

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СПАЕВ САПФИРА С МЕТАЛЛАМИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМПАХ

С.В. Гавриш

svgavr@list.ru

С.В. Пучнина

svetlanapuchnina@mail.ru

ООО «НПП «Мелитта», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены особенности конструкции и технологии цилиндрических спаев сапфира (корунда) с ниобием и коваром (сплав 29НК), разработанных для использования в импульсных газоразрядных лампах с разрядом в парах щелочных металлов. Выполнен анализ эксплуатационных характеристик газоразрядной лампы и определены основные требования, предъявляемые к спаям. Показаны основные виды дефектов, определяющие оптическую прозрачность и механическую прочность монокристалла сапфира, выращенного направленной кристаллизацией по методу Степанова, и сформулированы основные требования к профилированной сапфировой трубе. Приведены полученные результаты исследований по снижению внутренних напряжений при термической обработке сапфировой трубы перед пайкой. Основное внимание уделено изучению физико-химических явлений, происходящих в процессе пайки медью сапфира стеклокерамическим припоем с ниобием и медью с коваром. Для спая сапфира с ниобием доказана необходимость введения в структуру металла до 1 % примеси циркония, позволяющего снизить рекристаллизацию сплава и уменьшить скорость миграции образовавшихся зерен. В случае активной пайки сапфира с коваром показана важность соблюдения рекомендуемых температурных режимов плавления припоя для исключения образования интерметаллидов титана. Приведены основные конструктивные решения спаев с сапфиром и результаты их испытаний на устойчивость к механическим и климатическим факторам

Ключевые слова

Сапфировая труба, ниобий, ковар, спай, газоразрядная лампа, стеклокерамический припой, активная пайка

Поступила 10.01.2022

Принята 23.02.2022

© Автор(ы), 2022

Введение. В настоящее время приоритетным направлением развития плазменной электроники является создание импульсных источников инфракрасного (ИК) излучения (газоразрядных ламп) для оптико-электронных систем (ОЭС) специального назначения [1, 2]. Газоразрядная лампа является основным функциональным элементом ОЭС, поскольку она обеспечивает спектральный диапазон, структуру и интенсивность излучения системы [1]. Следовательно, ее способность сохранять требуемые эксплуатационные характеристики в течение всего срока службы при повышенных механических и климатических воздействиях определяет надежность работы ОЭС в целом [2].

Импульсный источник ИК-излучения для ОЭС (рис. 1) представляет собой цилиндрическую разрядную трубу 1 (горелку) из сапфира (корунда), заполненную плазмообразующей средой на основе паров цезий-ртуть-ксеноновой смеси и коаксиально размещенную в атмосфере неона наружной термостатирующей цилиндрической корундовой оболочке (колбы) 2.

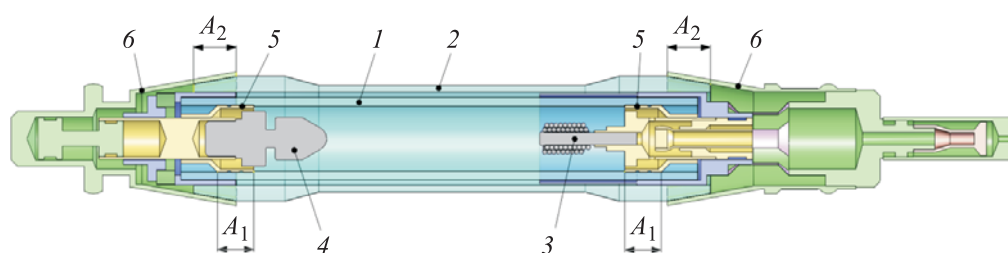


Рис. 1. Конструктивное исполнение газоразрядной лампы с двумя сапфировыми оболочками:

- 1 — сапфировая разрядная труба; 2 — корундовый внешний баллон; 3 — катод;
- 4 — анод; 5 — ниобиевые колпачки; 6 — коваровые (сплав 29НК) колпачки;
- A_1 и A_2 — области спаев сапфира с металлами

Импульсные источники ИК-излучения с разрядом в парах цезия и ртути, ограниченным двумя сапфировыми оболочками (см. рис. 1), широко используются в ОЭС противодействия.

Важным направлением дальнейшего совершенствования газоразрядных ламп данного класса является повышение их надежности, что, в свою очередь, определяется способностью обеспечивать герметичность соединений (спаев) сапфира с металлом (области A_1 и A_2 , см. рис. 1) в течение всего срока службы. При этом спаи эксплуатируются в различных условиях. Например, соединение разрядной трубы в области A_1 должно обеспечивать вакуумную плотность в условиях рабочих температур до 700 °С в атмосфере паров цезия и ртути, а для спаев в зоне A_2 требуется сохране-

ние гелиевой прочности при температуре 400 °С в условиях воздействия внешних климатических факторов.

