

УДК 621.327.7: 621.791.3

## СПАИ САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧЕК С МЕТАЛЛАМИ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМПАХ

Гавриш С.В., Пучнина С.В., Ушаков Р.М.

ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»

Москва, Зеленоград, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе рассмотрены основы конструирования вакуумноплотных цилиндрических спаев сапфира, выращенного по методу А.В. Степанова, с ниобием и коваром (сплавом 29НК). Подробно описаны технические требования к спаям, даны рекомендации по подготовке монокристаллической трубы к пайке, обоснованы выбор материалов каждого из соединений и температурные режимы пайки. Выявлены основные механизмы взаимодействия материалов в процессе нагрева и даны рекомендации по использованию в изделиях плазменной электроники.

**Ключевые слова:** сапфир, спай, стеклокерамический припой, металлизация, активный металл.

## JUNCTIONS OF SAPPHIRE SHELLS WITH METALS IN GAS-DISCHARGE LAMPS

Gavrish S., Puchnina S., Ushakov R.

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd,

Moscow, Zelenograd, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers the basics of designing vacuum-dense cylindrical junctions of sapphire grown by the method of A.V. Stepanov with niobium and kovar (alloy 29NC). The technical requirements for the solders are described in detail, recommendations are given on the preparation of a single-crystal pipe for soldering, the choice of materials for each of the joints and the temperature conditions of soldering are justified. The main mechanisms of interaction of materials in the heating process are revealed and recommendations on the use of plasma electronics in products are given.

**Keywords:** sapphire, solder, glass-ceramic solder, metallization, active metal.

Адрес для переписки: Гавриш С.В., ул. Миклухо-Маклая, 16/10, Москва 117997, Российская Федерация  
e-mail: svgavr@list.ru

**Актуальность работы.** На сегодняшний день цилиндрические соединения сапфира (корунда) с металлами получили промышленную реализацию в конструктивном исполнении импульсных источников излучения (газоразрядных ламп) с двумя оболочками [1]. Импульсная лампа представляет собой цилиндрическую разрядную сапфировую трубку с парами щелочных металлов, которая коаксиально размещена в наружной термостатирующей цилиндрической корундовой оболочке (колбе), заполненной газом-теплоносителем. В описанной конструкции газоразрядной лампы плазма формируется между электродными узлами, материал и конструкция которых должны обеспечивать химическую стойкость к агрессивному воздействию паров щелочных металлов и герметичность соединения (спая, гермоввода, токового ввода) с сапфировой трубкой при рабочих температурах до 700 °С. Токовые вводы во внешнюю колбу должны сохранять герметичность соединения при рабочих температурах до 400 °С в условиях механических и климатических воздействий, флуктуации температуры охлаждающего потока воздуха от минус 60°С до плюс 80 °С. Такие условия эксплуатации газоразрядной лампы приводят к высоким продольным и поперечным градиентам температуры в стенке трубки и, как следствие, термоупругим напряжениям в корундовых оболочках и соединениях металла с сапфиром.

В настоящее время разработаны и освоены в производстве спаи сапфира с металлами, обладающие термостойкостью и герметичностью в указанных условиях эксплуатации. (рис. 1). Ниже кратко приведены основные результаты исследований, позволившие добиться высокой надежности соединений сапфира с металлами.



Рисунок 1 – Фото цилиндрических спаев сапфира с ниобием и коваром

**Общие сведения о подготовке сапфира к пайке.** Наиболее распространенным и сравнительно дешевым способом получения сапфировой трубы является метод направленной кристаллизации, разработанный А.В. Степановым. При этом выращенный монокристалл обладает несколькими видами дефектов, которые подробно рассмотрены в [2]. Поэтому входной контроль перед

пайкой по описанным в [3] методикам должен исключить отклонение геометрической оси от кристаллографического направления  $[000\bar{1}]$  более чем на  $10^\circ$ , наличие более 5 блоков в поперечном сечении стенки, разориентацию соседних блоков на угол более  $15^\circ$ , термоупругие напряжения выше значений 200 МПа, присутствие непрозрачных дефектов, пузырей, ростовых сдвигов [2]. Частично перечисленные дефекты устраняются механической обработкой сапфира (шлифовка и полировка) и высокотемпературным ожогом при температуре около  $1800^\circ\text{C}$  [2–3].

