

---

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

---

УДК 621.327.7:621.791.3

# СПЕЦИФИКА ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИНОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП

© 2025 г. С. В. Гавриш<sup>a</sup> \*, А. О. Потапенко<sup>a</sup>, С. В. Пучнина<sup>a</sup>, П. А. Чиликина<sup>a</sup>

<sup>a</sup>ООО “Научно-производственное предприятие “Мелитта”, Москва, 117997 Россия

\*E-mail: svgavr@list.ru

Поступила в редакцию 10.05.2024 г.

После доработки 10.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Данная работа посвящена особенностям конструирования сильноточных газоразрядных ламп с применением в качестве перспективных материалов разрядной оболочки кварцевого стекла и монокристаллического сапфира, рассмотрена технология получения герметичных соединений с использованием магнетронного нанесения металлизированных слоев титана с последующей пайкой. Проведен термодинамический анализ возможности протекания химических реакций на границе титан – материал оболочки, посредством математической модели изучен механизм получения однородных слоев металлизации, описана специфика индукционной пайки кварцевого стекла с коваром припоями на основе олова и получения соединения сапфир – сплав 29НК в вакуумных печах.

**Ключевые слова:** газоразрядная лампа, кварцевое стекло, сапфир, спай, термодинамический анализ, магнетронное напыление, математическая модель, титановая металлизация, механическая прочность, оптическое пропускание

**DOI:** 10.56304/S2079562924060137

В настоящее время вновь возрос интерес к разработке и практическому использованию импульсных ламп на основе разряда в ксеноне, ограниченного оптически прозрачной оболочкой (разрядной трубкой, колбой). Данная тенденция в научных исследованиях и производстве газоразрядных ламп обусловлена следующими факторами:

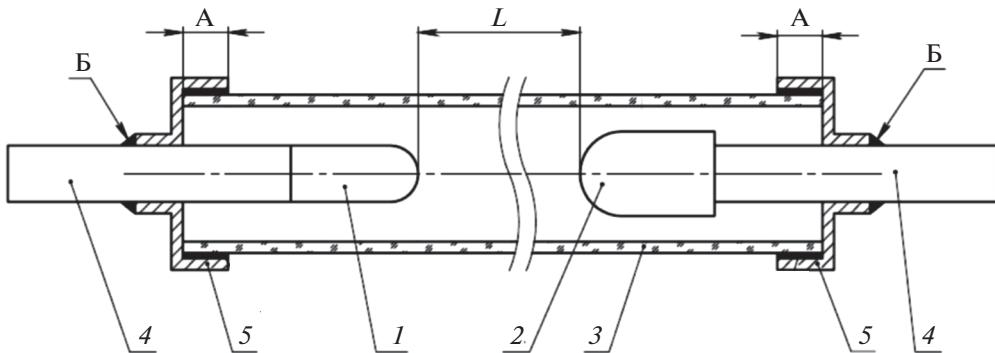
1. *Расширение сферы применения.* Сегодня доказана высокая эффективность импульсного ксенонового разряда как источника УФ излучения в оптико – электронных системах обеззараживания воздуха и поверхностей, приборах контроля чипов в микроэлектронике, специальных устройствах связи и т.д. [1, 2].

2. *Появление перспективных оптических материалов.* В последние годы в качестве материала разрядной трубы (оболочки, колбы) импульсных ламп интенсивно используются прозрачная керамика (поликор), кварцевое стекло, профилированный монокристаллический оксид алюминия (сапфир, корунд), обеспечивающие за счет своих уникальных свойств высокий срок службы источника оптического излучения [2–4].

3. *Становление инновационных технологий.* Внедрение в производство индукционной пайки, магнетронного напыления, лазерной сварки и т.д. позволило повысить надежность и воспроизводимость

эксплуатационных характеристик в процессе изготовления газоразрядных ламп.

В данной работе приводятся результаты исследований, позволяющих объединить все перечисленные достижения в новых конструктивных решениях и технологии импульсных ксеноновых источников УФ-излучения высокого (50–700 мм рт. ст.) и сверхвысокого (1.0–20.0 атм.) давления. Цель описанных в работе экспериментов прежде всего направлена на повышение КПД излучения в спектральном диапазоне 200–300 нм (область биоцидной активности микроорганизмов), что в свою очередь достигается увеличением электрической энергии, вкладываемой в разряд за короткий промежуток времени (20–150 мкс). В таких режимах эксплуатации надежность импульсной лампы в первую очередь зависит от возможности электрических вводов (токоввод, электродных узлов) в разрядный объем сохранять герметичность и проводимость при пиковых значениях тока в несколько десятков килоампер. Получившая сегодня широкое распространение в ламповом производстве России конструкция электродных узлов на основе тонкой (30–50 мкм) молибденовой фольги не удовлетворяет возросшей потребности в увеличении разрядного тока [5]. В результате остро встает вопрос о создании колпачково-



**Рис. 1.** Конструкция импульсной газоразрядной лампы: 1 – катод, 2 – анод, 3 – оболочка, 4 – держатель электрода, 5 – металлический колпачок, А – область металлизации и спая, Б – зона лазерной сварки (пайки), L – разрядный промежуток.