Теплофизическое состояние в зоне ниобиевого колпачка 5, соединенного с сапфировой трубой 1, определяется теплопроводностями электродов 3 и 4 и самой сапфировой оболочки, подогреваемой цезий-ртутной плазмой. Тепловой баланс спая сапфир–ковар зависит от теплопередачи неона, заполняющего объем внешней колбы 2, и теплосъема принудительного воздушного потока, охлаждающего лампу.

Необходимость использования полированного сапфира в рассматриваемом классе ламп связана со следующими его физическими и химическими свойствами [3]:

- оптической прозрачностью в спектральном диапазоне 0,2...6,0 мкм;
- термостойкостью при температуре до 1500 °С для поддержания стабильности разряда в импульсной лампе;
- газонепроницаемостью при рабочих температурах разрядной оболочки;
- отсутствием выделения в разряд веществ, нарушающих состав плазмообразующей среды;
- механической прочностью при рабочих температурах, достаточной для обеспечения устойчивости к внешним и внутренним давлениям, возникающим в процессе работы лампы;
- высокими электроизоляционными свойствами внешней и разрядной оболочек;
- химической стойкостью к веществам, в которых происходит разряд.

В силу перечисленных уникальных свойств сапфира и сложных условий эксплуатации спаев газоразрядной лампы возникает актуальная задача изучения физических и химических процессов, происходящих в ходе формирования соединения металлов с сапфиром и при эксплуатации спаев в составе разрядного источника. Дополнительную значимость настоящей работе придает вопрос исследования взаимосвязи надежности спаев со структурным совершенством сапфира, выращенного по перспективному методу А.В. Степанова (методу направленной кристаллизации), обеспечивающему высокую производительность и низкую цену сапфировой трубы [3].

При решении поставленной задачи в настоящей работе материалы изложены в той последовательности, которую рекомендуется соблюдать, чтобы получить надежный спай металла с профилированным сапфиром, выращенным методом направленной кристаллизации.

Основные дефекты сапфировой трубы, входной контроль и операции подготовки сапфира к пайке. В настоящей работе подробного описания метода Степанова приводиться не будет, поскольку он подробно рассмотрен в [3, 4]. Необходимо отметить две особенности метода Степанова, определяющие качество выращиваемой сапфировой трубы. Во-первых, направленная кристаллизация проводится с использованием капиллярного эффекта [4], который обеспечивается специальным формообразователем из тугоплавких материалов (молибдена, вольфрама и др.). Во-вторых, в зоне роста требуется стабилизация определенных условий теплоотвода для устойчивой кристаллизации сапфировой трубы [5].

Основные процессы дефектообразования в сапфировой трубе происходят на стадии выращивания ее из расплава [5–9]. В результате анализа существующих публикаций и проведенных исследований сделаны следующие заключения относительно структурного несовершенства выращенной сапфировой трубы.

1. Оптическое пропускание сапфировых труб зависит от наличия точечных дефектов, которые заимствуются из исходного сырья, материала формообразователя, тигля и т. д. Источником поверхностных пузырей являются растворенные в расплаве газы и продукты диссоциации оксида алюминия на фронте кристаллизации [8, 9]. Применение шлифования и полирования внутренней и внешней поверхностей трубы позволяет устранить приведенные дефекты и повысить прозрачность сапфира [3].

2. Важными дефектами, влияющими на механическую прочность сапфировой трубы, являются блочная (мозаичная) структура монокристалла [3–6] и поля остаточных напряжений. Как следует из работ [5, 6], основными факторами, определяющими мозаичную структуру, являются кристаллографическая ориентация и структурное совершенство затравочных кристаллов, появление дислокаций, обусловленных нелинейностью температурных полей в монокристалле, формирование границ блоков в результате перестройки структуры дислокаций.

3. Для монокристаллических труб в процессе роста характерно отклонение геометрической формы от цилиндрической конфигурации, связанное с развитием на их поверхности естественных граней [7–9]. Поэтому для придания колбе цилиндричности в зоне будущего спая применяется операция шлифования 5-го класса чистоты [8].