**Спай сапфира с ниобием.** Данное соединение сапфира устойчиво в условиях воздействия паров щелочных металлов и других агрессивных сред. По разработанному нами алгоритму термодинамического анализа были рассчитаны температурные зависимости энергии Гиббса оксидов металлов, участвующих в образовании спая. В результате установлено, что в качестве основного металла необходимо использовать ниобий с присадкой циркония (до 1,2 вес.%), а для герметизирующего припоя пригодна система на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO}$  с добавлением окислов  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ .

При определении температуры пайки нами сделаны следующие заключения:

- температура плавления припоя определяется соотношением компонентов  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO}$ ;

- при нагреве ниобия в металле происходят процессы рекристаллизации, приводящие к миграции образовавшихся зерен вплоть до нарушения герметичности тонкостенной детали.

Таким образом, необходимо определить такое соотношение  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO}$ , чтобы при расплавлении припоя свести к минимуму рекристаллизацию ниобия. Нами установлено, что введение в состав сплава примеси циркония, при нагреве снижает миграцию зерен вплоть до температуры  $1800^\circ\text{C}$ . При этом в стеклокерамическом припое при нагреве до  $1380^\circ\text{C}$  наблюдается гомогенизация состава, а при  $1480^\circ\text{C}$  начинается формирование кристаллических зон, что повышает напряжение в спае. Поэтому в итоге наших исследований выбран состав стеклоцемента в следующих весовых соотношениях  $\text{MgO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaO}=6:49:45$  с температурой пайки  $1440^\circ\text{C}$ .

Важным фактором получения надежности спая является устранение огранки внутренней поверхности сапфировой трубы путем механической шлифовки на определенные глубину по диаметру и расстояние от торцевой поверхности, где наблюдается скопление механических дефектов (сколы, микротрещины и т.д.)

**Спай сапфир – ковар (сплав 29 НК).** В настоящее время широкое распространение получили две технологии спаивания металлов с сапфиром, а

именно, применение для пайки активных металлов (титан, цирконий) или металлизационных покрытий на основе молибдено-марганцевых или вольфрамовых паст. Перечисленные методы обладают рядом недостатков и сложностью технологии для промышленного производства [4]. Поэтому нами предложено техническое решение, основанное на комбинации указанных технологий [4]. Суть разработанного метода спаивания заключается в нанесении магнетронным напылением на поверхность сапфира последовательно активного металла (титана) от одного магнетрона с последующим напылением смеси меди с титаном при работе двух магнетронов. Дальнейшая пайка с коваром производится по нанесенной металлизации расплавлением припоя в виде медной фольги. Надежность предложенного способа обусловлена следующими процессами, происходящими в спае:

- при температуре  $1000^\circ\text{C}$  происходит взаимодействие слоя титана с сапфиром и расплавление смеси медь-титан, которая активизирует реакции взаимодействия титана с сапфиром и обеспечивает надежное смачивание основного медного припоя;

- при температуре  $1125^\circ\text{C}$  происходит расплавление основного припоя и взаимодействие с коваром и расплавом металлизации.

Микрорентгеновский анализ распределения интенсивности  $K_\alpha$  линий титана и меди позволил нам выявить наличие в спае интерметаллидов, образующихся при температурах выше  $1200^\circ\text{C}$ , что в итоге явилось температурным ограничением разработанной технологии.

В заключении необходимо отметить, что разработанные технологии были успешно опробованы для спаев перечисленных металлов с сапфировыми пластинами, штабиками, сложными корундовыми профилями.

#### Литература

1. Гавриш, С. В. Импульсные газоразрядные источники ИК излучения для оптико – электронных систем / С. В. Гавриш, В. В. Логинов, С. В. Пучнина // Успехи прикладной физики. – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 333–348.
2. Браиловский, В. Б. Дефекты структуры и диагностика характеристик труб из профилированных монокристаллов корунда для оболочек импульсных разрядных ламп ИК излучения / В. Б. Браиловский, С. В. Гавриш, А. Е. Рыжков // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 2. – С. 49–59.
3. Пучнина, С. В. Влияние свойств сапфира на надежность его цилиндрических спаев в приборах плазменной электроники / С. В. Пучнина // Сварочное производство. – 2021. – № 8. – С. 40–45.
2. Gavrish, S. V. Technology for producing permanent joints between sapphire and metals / S. V. Gavrish, V. V. Loguinov, S. V. Puchnina // Welding International. – 2015. – Vol. 29, № 1. – P. 78–80.