стержневого токовода, гарантированно обеспечивающего требуемую токовую нагрузку при работе импульсной лампы [5], но при этом одновременно возникает задача получения герметичного соединения металлического электродного узла с кварцевой или сапфировой оболочкой.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА И САПФИРА В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА РАЗРЯДНОЙ ОБОЛОЧКИ ЛАМПЫ

Вначале рассмотрим конструктивное исполнение импульсной газоразрядной лампы, рассчитанной на высокие токовые нагрузки (рис. 1).

Основным элементом конструкции рассматриваемого источника оптического излучения является разрядная оболочка 3, которая одновременно выполняет несколько важнейших функций:

- Является конструктивным каркасом газоразрядной лампы, в котором герметично установлены электродные узлы, состоящие из катода 1 (анода 2), держателя 4 и металлического колпачка 5.
- Обеспечивает выход оптического излучения из межэлектродного промежутка  $L$  при импульсном разряде в ксеноне между катодом 1 и анодом 2.
- Изолирует сформированный плазменный канал от воздействия окружающей среды, тем самым обеспечивая стабильность эксплуатационных характеристик газоразрядной лампы.

Перечисленные функции разрядной оболочки существенным образом зависят от физико-химических свойств применяемого материала (сапфира, кварцевого стекла) при высоких рабочих температурах лампы и способности его образовывать герметичное соединение с металлами, используемыми для изготовления колпачка 5. К основным требованиям к материалу колбы при рабочих температурах лампы (до 1000°C) следует

отнести обеспечение высокого коэффициента пропускания (не менее 80%) в требуемом диапазоне длин волн, механической прочности, низкого газовыделения с поверхности разрядной трубы, химической стойкости к компонентам плазмообразующей среды, сохранения электроизоляционных характеристик и т.д. Выполненный анализ литературных источников, например монографий [3, 4], показал, что всем перечисленным требованиям в полной мере удовлетворяют сапфир и кварцевое стекло.

При разработке технологии получения герметичного соединения металлов с разрядной оболочкой из сапфира и кварцевого стекла широко применяются методы активной пайки с предварительной металлизацией титаном или его соединениями [6]. В данной работе нами предлагается использование магнетронного напыления для нанесения в зону А металлического титана (рис. 1). Такой способ позволяет не только гарантировать равномерность сформированного металлического слоя, но и обеспечить воспроизводимость толщины покрытия за счет тщательного контроля параметров работы магнетрона.

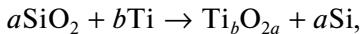
Для оценки перспективы использования металлизированного слоя титана в качестве компонента спая необходимо проанализировать возможность его взаимодействия с материалом оболочки при температуре пайки. Для решения этой задачи мы применили термодинамический анализ по методике, предложенной в работе [7]. В основу этого метода положена оценка величины изобарно-изотермического потенциала (сводной энергии Гиббса)  $\Delta G_T^0$  и константы равновесия  $K_p$  химической реакции типа:

$$aA + bB = cC + dD,$$

где  $A, B$  – исходные вещества, вступающие в реакцию;  $C, D$  – продукты реакции;  $a, b, c, d$  – стехиометрические коэффициенты реакции. В случае

отрицательного значения сводной энергии Гиббса происходит взаимодействие между химическими элементами, а при  $\Delta G_T^0 > 0$  реакция не протекает.

В работе [8] сделано предположение о восстановлении титаном кремния из кварцевого стекла по следующей реакции:



где  $\text{Ti}_b\text{O}_{2a}$  – оксиды титана:  $\text{TiO}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  и  $\text{TiO}_2$ .

Представленные на рис. 2а данные термодинамического анализа показали, что при высоких температурах пайки предложенная в [8] реакция энергетически выгодна, так как значения свободной энергии Гиббса для всех образующихся оксидов титана отрицательны и находятся под аналогичной кривой, построенной для  $\text{SiO}_2$ .

Таким образом, из рис. 2а следует, что при пайке кварцевого стекла с использованием слоя титановой металлизации будет обеспечиваться прочность и герметичность спая за счет образования оксидов титана, в то время как (рис. 2б) в случае сапфира такого явления наблюдаться не будет.

Для всех возможных химических реакций титана с оксидом алюминия изобарно-изотермический потенциал имеет положительную величину. По этой причине можно сделать заключение, что широко применяемая активная пайка с использованием титана [6] основана на других механизмах взаимодействия материалов спая. В частности, в работе [9] сделано наиболее достоверное предположение, что формирование прочной связи металлизированного титанового покрытия с сапфиром обусловлено образованием твердых растворов кислорода и алюминия в титане, а также с появлением интерметаллида титана  $\text{TiAl}$ . Обобщенный анализ всех перечисленных механизмов приведен в работах [6, 9]. В итоге можно сделать заключение, что имеется принципиальная возможность получить надежный спай металла с сапфиром или кварцевым стеклом посредством использования слоя титановой металлизации, но требуется детальная проработка конструкции соединения, технологических режимов нанесения покрытия и пайки.