Методики контроля дефектов структуры монокристаллического сапфира подробно изложены в работе [10]. Изучение всего многообразия дефектов структуры позволило сформулировать основные требования, предъявляемые к трубе при входном контроле перед пайкой:

- отсутствие на торцевых поверхностях сапфировой трубы трещин; для устранения данного дефекта обычно применяются операции шлифования и полирования торца;
- число парогазовых включений на поверхности трубы не допускается более 5 шт. на длине 100 мм;
- число блоков должно быть не более 5 шт., с разориентацией границ менее 8° .

Наличие блочной структуры [6, 9] и механическая обработка поверхности [3] требуют специальной термической обработки для снижения имеющихся напряжений на поверхности и в стенке монокристаллической трубы. На рис. 2 и 3 приведены температурно-временные зависимости напряжений от режимов отжига сапфировых труб.

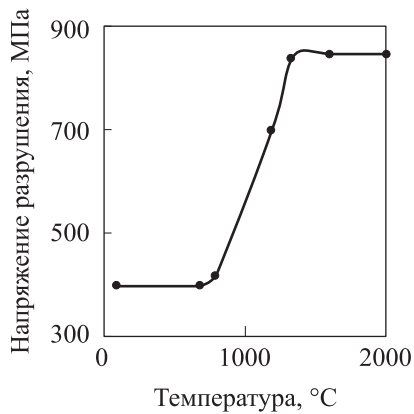


Рис. 2. Зависимость предельных напряжений от температуры отжига в монокристалле сапфира

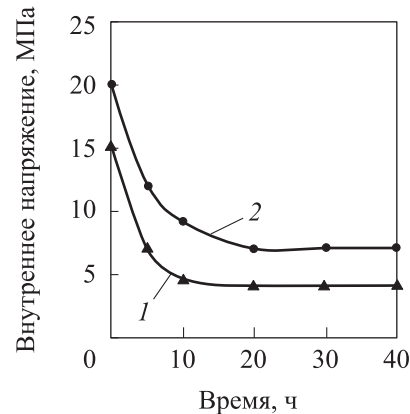


Рис. 3. Зависимость внутренних напряжений сапфировых труб от времени отжига при температурах 1850°C (1) и 2000°C (2)

Из приведенных данных следует, что при повышении температуры термообработки (см. рис. 2) механическая прочность сапфировых труб увеличивается благодаря снижению внутренних напряжений. Установлено, что значительное уменьшение внутренних напряжений происходит в первые часы (см. рис. 3), поэтому высокотемпературный отжиг более 10 ч не дает дальнейшего снижения плотности дислокаций и уменьшения протяженности длины границ блоков [3, 4].

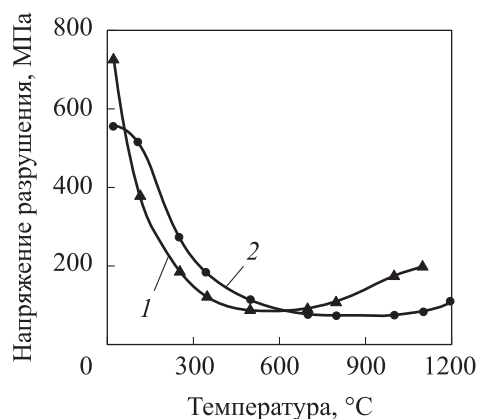
Таким образом, перед проведением отжига необходимо провести контроль блочности и проверить наличие внутренних напряжений в сапфире по методикам работы [10].

Расчет толщины стенок цилиндрических спаев металлов с сапфиром. Кратко приведем рекомендации по выбору конструктивных разме-

ров соединяемых пайкой деталей. Методика расчета термических напряжений в спаях широко известна и подробно рассмотрена в работе [11]. Она позволяет в ходе конструирования спая при задании одного радиуса, например радиуса разрядного канала газоразрядной лампы (см. рис. 1), определить остальные значения диаметра колпачка 5 и наружный диаметр сапфировой трубы 1, которые обеспечат безопасные напряжения в соединении. Для окончательного решения этой задачи не хватает только данных по прочности сапфировой трубы при различных рабочих температурах оболочки в области спая.

Полученная зависимость механической прочности профилированных монокристаллов сапфира от рабочей температуры приведена на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость напряжения разрушения от рабочей температуры сапфировой трубы, выращенной по кристаллографическим направлениям:
1 — [0001]; 2 — [1012]



Используемая методика испытаний на радиальное давление подробно рассмотрена в работе [12]. Суть примененного способа заключается в нагружении внутренней поверхности стенок продольным давлением на пластическую среду, расположенную внутри трубы. Отметим, что предельные напряжения прочности сапфировой трубы в рабочем диапазоне спаев сафир–ковар и сафир–ниобий составляют 100 МПа. Данное значение необходимо использовать при расчете толщин стенок соединяемого металла и сапфира по приведенной ранее методике.

