отказ), но и является источником возникающих напряжений на внутренней поверхности колбы. Согласно [18], расплавленные частицы материала катода внедряются в поверхностный слой оболочки лампы на глубину 0,04...0,1 мм. Каждая частица порождает несколько трещин, имеющих вид сколов, развитых на глубину 0,1 мм. С увеличением наработки трещины объединяются, образуя мозаичную сеть, и развиваются вплоть до внешней поверхности кварцевой стенки, способствуя разрушению лампы. Снижение оптической прозрачности колбы вызывает дополнительное поглощение излучения из плазмы, которое приводит к увеличению температуры кварцевого стекла и росту интенсивности испарения оксида кремния. В рассматриваемом случае разряд короткой длительности $t_{0,5} \sim 110$ мкс (см. рис. 3), поэтому на напряженное состояние оболочки лампы накладывается давление паров кварца [19]. Вопрос снижения эрозии материала катода является особенно актуальным в случае импульсных ламп.

Таблица 1

Влияние эрозионных процессов катода на прозрачность кварцевой оболочки и эмиссионную поверхность электрода

Срок службы, N , импульсы	Зона соединения катодного узла с оболочкой	Рабочая поверхность катода
0		
10^7 (~ 1000 ч)		

Результаты исследования микроструктуры скандатного эмиттера посредством растрового электронного микроскопа Tescan VEGA в начале и конце срока службы импульсной ксеноновой лампы приведены на рис. 5.

Согласно рис. 5, а, после изостатического прессования тела катода вблизи рабочей поверхности наблюдается равномерное распределение зерен молибдена и заполняющих пространство между ними частиц скандата бария. После 10 млн импульсов произошло обеднение рабочей поверхности катода, о чем свидетельствуют образовавшиеся пустоты в теле электрода, которые отчетливо видны на рис. 5, б.

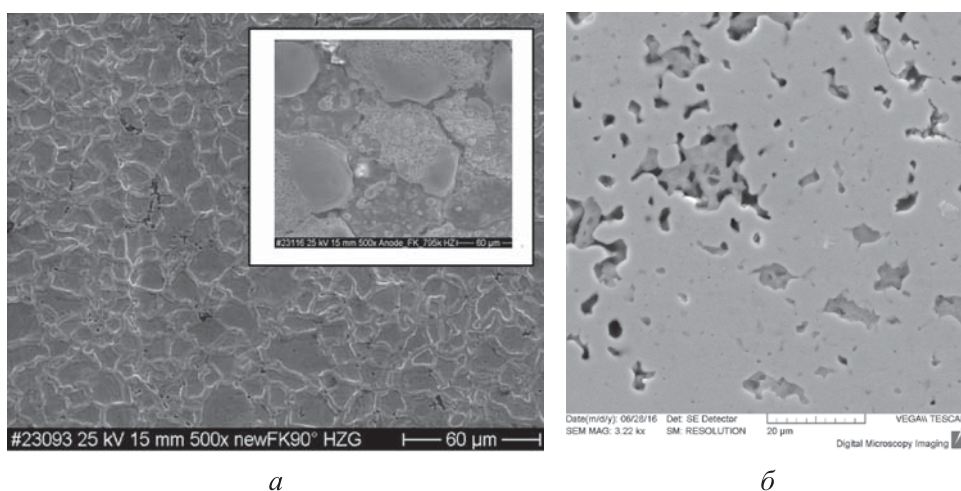


Рис. 5. Микроструктуры эмиттера в начале испытаний (*а*) и после наработки лампы более 10^7 импульсов (*б*)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости изучения концентрации активирующих добавок вдоль продольной оси тела катода, чтобы понять механизм диффузии примеси в рабочей поверхности электрода. Отметим, что, согласно теоретической модели работы скандатного эмиттера [10, 20], основным элементом, определяющим работу выхода электронов, является оксид бария. Влияние скандия заключается в образовании кислородных вакансий в оксиде бария. Поэтому для энергодисперсионного рентгеновского анализа концентрации активирующей добавки в теле катода за основу принят оксид бария. Полученные результаты изучения энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектров излучения компонентов эмиттера (см. рис. 4) сведены в табл. 2.

Таблица 2

Распределение эмиссионного вещества в катоде (% (вес.))