### ОСОБЕННОСТИ ГРУППОВОГО МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ОБОЛОЧКИ

Исторически установки магнетронного напыления разрабатывались для нанесения металлизированных покрытий на плоские поверхности полупроводниковых материалов в микроэлектронике. Для получения равномерного сплошного покрытия на строго фиксированном участке разрядной трубы необходимо решить несколько задач:

- Модернизировать существующие магнетронные установки, укомплектовав планетарным ме-

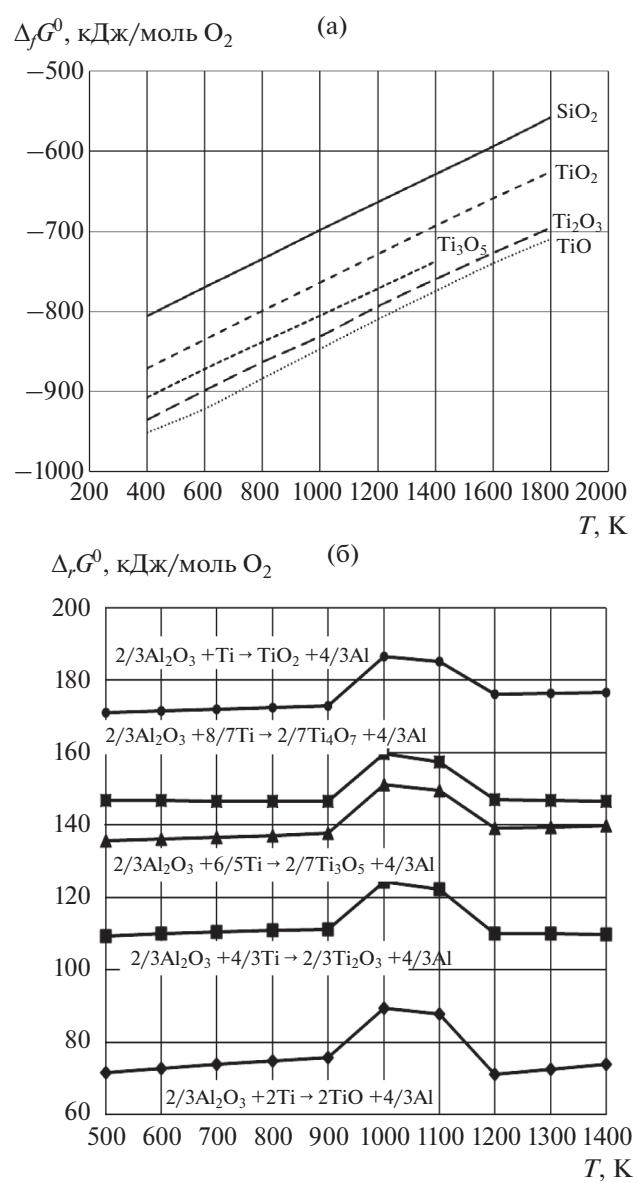
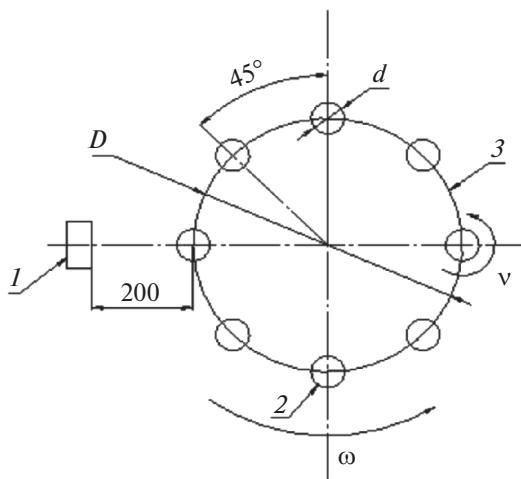


Рис. 2. Температурная зависимость изобарно-изотермического потенциала реакций восстановления оксидов кремния (а) и алюминия (б) титаном. Расчет проводился на один моль кислорода.

нимом, обеспечивающим вращение нескольких образцов вокруг своей оси с последовательной доставкой их в зону плазменного потока от магнетрона (рис. 3) за счет оборота барабана (карусели) 3, на котором по периферии установлены оболочки 2.

- Определить соотношения угловых скоростей карабусели и образца (рис. 3) с целью достижения равномерной толщины слоя металлизации.

Первая задача решается конструированием карабусели после выполнения расчетных исследований, устанавливающих взаимосвязь угловых скоростей



**Рис. 3.** Блок-схема установки магнетронного напыления: 1 – мишень магнетрона, 2 – цилиндрическая оболочка, 3 – карусель,  $v$  – скорость вращения образца,  $\omega$  – скорость поворота карусели,  $D$  и  $d$  – диаметр карусели и образца соответственно.

вращения образца и карусели для получения равномерного по толщине покрытия. Исследования осложняются еще тем, что при круговых вращениях оболочки и барабана часто возникает ситуация, когда образцы затеняют друг друга относительно направленного потока напыляемых частиц.