Технология получения цилиндрических охватываемых спаев сафир–ниобий, устойчивых к парам щелочных металлов. Надежность цилиндрического спая сафир–ниобий (см. рис. 4) определяется точностью обеспечения зазора в зоне сопряжения ниобиевого колпачка, герметично соединенного с электродом 2, и сапфировой трубы 1 [13]. Для этих целей в области будущего спая выполняется механическое шлифование на глубину Δ , устраняющее огранку внутренней поверхности сапфировой трубы [7].

Токоввод в сапфировую разрядную лампу (рис. 5) герметизируется расплавом стеклокерамического припоя 4. Задача выбора состава при-

поя, который бы удовлетворял по физико-химическим свойствам (температурное расширение, малые термоупругие напряжения, устойчивость к воздействию плазмообразующей среды и др.), предъявляемым к соединениям металлов с трубами из поликристаллического оксида алюминия (поликора), успешно решена в производстве натриевых ламп высокого давления (НЛВД). По результатам теоретических исследований из всего многообразия применяемых в НЛВД стеклокерамических припоев (цементов) в качестве герметизирующего материала выбрана система на основе Al_2O_3-CaO с добавлением оксидов MgO и BaO . Механизм взаимодействия компонентов указанного цемента с оксидом алюминия подробно рассмотрен в работе [14].

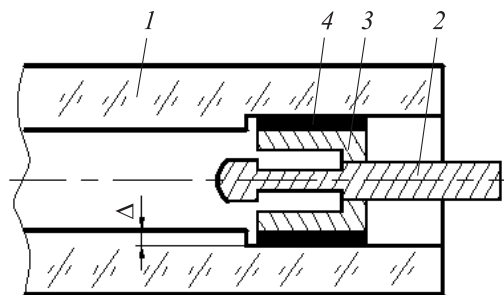


Рис. 5. Конструктивное исполнение токоввода в сапфировую разрядную лампу:

- 1 — разрядная сапфировая труба; 2 — электрод; 3 — герметизирующий элемент;
4 — стеклокерамический припой; Δ — глубина подшлифовки сапфировой трубы

Более важным является изучение вопроса повышения смачиваемости поверхности ниобиевой детали и образование прочного герметичного спая со стеклокерамическим припоем. Выбор ниобия в качестве материала колпачкового спая с сапфиром обусловлен его химической стойкостью к агрессивному воздействию паров щелочных металлов и практически идеальным совпадением коэффициентов линейного термического расширения ниобия и сапфира. В результате анализа, выполненного по разработанной в [15] термодинамической методике оценки возможности взаимодействия материалов спая, доказана необходимость введения в состав ниобия небольшой присадки Zr (рис. 6), которая повышает реакционную способность образовавшегося сплава типа НбЦ (НбЦУ), содержащего ~ 1 % циркония.

Из физической химии известно, что протекание химического процесса в определенном направлении оценивается по знаку и величине свободной энергии Гиббса возможной реакции. Реакция слева направо воз-

можно в том случае, если изменение свободной энергии в направлении реакции является отрицательной величиной. Одновременно, абсолютная величина свободной энергии характеризует прочность связи соединения, получаемого в результате реакции.

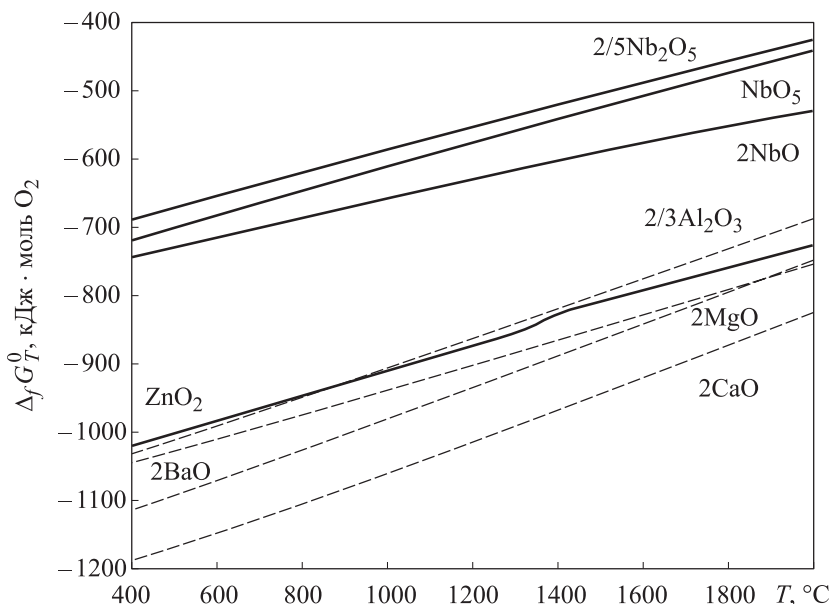
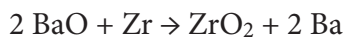
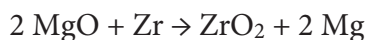
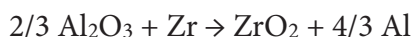