Расстояние от рабочей поверхности, мкм	Наработка импульсной лампы, млн импульсов		
	0	1,0	10,0
50	1,75	1,64	1,71
200	3,13	3,29	2,36
350	3,56	3,72	2,81

Как следует из приведенных в табл. 2 данных, в течение срока службы происходит изменение концентрации активирующего вещества в объеме электрода:

– до начала испытаний наблюдается равномерное распределение добавок оксида бария. Исключение составляет приповерхностный слой (~ 50 мкм) рабочей поверхности электрода, что связано с особенностями механической обработки в целях придания сферической формы катоду;

– после наработки лампы (1 млн импульсов) рабочая поверхность катода обедняется эмиссионными добавками за счет распыления электрода [1], но в глубине тела электрода равномерность распределения присадки сохраняется;

– по достижении срока службы лампы 10 млн импульсов ситуация меняется. Происходит увеличение приповерхностной концентрации добавок и обеднение примесями в глубине электрода. Приведенная на рис. 5, б микроструктура электрода после указанной наработки свидетельствует о наличии пустот в глубине тела катода. Данное явление связано с миграцией эмиссионных добавок к рабочей поверхности электрода [10].

Необходимо пояснить повышенную концентрацию оксида бария в приповерхностном слое (50 мкм) после 10 млн импульсов (см. табл. 2). Наблюдаемый рост содержания эмиссионной добавки связан, скорее всего, не с миграцией активирующего вещества, а со смещением границы контакта с плазмой вглубь тела катода из-за распыления рабочей части электрода при работе лампы (см. табл. 1).

Заключение. Скорость диффузии оксида бария существенно зависит от гранулометрического состава шихты, силы прессования и температуры спекания (пористости), концентрации эмиссионного вещества и т. д. Устойчивость к оплавлению электрода под воздействием плазмы можно повысить, если заменить молибденовый каркас катода вольфрамовой губкой [9, 11, 21]. На решение перечисленных проблем направлены исследования, проводимые в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Маршак И.С., ред. Импульсные источники света. М., Энергия, 1978.
- [2] Гордиенко П.С., Верхотуров А.Д., Достовалов В.А. и др. Электрофизическая модель эрозии электродов при импульсном энергетическом воздействии. *Электронная обработка материалов*, 2011, № 3, с. 15–27. EDN: QZMXDP
- [3] Курбаслимов В.С., Голятина Р.И., Майоров С.А. и др. О влиянии распыления электродов на характеристики импульсного разряда в гелии при атмосферном давлении. *Прикладная физика*, 2020, № 4, с. 24–31. EDN: ASOWOU
- [4] Амосов В.М., Карелин Б.А., Кубышкин В.В. Электродные материалы на основе тугоплавких металлов. М., Металлургия, 1976.

- [5] Капустин В.И., Ли И.П. Скандатные катоды СВЧ-приборов, достижения и перспективы. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2015, № 2, с. 124–136. EDN: TLSBOB
- [6] Пинчук М.Э., Степанова О.М., Куракина Н.К. и др. Особенности эрозии электродов в сильноточных разрядах высокого давления. *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2014, т. 57, № 12-2, с. 245–248. EDN: TUCPPD
- [7] Кузнецов В.Е., Сафронов А.А., Ширяев В.Н. и др. Исследование эрозии электродов в плазмотронах постоянного и переменного тока. *Прикладная физика*, 2019, № 3, с. 24–30. EDN: GXZCUP
- [8] Морцева Г.И., ред. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. Новосибирск, Наука, 1982.
- [9] Дюбуа Б.Ч., Королев А.Н. Современные эффективные катоды. *Электронная техника. Сер. СВЧ-техника*, 2011, № 1, с. 5–24. EDN: NSHUBZ
- [10] Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В. и др. Физический механизм работы скандатных катодов СВЧ-приборов. *ЖТФ*, 2017, т. 87, № 1, с. 106–116. DOI: <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.01.44026.1873>
- [11] Макаров А.П., Берснева Е.Ю., Земчихин Е.М. и др. Скандатные катоды с высокой плотностью тока для применения в приборах СВЧ. *Электронная техника. Сер. СВЧ-техника*, 2016, № 4, с. 15–24. EDN: XHGGAR
- [12] Баранова В.И., Коновалов В.А., Шабуркина В.И. Металлокерамические катоды на основе вольфрама со скандатом бария для газоразрядных приборов. *Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы*, 1984, № 6, с. 34–35.
- [13] Зверев А.Ю., Борисевич С.В., Масыкин Д.Н. и др. Вирулицидная активность импульсного ультрафиолетового излучения сплошного спектра в отношении коронавируса SARS-CoV-2. *Медицинский алфавит*, 2020, № 18, с. 55–58. DOI: <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2020-18-55-58>
- [14] Киреев С.Г., Гавриш С.В., Кулебякина А.И. и др. Влияние механизма инициирования сильноточного импульсного ксенонового разряда на оптическую деградацию кварцевой оболочки в УФ-области спектра. *Успехи прикладной физики*, 2022, т. 10, № 1, с. 90–96. EDN: IAQCOJ
- [15] Киреев С.Г., Гавриш С.В., Кулебякина А.И. и др. Зависимость эффективности УФ-излучения импульсных ксеноновых ламп от объемной плотности мощности разряда. *Прикладная физика*, 2021, № 6, с. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-6-24-29>
- [16] Ходкевич Л.П., Леко В.К. Кварцевое стекло в производстве электровакуумных изделий. М., Энергоатомиздат, 1981.
- [17] Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. М., Энергия, 1977.
- [18] Гербин А.И., Шапошников В.М., Кобзарь А.И. Возникновение и развитие дефектов в оболочках импульсных ламп накачки из кварцевого стекла. *Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника*, 1979, № 3, с. 20–25.
- [19] Белоусова Л.Е. О разрушении импульсной лампы при испарении стенок в режиме короткой вспышки. *Светотехника*, 1973, № 2, с. 12–13.