Для решения второй задачи при конструировании планетарного механизма нами использована математическая модель магнетронного напыления слоев металлов на цилиндрическую поверхность вращающейся оболочки, подробно рассмотренная в работах [10, 11]. При формировании системы уравнений использовались три основных процесса: распыление материала мишени (рис. 3), перенос металлов сквозь тлеющий разряд и намагниченную плазму магнетрона 1 и конденсация на поверхности образца 2. Вопросы формирования плазмы и переноса вещества на напыляемую поверхность частично рассмотрены в научных публикациях, например [12], поэтому в настоящей работе основное внимание будет сосредоточено на формировании равномерного слоя металла на поверхности колбы лампы. В качестве критерия нами использована величина неравномерности  $\beta$ , подразумевающая отношение максимальной толщины пленки к ее минимальному значению по всей длине окружности зоны напыления.

В разработанной модели предполагается, что механизм переноса вещества является прямолинейным, поэтому скорость напыления покрытия однозначно определяется интенсивностью распыления мишени [10, 11]. В разработанной системе уравнений изучалось перемещение точки, зафиксированной на цилиндрической поверхности трубы, которая вращалась вокруг своей оси со скоро-

стью  $v$  и одновременно осуществляла круговое движение совместно с барабаном со скоростью  $\omega$  (рис. 3). В качестве исходных параметров численного эксперимента использовались размеры прямоугольной мишени высотой 255 мм и шириной 115 мм, диаметры образца 20 мм и барабана 200 мм, время нанесения покрытия составляло 10 мин. Подробно с описанием математической модели и алгоритмом ее реализации можно ознакомиться в работе [11]. Ниже приведены некоторые важные результаты выполненного численного эксперимента.

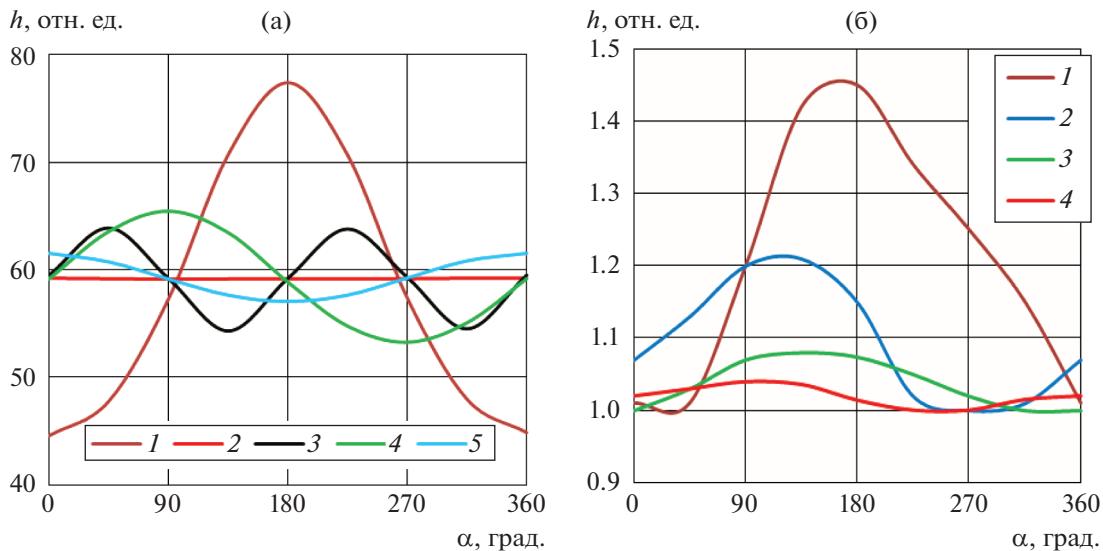
В результате математического моделирования нами были установлены следующие выводы и рекомендации к планетарному механизму напылительной системы:

- при малых угловых скоростях цилиндрической оболочки  $v$  наблюдается значительная неравномерность слоя металлизации по длине окружности (рис. 4а),
- в случае использования дробного соотношения, в котором скорости имеют целые численные значения, например  $\omega : v = 1 : 2$  (кривая 1 на рис. 4а) существует сильная неравномерность покрытия в окружном направлении,
- при переходе к дробному соотношению  $\omega : v = 1 : 2.2$  (кривая 2 на рис. 4а) неравномерность практически исчезает уже за несколько оборотов карусели (кривая 4 на рис. 4б),
- при увеличении  $v$  и постоянной величине  $\omega$  неравномерность толщины напыления уменьшается, например, при соотношении  $\omega : v = 1 : 10$  максимальная степень неравномерности приближается к единице,
- одновременное увеличение угловых скоростей  $\omega$  и  $v$  в одинаковое количество раз не меняет производительности процесса и неравномерность пленки.

Приведенные расчетные исследования были учтены при проектировании планетарного механизма магнетронной напылительной системы. Нанесение слоя меди на плоские образцы – свидетели с последующим измерением толщины слоя посредством рентгенофлуоресцентного анализатора FISCHERSCOPE X-RAY подтвердили правомочность выполненных расчетов.