Рис. 6. Зависимость энергии Гиббса ($\Delta_f G_T^0$) от температуры для компонентов спая сапфир–ниобий: стеклокерамический припой (штриховые); оксиды НбЦУ (сплошные)

Из рис. 6 следует, что при температуре до 1200 °С добавленный цирконий может вступать с сапфиром в обеспечивающие надежный спай реакции:



По методике Симагоки экспериментально установлено, что дополнительное введение добавки циркония позволяет снизить на 10° значение краевого угла θ смачивания расплавом стеклокерамического припоя системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO--BaO}$ поверхности ниобия ($\theta_{\text{НбЦУ}} = 47^\circ$). Таким образом, указанный состав стеклоцемента пригоден для реализации соединения ниобия с сапфиром (СНС).

Технологические режимы пайки и состав стеклокерамического припоя выбирали с учетом результатов выполненных исследований физико-

химических процессов при тепловом нагреве вплоть до температуры расплавления цемента. Показано, что в ходе повышения температуры до 1600 °С в ниобии наблюдаются процессы рекристаллизации, приводящие к росту зерна до размеров, соизмеримых с толщиной стенки элемента 3 (см. рис. 5) из ниобия. В то же время введение в состав сплава до 1 % примеси циркония снижает миграцию зерен, что при нагреве до 1800 °С позволяет сохранить герметичность образца. Одновременно в стеклокерамическом припое 4 при нагреве до 1380 °С наблюдается гомогенизация состава, у которого при 1480 °С начинается формирование кристаллических зон, что повышает напряжение в спае.

В результате на основании проведенных исследований сделан вывод о перспективности использования в СНС ниобия с незначительной (до 1 %) присадкой циркония и стеклокерамического припоя в следующих весовых соотношениях $MgO : Al_2O_3 : CaO = 6 : 49 : 45$. Пайку рекомендуется проводить при температуре до 1380 °С в целях исключения роста кристаллических фаз в цементе.

Технология получения цилиндрических охватывающих спаев сапфир–ковар, устойчивых к внешним атмосферным воздействиям.

На рис. 7 приведен конусный спай сапфир–ковар [16], внедренный в серийное производство импульсных источников ИК-излучения с разрядом в парах цезия [1, 2].

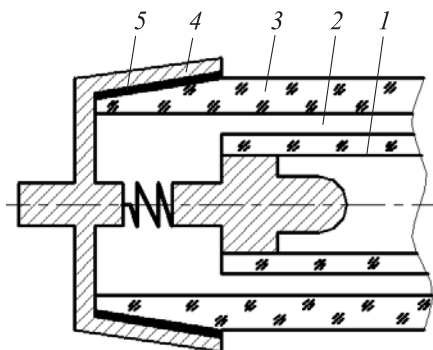


Рис. 7. Конструкция конусного спаивания сапфир–ковар [16]

Особенностью предлагаемой конструкции (см. рис. 7) применительно к рассматриваемому спаю является заполненный неоном зазор 2 между разрядной трубкой 1 и внешней колбой 3. Учитывая проникающую способность неона, к соединению коварового колпачка 4 с сапфировой трубкой 3 посредством расплава припоя 5 предъявляются

повышенные требования. Для реализации данного конструктивного решения [16] применен модернизированный метод активной пайки [17].

Данный метод пайки предполагает использование в качестве элементов, взаимодействующих с сапфиром, активных металлов, например титана или циркония. Предложен способ последовательного магнетронного напыления в зону спаивания слоя титана, а затем медного покрытия. В ходе традиционной пайки металлизированной поверхности [17] медным

припоем по мере повышения температуры, начиная с 700 °С, происходит взаимодействие титана с сапфиром, а после достижения температуры 1100 °С расплав припоя заполняет зазор между коваровым колпачком и металлизированной поверхностью.