[20] Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В. и др. Механизм формирования и свойства кристаллитов оксида бария в металлопористом катоде. *Перспективные материалы*, 2016, № 7, с. 5–15. EDN: WGHVWB

[21] Мельникова И.П., Лясников В.Н., Лясникова А.В. Эмиссионные свойства металлопористых катодов. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 2012, т. 15, № 2, с. 84–90. EDN: РСХНОН

Гавриш Сергей Викторович — д-р техн. наук, начальник отдела ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Потапенко Алексей Олегович — научный сотрудник ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Пучнина Светлана Викторовна — канд. техн. наук, начальник лаборатории ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Шашковский Сергей Геннадьевич — канд. техн. наук, главный конструктор ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гавриш С.В., Потапенко А.О., Пучнина С.В. и др. Устойчивость скандатных электродов к воздействию сильноточного импульсного разряда в ксеноне. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 3 (148), с. 4–21. EDN: REKKSU

OPERATION RESISTANCE OF THE SCANDATE ELECTRODES EXPOSED TO THE HIGH-CURRENT PULSED DISCHARGE IMPACT IN XENON

S.V. Gavrish

A.O. Potapenko

S.V. Puchnina

S.G. Shashkovskiy

svgavr@list.ru

alexu1999pt@gmail.com

svetlanapuchnina@mail.ru

melitta916@gmail.com

LLC “SPE “Melitta”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper analyzes operation resistance of the pulsed xenon lamp scandate cathode. It provides a detailed analysis of the factors affecting the electrode working surface and considers the effect of cathode design emission material, emitter physical and chemical properties, plasma-forming medium composition and

Keywords

Pulse discharge, gas-discharge lamp, cathode, emitter, active-adding additive, molybdenum, barium scandate, energy-dispersive analysis, electron microscopy

pulse discharge parameters on the erosion. Considerable attention is paid to the cathode manufacture technology by the isostatic pressing of powder consisting of 97 % (weight) of molybdenum and 3 % (weight) of barium scandate. The studied gas-discharge lamp design and electric power supply are analyzed in detail. Based on the obtained current pulse oscillograms and the cathode working surface design dimensions, the current load on the studied electrode was found at 2.64 kA/cm². Resource testing made it possible to study the effect of electrode erosion on the quartz shell transparency and configuration of the cathode working part. It was established that by the end of the pulsed lamp service life, the cathode spherical surface was transforming into a plane with many drops of molybdenum on the electrode end part. Electron microscopy and energy-dispersive analysis was used to find that during the gas-discharge lamp operation, the electrode surface in contact with the plasma was depleted of the activating additive with formation of the hollow cavities. At the same time, barium oxide was migrating longitudinally from the cathode body depth to the working surface during the service life

Received 11.01.2024

Accepted 26.02.2024

© Author(s), 2024

The work was financially supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in the Scientific and Technical Sphere (contract no. 20GRE-S18/91616)

REFERENCES

- [1] Marshak I.S., ed. *Impulsnye istochniki sveta [Pulsed light sources]*. Moscow, Energiya Publ., 1978.
- [2] Gordienko P.S., Verkhoturov A.D., Dostovalov V.A., et al. Electrophysical model of the erosion of electrodes under the energy pulse effect. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 206–216.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375511030045>
- [3] Kurbaslimov V.S., Golyatina R.I., Mayorov S.A., et al. On the effect of electrode sputtering on the characteristics of a pulsed discharge in helium at atmospheric pressure. *Prikladnaya fizika*, 2020, no. 4, pp. 24–31 (in Russ.). EDN: ASOWOU
- [4] Amosov V.M., Karelin B.A., Kubyshkin V.V. *Elektrodnye materialy na osnove tugoplavkikh metallov [Electrode materials based on refractory metals]*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976.