## СВОЕОБРАЗИЕ ПРОЦЕССОВ ПАЙКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КВАРЦЕВЫХ И САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧЕК

В вакуумной технике в качестве основного металла для соединения с кварцем и сапфиром широко используется сплав 29НК (ковар) с коэффициентом линейного расширения  $7.8 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  в диапазоне температур 20–600°C [6]. Получение герметичного соединения осложняется тем, что рассматриваемые оптические материалы существенно отличаются друг от друга по КЛТР. Монокристал-



**Рис. 4.** Зависимость толщины (а) и неравномерности (б) наносимой пленки в зависимости от угловой координаты точки на цилиндрической поверхности зоны напыления при следующих соотношениях ( $\omega : v$ ): (а) 1 – 1 : 2; 2 – 1 : 2.2; 3 – 2 : 3; 4 – 1 : 3; 5 – 1 : 4 об./мин; (б) 1 : 2.2 об./мин, 1 – после одного оборота барабана, 2 – после трех, 3 – после семи, 4 – после девяти оборотов.

лический сапфир обладает анизотропией тепловых свойств, поэтому вдоль его кристаллографической оси КЛТР составляет  $5 \cdot 10^{-6}$  1/K, а перпендикулярно равняется  $6.6 \cdot 10^{-6}$  1/K [3]. В то время как у кварцевого стекла в диапазоне рабочих температур лампы (до  $600^\circ\text{C}$ ) величина коэффициента расширения не превышает величину  $5 \cdot 10^{-7}$  1/K [4]. По этой причине специфику пайки этих материалов с коваром необходимо рассматривать по отдельности.

**Спай ковара с кварцевым стеклом.** На сегодняшний день вопрос об активной пайке кварцевого стекла с коваром решен посредством применения специального припоя на основе олова с небольшой присадкой титана (до 3 вес. %) [13]. Применение указанного сплава при индукционной пайке не всегда обеспечивает надежное и герметичное соединение в силу нескольких причин:

1. Согласно работе [13] в сплаве олово–титан образуется несколько типов интерметаллидов, которые затрудняют воспроизводимость температурных свойств припоя от партии к партии, и, соответственно, наблюдаются отступления от технологических режимов пайки.

2. Превышение температуры нагрева выше  $850^\circ\text{C}$  способствует растворению в припое компонентов, входящих в состав сплава 29НК (Fe, Ni, Co) с образованием переходной зоны (около 10 мкм) повышенной твердости, образованной интерметаллидами перечисленных металлов.

3. Образование интерметаллидов существенно уменьшает концентрацию титана в припое и, тем самым, снижает интенсивность процессов взаимодействия титана с кварцевым стеклом.

Магнетронное нанесение плотно прилегающего к кварцевой поверхности слоя титана существенно увеличивает эффективность протекающих между ними химических реакций и, как следствие, повышает надежность спая. При этом изменяется механизм взаимодействия припоя с кварцевым стеклом.

Рассмотрим особенности предлагаемого нами способа активной пайки припоеем ОТ-1.5 металлизированной титаном цилиндрической поверхности кварцевого стекла. Для понимания механизма образования соединения нами предварительно изучены процессы смачивания расплавом ОТ-1.5 участвующих в образовании спая материалов (сплав 29НК, титан, кварц). Кварцевое стекло изучалось для случая нарушения сплошности титанового покрытия (царапины, трещины, отслойки и т.д.). В качестве критерия нами применен коэффициент растекаемости, определяемый по формуле:

$$K_p = \frac{S_0}{S_1},$$

где  $S_0$ ,  $S_1$  – площадь, занимаемая припоеем до и после расплавления соответственно. Данный коэффициент существенно зависит от вязкости расплава припоя и поверхностного натяжения на границе раздела материалов. Как следует из работы [13] необходимо добиваться, чтобы коэффициент  $K_p$  не превышал величину 0.5 (краевой угол смачивания около  $40^\circ$ ).

Выявленные зависимости  $K_p = f(T)$  для интервала температур  $750$ – $950^\circ\text{C}$  представлены на рис. 5а.