В результате проведенного термодинамического анализа в диапазоне температур 25...1100 °С по методике [15] выявлено, что энергия Гиббса имеет положительное значение для всех возможных видов химического взаимодействия, поэтому самопроизвольное протекание реакций между титаном и оксидом алюминия исключено. Подробно механизмы активной пайки алюмооксидной керамики и, как частного случая, сапфира рассмотрены в [17–20]. Установлено, что продукты взаимодействия титана с оксидом алюминия независимо от соотношения исходных компонентов и температуры пайки представляют собой твердые растворы кислорода и алюминия в титане. Во избежание образования интерметаллидов титана, повышающих микротвердость и снижающих механическую прочность спая сапфир–ковар, в [17–20] рекомендовано обеспечить температуру пайки менее 1200 °С.

Надежность разработанных спаев. Приведенные на рис. 8 образцы спаев широко используются в различных сферах — от выходных окон оптических систем до специальных газоразрядных источников ИК-излучения с двумя сапфировыми оболочками [1, 2].



Рис. 8. Конструктивное исполнение спаев сапфир–ниобий (*а*) и сапфир–ковар (*б*), используемых в серийных изделиях [1, 2]

Поскольку разработанные соединения подвергаются влиянию множества теплофизических процессов, происходящих в разряде, сапфире и пространстве между двумя оболочками (см. рис. 1), надежность спаев исследовалась непосредственно в газоразрядной лампе при испытаниях на воздействие многократных ударов с пиковым ускорением 400 м/с², синусоидальной вибрации в интервале частот 100...2000 Гц, циклического изменения температуры в диапазоне от –60...80 °С и др. Испытания

газоразрядных ламп с разработанными спаями на устойчивость к указанным воздействующим факторам дали положительные результаты и подтвердили работоспособность импульсного источника ИК-излучения в течение 250 ч с числом включений изделия не менее 50.

Заключение. Приведены результаты исследований, направленные на создание цилиндрических вакуумно-плотных соединений сапфира с ниобием и коваром. Для обеспечения надежности создаваемого соединения рекомендуется следующая последовательность контрольно-технологических процессов:

- после выращивания сапфировой трубы по методу Степанова провести контроль образца на наличие дефектов: блоков, пузырей, внутренних напряжений и др.;
- выполнить механическую обработку (шлифование и полирование) внутренней и наружной поверхностей сапфировой трубы в целях снижения поверхностных дефектов и придания поверхности в зоне спаев требуемого класса чистоты;
- провести высокотемпературный отжиг сапфировых образцов для уменьшения внутренних напряжений на поверхности и в стенке сапфировой трубы;
- рассчитать толщины соединяемых деталей в целях обеспечения минимума термоупругих напряжений, приводящих к разрушению спаев;
- изготовить стеклокерамический припой или нанести титано-медное покрытие требуемого состава, обеспечивающее герметичность спаев при изготовлении и в процессе эксплуатации;
- выполнить сборку и пайку соединения сапфира с указанными металлами в рекомендованных режимах;
- провести механические и климатические испытания изготовленных спаев.

Авторы выражают надежду, что приведенные результаты многолетней работы будут полезны разработчикам устройств, использующих уникальный материал — синтетический сапфир.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гавриш С.В., Кобзарь А.И. Импульсный газовый разряд как источник оптической помехи в инфракрасной области спектра. *Электронные информационные системы*, 2019, № 2, с. 43–60.
- [2] Гавриш С.В., Гайдуков Е.Н., Константинов Б.А. и др. Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей. *Светотехника*, 1998, № 3, с. 22–24.