- [5] Kapustin V.I., Li I.P. Microwave devices scandate cathodes: their achievements and prospects. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2015, no. 2, pp. 124–136 (in Russ.). EDN: TLSBOB
- [6] Pinchuk M.E., Stepanova O.M., Kurakina N.K., et al. Features of electrode erosion in high current high pressure arcs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 12-2, pp. 245–248 (in Russ.). EDN: TUCPPD
- [7] Kuznetsov V.E., Safronov A.A., Shiryaev V.N., et al. Investigation of the parameters of electrode erosion in direct and alternating current plasma torches. *Prikladnaya fizika*, 2019, no. 3, pp. 24–30 (in Russ.). EDN: GXZCUP
- [8] Mortseva G.I., ed. Prielektrodneye protsessy v dugovykh razryadakh [Near-electrode processes in arc discharges]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982.
- [9] Dyubua B.Ch., Korolev A.N. Modern effective cathodes. *Elektronnaya tekhnika. Ser. SVCh-tekhnika*, 2011, no. 1, pp. 5–24 (in Russ.). EDN: NSHUBZ
- [10] Kapustin V.I., Li I.P., Shumanov A.V., et al. Physical operating principles of scandate cathodes for microwave devices. *Tech. Phys.*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 116–126. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784217010108>
- [11] Makarov A.P., Bersneva E.Yu., Zemchikhin E.M., et al. Scandate cathodes with high current density for application in microwave devices. *Elektronnaya tekhnika. Ser. SVCh-tekhnika*, 2016, no. 4, pp. 15–24 (in Russ.). EDN: XHGGAR
- [12] Baranova V.I., Konovalov V.A., Shaburkina V.I. Ceramic-metal cathodes based on tungsten with barium scandate for gas discharge devices. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektrovakuumnye i gazorazryadnye pribory*, 1984, no. 6, pp. 34–35 (in Russ.).
- [13] Zverev A.Yu., Borisevich S.V., Masyakin D.N., et al. Virucidal activity of pulsed ultraviolet radiation of continuous spectrum against SARS-CoV-2 coronavirus. *Meditsinskiy alfavit* [Medical Alphabet], 2020, no. 18, pp. 55–58 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2020-18-55-58>
- [14] Kireev S.G., Gavriish S.V., Kulebyakina A.I., et al. Influence of flash ignition mechanism of high-current pulsed xenon discharge on the optical degradation of the quartz shell in the UV region of the spectrum. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2022, vol. 10, no. 1, pp. 90–96 (in Russ.). EDN: IAQCOJ
- [15] Kireev S.G., Gavriish S.V., Kulebyakina A.I., et al. Dependence of the Xe flash UV radiation efficiency on the volumetric power density of the discharge. *Prikladnaya fizika*, 2021, no. 6, pp. 24–29 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-6-24-29>
- [16] Khodkevich L.P., Leko V.K. Kwartsevoe steklo v proizvodstve elektrovakuumnykh izdeliy [Quartz glass in the production of electro-vacuum products]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981.
- [17] Isachenko V.P. Teploobmen pri kondensatsii [Heat exchange during condensation]. Moscow, Energiya Publ., 1977.
- [18] Gerbin A.I., Shaposhnikov V.M., Kobzar A.I. Occurrence and evolution of defects in quartz shells of pulsed pump lamps. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Lazernaya tekhnika i optoelektronika*, 1979, no. 3, pp. 20–25 (in Russ.).

[19] Belousova L.E. On destruction of a flash lamp during evaporation of the walls in a flash mode. *Svetotekhnika*, 1973, no. 2, pp. 12–13 (in Russ.).

[20] Kapustin V.I., Li I.P., Shumanov A.V., et al. Formation mechanism and properties of barium oxide crystallites in the impregnated cathodes. *Perspektivnye materialy*, 2016, no. 7, pp. 5–15 (in Russ.). EDN: WGHVWB

[21] Melnikova I.P., Lyasnikov V.N., Lyasnikova A.V. Emission properties of dispensed cathodes. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of Wave Processes and Radio Systems], 2012, vol. 15, no. 2, pp. 84–90 (in Russ.). EDN: PCXHON

Gavrish S.V. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Light Sources, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Potapenko A.O. — Research Fellow, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Puchnina S.V. — Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Shashkovskiy S.G. — Cand. Sc. (Eng.), Chief Designer, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gavrish S.V., Potapenko A.O., Puchnina S.V., et al. Operation resistance of the scandate electrodes exposed to the high-current pulsed discharge impact in Xenon. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 3 (148), pp. 4–21 (in Russ.). EDN: REKKSU