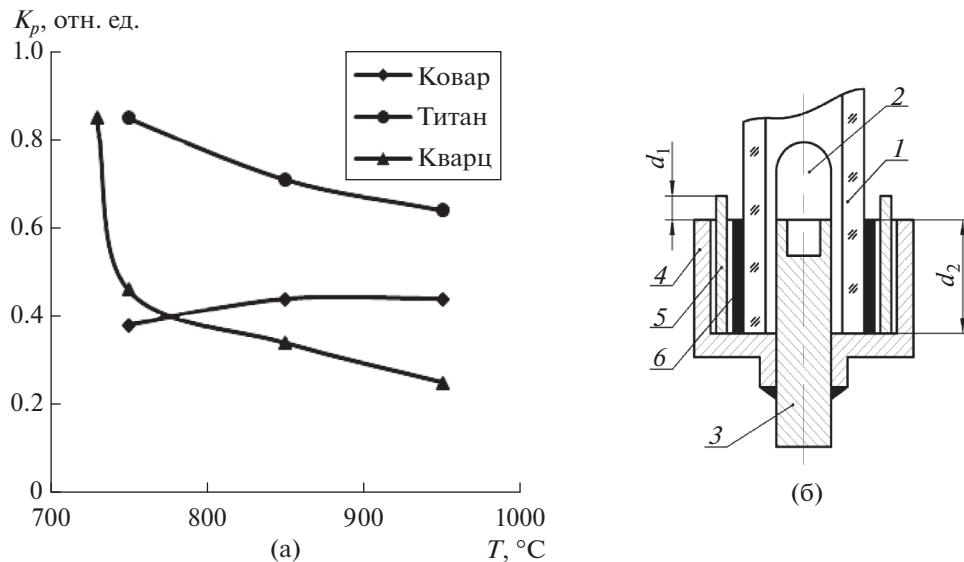


Рис. 5. Коэффициент растекания припоя ОТ-1.5 по поверхности материалов спая и конфигурация сборки токоввода перед пайкой: 1 – кварцевая колба; 2 – электрод; 3 – держатель; 4 – колпачок из сплава 29НК; 5 – припой ОТ-1.5; 6 – титановое покрытие; остальное по тексту.

Как следует из полученных нами результатов коэффициент  $K_p$  изменяется незначительно при смачивании поверхности ковара (от 0.38 до 0.44) и титана (от 0.85 до 0.61). При этом растекаемость по титану значительно хуже, чем по сплаву 29НК. По этой причине можно ожидать, что при плавлении припоя ОТ-1.5 зазор между деталями будет заполняться за счет смачивания ковара, а титан в ходе этого временного интервала успеет взаимодействовать с кварцевым стеклом.

Анализ представленных на рис. 5а результатов и сделанных выше заключений позволяет установить режимы пайки припоеем ОТ-1.5. Во-первых, температура должна соответствовать величине 850°C, так как при этой температуре происходит стабилизация смачивания поверхности кварцевого стекла, что важно при наличии дефектов пленки титана. Во-вторых, время пайки не должно превышать 30 с, чтобы исключить растворение компонентов сплава 29НК (Fe, Ni, Co) в образовавшемся расплаве.

Реализация таких условий пайки возможна только индукционной пайкой в вакууме [14]. На рис. 5б представлена сборка электродного узла, состоящего из электрода 2 с держателем 3, к которому посредством лазерной сварки герметично прикреплен тонкостенный колпачок 4 из сплава 29НК. Перед индукционной пайкой (ВЧ-нагревом) электродный узел размещается в кварцевой оболочке 1 (рис. 5б), а в образовавшийся зазор между предварительно нанесенным титановым покрытием 6 и коваровым колпачком 4 устанавливается полоса 5 из припоя ОТ-1.5. При этом высота кольца припоя 5 должна выступать над торцом колпачка на

величину  $d_1$  (устанавливается экспериментально), чтобы обеспечить полное заполнение расплавом зазора высотой  $d_2$  при ВЧ – нагреве припоя.

В работе [14] показано, что одним из основных факторов, определяющих температуру металла под воздействием ВЧ- поля является его удельное сопротивление  $\rho$ , т.е. чем выше этот параметр, тем больше будет нагрета деталь. В таблице ниже приведены значения  $\rho$  всех используемых в пайке металлических элементов [6].

Металл	Сплав 29 НК	Титан	Олово
$\rho$ , $10^{-4}$ Ом/см	0.5	0.42 при 20°C 1.65 при 800°C	0.11

Из представленных данных следует, что при установке сборки в индуктор под воздействием магнитного поля в первую очередь будет происходить нагрев коварового колпачка и слоя титановой metallизации. Важно отметить, что в процессе роста температуры слоя титана, мощность ВЧ-нагрева покрытия будет увеличиваться за счет повышения  $\rho$  этого элемента (см. таблицу). Таким образом, в зоне контакта слоя титана с кварцевым стеклом будет происходить реакция их взаимодействия.

Завершающим этапом пайки является заполнение зазора расплавом припоя ОТ-1.5 на высоту  $d_2$  и взаимодействие с внешней поверхностью титанового покрытия. Образующиеся при этом соединения и фазовые области подробно описаны в работе [13] и в данной работе рассматриваться не будут. Выполненная серия экспериментов подтвер-

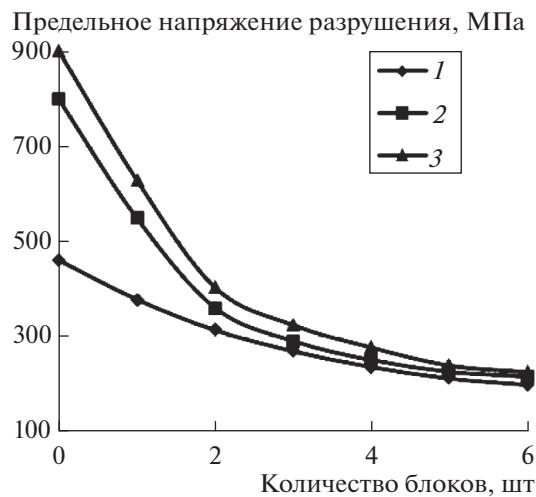


Рис. 6. Влияние блочности структуры на предельные усилия разрушения сапфировой трубы с толщинами стенки: 1 – 1.35 мм; 2 – 1.4 мм; 3 – 1.45 мм.