- [3] Добровинская Е.Р., Литвинов Л.А., Пищик В.В. Энциклопедия сапфира. Харьков, Институт монокристаллов, 2004.
- [4] Регель В.Р., Никаноров С.П., ред. Получение профилированных монокристаллов и изделий методом Степанова. Л., Наука, 1981.
- [5] Vasil'ev M.G., Bakholdin S.I., Krymov V.M. Study of instability of sapphire tubes growth by Stepanov method. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1697, art. 012084. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012084>
- [6] Krymov V.M., Nosov Yu.G., Bakholdin S.I., et al. Blocks and residual stresses in shaped sapphire single crystals. *J. Cryst. Growth*, 2017, vol. 457, pp. 314–319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.08.017>
- [7] Носов Ю.Г., Бахолдин С.И., Крымов В.М. Ограничение кристаллов сапфира, выращиваемых из расплава способом Степанова. *ЖТФ*, 2009, т. 79, № 2, с. 76–82.
- [8] Gavrish S.V. Dependence of the reliability of discharge radiation sources on the structural perfection of sapphire envelopes. *Russ. J. Nondestruct. Test.*, 2010, vol. 46, no. 12, pp. 911–917. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830910120077>
- [9] Гавриш С.В. Технология выращивания и характеристики профилированных сапфировых труб для оболочек разрядных ламп. *Технология машиностроения*, 2008, № 6, с. 56–61.
- [10] Пучнина С.В. Влияние свойств сапфира на надежность его цилиндрических спаев в приборах плазменной электроники. *Сварочное производство*, 2021, № 8, с. 40–45.
- [11] Любимов М.Л. Спаи металла со стеклом. М., Энергия, 1968.
- [12] Браиловский В.Б., Гайдуков Е.Н., Макарова Т.В. и др. Механическая прочность безблочных профилированных монокристаллов корунда. *Электронная техника. Сер. Материалы*, 1991, № 1, с. 53–55.
- [13] Гавриш С.В., Пучнина С.В., Сурдо А.В. и др. Разрядная лампа с цезиевым наполнением. Патент РФ 134699. Заявл. 11.07.2013, опубл. 20.11.2013.
- [14] Тахчиев С., Самунева Б., Джамбазин П. и др. Керамические припои для горелок натриевых ламп высокого давления. *Стекло и керамика*, 1990, № 12, с. 25–26.
- [15] Пучнина С.В. Алгоритм термодинамического анализа при конструировании спаев сапфира с металлами в устройствах плазменной электроники. *Успехи прикладной физики*, 2021, т. 9, № 1, с. 18–24.
- [16] Гавриш С.В., Кобзарь А.И., Логинов В.В. и др. Цезиевая лампа с двумя лейко-сапфировыми оболочками. Патент РФ 109918. Заявл. 31.05.2011, опубл. 27.10.2011.
- [17] Батыгин В.Н., Метелкин И.И., Решетников А.М. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. М., Энергия, 1973.
- [18] Gavrish S.V., Loginov V.V., Puchnina S.V. Technology for producing permanent joints between sapphire and metals. *Weld. Int.*, 2015, vol. 29, no. 1, pp. 78–80. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.888196>

[19] Жмудь Е.С., Шмелев А.Е. Исследование механизма активной пайки металла с керамикой с помощью рентгеноструктурного анализа. Влияние длительности спекания и повторных спеканий на взаимодействие титана с окисью алюминия. *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*, 1970, № 8, с. 102–112.

[20] Жмудь Е.С., Шмелев А.Е., Метелкин И.И. Исследование взаимодействия титана с высокоглиноземистой керамикой. *Неорганические материалы*, 1973, т. 9, № 10, с. 1798–1801.

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

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гавриш С.В., Пучнина С.В. Особенности конструкции и технологии цилиндрических спаев сапфира с металлами, применяемых в газоразрядных лампах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 2 (139), с. 96–111. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-2-96-111>

**FEATURES OF THE DESIGN AND TECHNOLOGY
OF CYLINDRICAL SAPPHIRE SOLDERING WITH METALS
USED IN GAS-DISCHARGE LAMPS**

S.V. Gavrish

svgavr@list.ru

S.V. Puchnina

svetlanapuchnina@mail.ru

LLC “SPE “Melitta”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the design and technology features of cylindrical soldering of sapphire (corundum) with niobium and kovar alloy (alloy 29NK), developed for use in flash lamps with a discharge in alkali metal vapors. The performance of a gas-discharge lamp is analyzed and the basic requirements for the junctions are determined. The main types of defects determining the optical transparency and mechanical strength of a corundum monocrystal grown by directional crystallization the Stepanov method are shown, and the main requirements for a profiled sapphire tube

Keywords

Sapphire tube, niobium, kovar, solder joint, gas-discharge lamp, glass-ceramic solder, active soldering

are formulated. The results of internal stresses reduction studies during heat treatment of a corundum pipe before soldering are presented. The special attention is paid to the study of physicochemical phenomena occurring in the process of soldering sapphire with niobium using glass-ceramic solder and with kovar copper. It is proved that for the soldering corundum with niobium it is necessary to introduce up to 1 % zirconium impurity into the metal structure, which allows reducing the recrystallization of the alloy and decreasing the migration rate of the formed grains. In the case of active soldering sapphire with kovar, the importance of observing the recommended temperature regimes for melting solder to prevent the formation of titanium intermetallic compounds is shown. The main design solutions of sapphire soldered joints and the results of their tests for resistance to mechanical and climatic factors are given

Received 10.01.2022

Accepted 23.02.2022

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Gavrish S.V., Kobzar' A.I. Pulsed gas discharge as a source of optical interference in infra-red region. *Elektronnyye informatsionnye sistemy* [Electronic Information Systems], 2019, no. 2, pp. 43–60 (in Russ.).
- [2] Gavrish S.V., Gaydukov E.N., Konstantinov B.A., et al. Discharge source of IR radiation for special applications. *Svetotekhnika*, 1998, no. 3, pp. 22–24 (in Russ.).
- [3] Dobrovinskaya E.R., Litvinov L.A., Pishchik V.V. Entsiklopediya sapfira [Encyclopedia of sapphire]. Khar'kov, Institut monokristallov Publ., 2004.
- [4] Regel' V.R., Nikanorov S.P., eds. Poluchenie profilirovannykh monokristallov i izdeliy metodom Stepanova [Producing profiled monocrystals and products by Stepanov method]. Leningrad, Nauka Publ., 1981.
- [5] Vasil'ev M.G., Bakhholdin S.I., Krymov V.M. Study of instability of sapphire tubes growth by Stepanov method. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1697, art. 012084. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012084>
- [6] Krymov V.M., Nosov Yu.G., Bakhholdin S.I., et al. Blocks and residual stresses in shaped sapphire single crystals. *J. Cryst. Growth*, 2017, vol. 457, pp. 314–319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.08.017>
- [7] Nosov Yu.G., Bakhholdin S.I., Krymov V.M. Faceting of sapphire crystals grown from a melt by the Stepanov method. *Tech. Phys.*, 2009, vol. 54, no. 2, pp. 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784209020133>
- [8] Gavrish S.V. Dependence of the reliability of discharge radiation sources on the structural perfection of sapphire envelopes. *Russ. J. Nondestruct. Test.*, 2010, vol. 46, no. 12, pp. 911–917. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830910120077>

- [9] Gavrish S.V. Growing process and characteristic of the profiled sapphire pipes for the discharge lamps casing. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2008, no. 6, pp. 56–61 (in Russ.).
- [10] Puchnina S.V. Influence of the properties of sapphire on the reliability of its cylindrical junctions in plasma electronics devices. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2021, no. 8, pp. 40–45 (in Russ.).
- [11] Lyubimov M.L. Spai metalla so steklom [Glass-to-metal seal]. Moscow, Energiya Publ., 1968.
- [12] Brailovskiy V.B., Gaydukov E.N., Makarova T.V., et al. Mechanical strength of non-mosaic profiled crystals of corundum. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Materialy*, 1991, no. 1, pp. 53–55 (in Russ.).
- [13] Gavrish S.V., Puchnina S.V., Surdo A.V., et al. Razryadnaya lampa s tseziovym napolneniem [Discharge lamp with cesium filling]. Patent RU 134699. Appl. 11.07.2013, publ. 20.11.2013 (in Russ.).
- [14] Takhchiev S., Samuneva B., Dzhambazin P., et al. Ceramic seals for sodium burners of high-pressure sodium lamps. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 1990, no. 12, pp. 25–26 (in Russ.).
- [15] Puchnina S.V. The thermodynamical analysis algorithm at sapphire-metal soldering design in plasma electronics devices. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2021, vol. 9, no. 1, pp. 18–24 (in Russ.).
- [16] Gavrish S.V., Kobzar' A.I., Loginov V.V., et al. Tseziovaya lampa s dvumya leykosapfirovymi obolochkami [Cesium lamp with two leucosapphire shells]. Patent RU 109918. Appl. 31.05.2011, publ. 27.10.2011 (in Russ.).
- [17] Batygin V.N., Metelkin I.I., Reshetnikov A.M. Vakuumno-plotnaya keramika i ee spai s metallami [Vacuum-tight ceramics and its seals with metals]. Moscow, Energiya Publ., 1973.
- [18] Gavrish S.V., Loginov V.V., Puchnina S.V. Technology for producing permanent joints between sapphire and metals. *Weld. Int.*, 2015, vol. 29, no. 1, pp. 78–80.
DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.888196>
- [19] Zhmud' E.S., Shmelev A.E. Study on active seal mechanism of metal with ceramics using X-ray structure analysis. Effect of sintering time and repeated sintering on interaction between titanium and aluminum oxide. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektronika SVCh*, 1970, no. 8, pp. 102–112 (in Russ.).
- [20] Zhmud' E.S., Shmelev A.E., Metelkin I.I. Study on interaction between titanium and high-aluminous ceramics. *Neorganicheskie materialy*, 1973, vol. 9, no. 10, pp. 1798–1801 (in Russ.).

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).

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

Please cite this article in English as:

Gavrish S.V., Puchnina S.V. Features of the design and technology of cylindrical sapphire soldering with metals used in gas-discharge lamps. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 2 (139), pp. 96–111 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-2-96-111>