дила правомочность сделанного описания предполагаемого механизма образования спая ковар-кварцевое стекло с применением металлизированного слоя титана.

**Соединения сапфира с металлом.** Монокристаллический оксид алюминия обладает рядом специфических особенностей, которые необходимо учитывать при конструировании и разработке технологии соединений с металлом. Подробно данный вопрос изучен в работах [3, 6, 11, 15]. Ниже кратко рассмотрена специфика подготовки и процесса пайки цилиндрического токоввода в разрядный объем газоразрядной лампы.

1. В процессе направленной кристаллизации сапфировой трубы по методу А.В. Степанова в толще и на поверхности формируются различного рода дефекты (блочная структура, дислокации, точечные включения, пузыри и т.д. [3, 14]), приводящие к снижению механической прочности и оптической прозрачности. Пропускание возможно восстановить шлифовкой и полировкой внешней и внутренней поверхности корундовой трубы на глубину около 0.25 мм [15], что, в свою очередь, частично снижает механическую прочность будущей оболочки газоразрядной лампы.

2. Особо необходимо отметить влияние на механическую прочность блочной структуры корунда, т.е. наличие в кристалле разориентированных областей, имеющих границы, повернутые относительно друг друга на некоторый угол, что создает дополнительные внутренние напряжения в стенке трубы. На рис. 6 показаны зависимости пределов механической прочности сапфировых труб с различной толщиной стенки от количества блоков [15].

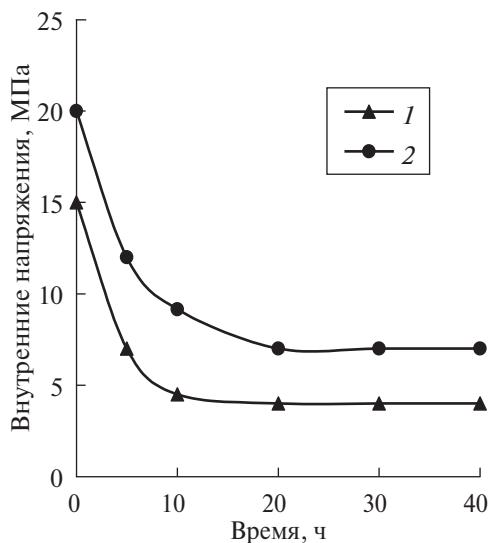


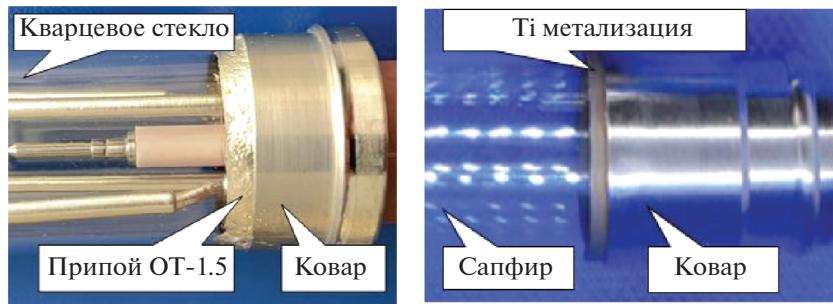
Рис. 7. Временная зависимость напряжений в стенке корундовой трубы при температурах нагрева 1850 (1) и 2000°C (2).

Из представленных данных следует, что механическая прочность рассматриваемой трубы снижается с увеличением количества блоков, стремясь к величине 200 МПа при наличии пяти и более разориентированных областей по периметру стенки. При этом, как видно из рис. 6, у безблочной трубы увеличение толщины стенки всего на 0.1 мм приводит к росту устойчивости к механическому разрушению практически вдвое (кривые 1 и 3). Поэтому при подготовке к пайке надо выбирать корундовую трубу с минимальным количеством блоков.

3. Частично повысить механическую прочность корунда возможно путем длительного вакуумного отжига (не менее 10 ч) при температуре 2000°C (рис. 7). В процессе такого теплового воздействия происходит, во-первых, частичная релаксация напряжений на межблочных границах, во-вторых, наблюдается локальное оплавление острых микрокромок трещиновидных слоев на внутренней и внешней поверхностях полированной трубы [3], приводящее к улучшению прозрачности сапфира.

4. Из теории пайки хорошо известно, что успех герметичного соединения зависит от зазора между деталями, поэтому нами предложено техническое решение конусного спая ковара с сапфиром [16], обеспечивающего под тяжестью применяемых грузов плотное прилегание поверхностей при расплавлении припоя.

5. Выше уже отмечалось, что титан, как элемент металлизированного покрытия, обладает высоким сродством к кислороду, поэтому практически всегда на его поверхности расположен слой оксидов, снижающих смачивание расплавом припоя. Использование двух мишеней, например, из Ti и Cu, позволяет устранить этот недостаток за счет нане-



**Рис. 8.** Конструктивное исполнение газоразрядных ламп с кварцевой и сапфировой оболочками.

сения поверх титанового слоя покрытия из меди, не извлекая из рабочей камеры магнетронной установки. Кроме устранения указанного недостатка такое решение исключает возможность нарушить целостность титанового покрытия при сборке конструкции перед пайкой. Наличие слоя меди дополнительно улучшает растекание основного припоя в зазоре между деталями [17].

6. При пайке сапфира с металлами (коваром) важно соблюдать температурно-временной режим нагрева соединяемых деталей. Это связано с двумя причинами. Во-первых, необходимо обеспечить выдержку в диапазоне температур в интервале 700–1000°C для обеспечения возможности протекания реакций, описанных в предыдущем разделе. Во-вторых, растекание припоя в зазоре значительно упрощается при температурах соединяемых поверхностей, близких к температуре расплавления припоя.

7. Заключительной операцией изготовления токовода является проверка полученного соединения на герметичность посредством гелиевого течеискателя, что позволяет исключить появление брака в производстве газоразрядных ламп.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании приведенных результатов исследований и сформированных рекомендаций нами разработаны и внедрены в серийное производство газоразрядных ламп технологические процессы изготовления спаев кварцевого стекла и сапфира с коваром, представленные на рис. 8.

Выполненные испытания на устойчивость к механическим (одиночные удары, синусоидальная вибрация, резонансные частоты и т.д.) и климатическим (циклическое изменение температуры от –60°C до +80°C, повышенная влажность, морской туман и т.д.) показали положительные результаты и подтвердили правомочность разработанных технических решений с применением рассмотренных в данной работе перспективных материалов и инновационных технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Гольдштейн Я.А., Голубцов А.А., Киреев С.Г., Шашковский С.Г. и др. // Медицинский алфавит. 2017. Т. 2 (18). С. 5–8.
2. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. 1991. Москва: Энергоатомиздат.
3. Добровинская Е.Р., Литвинов Л.А., Пищик В.В. Энциклопедия сапфира. 2004. Харьков: Институт монокристаллов.
4. Андреев Ю.П., Браиловская Р.В., Воскресенская Н.А. // Обзоры по электронной технике. Сер.: Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1976. № 8. С. 407.
5. Басов Ю.Г., Родзигин В.И., Сысун В.В. // Электронная техника. Сер.: Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1988. № 4. С. 43–52.
6. Батыгин В.Н., Метелкин И.И., Решетников А.М. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. 1973. Москва: Энергия.
7. Пучнина С.В. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9 (1). С. 18–24.
8. Агнищев Ю.Г. // Журнал прикладной химии. 1968. Т. 41 (5). С. 1010–1012.
9. Жмудь Е.С., Шмелев А.Е., Метелкин И.И. // Неорганические материалы. 1973. Т. 9 (10). С. 1798–1801.
10. Градов В.М., Гольдштейн Я.А., Голубцов А.А., Киреев С.Г., Шашковский С.Г. и др. // Материалы XXI Междунар. конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли. Алушта, 24–31 мая 2019. 2019. Москва: Изд-во МАИ. С. 44–46.
11. Пучнина С.В. Исследование и разработка технологии пайки сапфира с металлами для газоразрядных источников излучения оптико-электронных систем: дисс. к.т.н. 2019. Москва: 2019.
12. Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н. // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 4. С. 28–37.
13. Шабуркина В.И., Ермакова Н.В., Болгова Т.В. и др. // Электронная техника. Сер.: Материалы. 1977. № 11. С. 109–114.
14. Ланин В. // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 6. С. 23–27.
15. Браиловский В.Б., Гавриш С.В., Рыжков А.Е. // Контроль. Диагностика. 2007. № 2. С. 49–59.

16. Гавриш С.В., Кобзарь А.И., Логинов В.В. и др. // Патент РФ (полезная модель) № 109918. МПК H01J 61/34. 27.10.2011. Бюл. № 30.
17. Гавриш С.В., Игнатова Т.В., Баринова Т.Н., Пучнина С.В. и др. // Патент РФ (полезная модель) № 146427. МПК H01J 61/34. 10.10.2014. Бюл. № 28.

## Specificity of the Use of Promising Materials and Innovative Technologies in the Development of High Current Gas-Discharge Lamps

S. V. Gavrish<sup>1</sup>, \* , A. O. Potapenko<sup>1</sup>, S. V. Puchnina<sup>1</sup>, and P. A. Chilikina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Scientific and Industrial Enterprise Melitta, Moscow, 117997 Russia

\*e-mail: svgavr@list.ru

Received May 10, 2024; revised May 10, 2024; accepted May 20, 2024

**Abstract**—The design features of high-current gas discharge lamps involving quartz glass and monocrystalline sapphire as promising discharge shell materials have been discussed. The technology of obtaining sealed joints using magnetron deposition of thin titanium layers with subsequent soldering has been considered. A thermodynamic analysis of the possibility of chemical reactions at the titanium–shell material interface has been carried out. The mechanism of obtaining homogeneous metallization layers has been studied using a mathematical model. The specificity of induction soldering of quartz glass with Kovar (alloy 29NK) using tin-based solders and obtaining a sapphire–Kovar joint in vacuum furnaces have been described.

**Keywords:** gas discharge lamp, quartz glass, sapphire, soldered joint, thermodynamic analysis, magnetron deposition, mathematical model, titanium metallization, mechanical strength, optical transmission