

**Повышение предельной величины удельной мощности
импульсных ксеноновых газоразрядных ламп**

С. В. Гавриш, Д. Н. Кугушев, Д. Ю. Пугачев, С. В. Пучнина, С. Г. Шашковский

В работе для повышения предельной величины удельной мощности разряда импульсной ксеноновой лампы предлагается произвести замену кварцевого стекла, используемого в качестве материала оболочки, на сапфир. Доказывается более высокая стойкость сапфира к термическим напряжениям, воздействию ударной волны и внутреннего давления разряда. Выполнен расчет конструкции тоководов в сапфировую оболочку импульсной ксеноновой лампы.

Ключевые слова: кварцевое стекло, сапфир, давление разрушения, ударная волна, предельная сила тока, согласованный спай.

Ссылка: Гавриш С. В., Кугушев Д. Н., Пугачев Д. Ю., Пучнина С. В., Шашковский С. Г. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 69.

Reference: S. V. Gavrish, D. N. Kugushev, D. Y. Pugachev, S. V. Puchnina, S. G. Shashkovskiy, Applied Physics, No. 3, 69 (2020).

Импульсные ксеноновые лампы являются источниками высокоинтенсивного оптического излучения. Спектр излучения, генерируемый такими газоразрядными лампами, сплошной, близкий по распределению к солнечному и перекрывает всю УФ-область от 190 до 400 нм, которая широко используется в высокоинтенсивных фотохимических технологиях очистки и обеззараживания стоков, воздуха и воды [1]. Поэтому увеличение энергетической доли бактерицидного излучения в эмиссионном спектре импульсных ксеноновых ламп является актуальной задачей.

Очевидно, что спектральный состав излучения определяется яркостной температу-

рой ксеноновой плазмы, параметры которой зависят от плотности разрядного тока. Наибольший выход в полосе 200–300 нм может достигать значений 16–18 % при различной частоте следования импульсов, определяющих среднюю мощность источника. Для реализации таких режимов требуется на поверхности кварцевой колбы достичь уровня пиковых значений удельных электрических мощностей 30–40 кВт/см², что приведет к ряду процессов ее деградации:

- разложению двуоксида кремния, которое способствует появлению в разряде паров оксидов SiO₂, SiO, Si₂O₂, которые ухудшают основные параметры импульсного ксенонового разряда и снижают эффективность газоразрядной лампы [2, 3];

- появлению обратимой непрозрачности или эффекта «запирания УФ-излучения» [3, 4] в оболочке, за счет мгновенного повышения температуры и смещения УФ границы прозрачности кварца вправо;

- изменению структуры кварцевого стекла при температурах, значительно меньших температуры плавления и кипения, основным результатом которого является расстекловывание и кристаллизация (образование

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

Статья поступила в редакцию 16 марта 2020 г.

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

α -кристобалита) на внутренней поверхности разрядной трубки. Коэффициент термического расширения образовавшегося тонкого слоя при температуре меньше 1000 °С имеет существенное отличие от КЛТР в толще кварцевой стенки, что приводит к возникновению напряжений в образовавшемся α -кристобалите и формированию на внутренней поверхности трубки сетки трещин после остывания лампы [2].

Существует еще ряд характеристик кварцевого стекла (оптические, структурные, прочностные и т. д.), которые под воздействием плазмы и теплофизических процессов в стенке оболочки, значительно меняются. Данные явления подробно описаны в работах [3–5].

В настоящее время в качестве материала оболочек газоразрядных ламп с импульсно-периодическим разрядом в цезий–ртуть–ксеноновой смеси получили широкое применение трубы из монокристаллического оксида алюминия (сапфира, корунда) [6], обладающего целым рядом уникальных физических и химических свойств [7, 8]:

- прозрачность в широком оптическом диапазоне длин волн от 0,15 до 5,5 мкм (у кварца интервал пропускания составляет 0,2–4,2 мкм [7, 8]) при комнатной температуре. При нагреве корунда до 1000 °С интервал пропускания сужается от 0,2 до 5,0 мкм [9];
- стойкость практически ко всем химически активным веществам (щелочам, кислотам, щелочным металлам) [8];
- пределы прочности при комнатной температуре на растяжение находятся в интервале 275–400 МПа, на изгиб 450–895 МПа, на сжатие 2 ГПа [7];
- высокие температуры плавления 2323 К и кипения 3773 К [7, 8] (у кварца, соответственно 1673 К и 2500 К [5, 8]).

Дополнительно необходимо отметить, что современные достижения в области исследования свойств сапфира в зависимости от дефектности, кристаллографического направления, рабочей температуры, а также освоение промышленного выращивания корундовых труб по методу А. В. Степанова открывает широкие возможности промышленного использования сапфира в плазменной электронике [10, 11]. Из приведенных выше доводов возникает естественный вопрос о возмож-

ности замены кварцевого стекла на синтетический корунд в импульсной ксеноновой лампе с целью повышения ее надежности. Возможности реализации сделанного предположения посвящена данная статья.

Сравнительный анализ устойчивости кварцевой и сапфировой оболочек к воздействию высокоинтенсивных потоков ксеноновой плазмы

Причин разрушения оболочки газоразрядной лампы несколько:

- наличие термических напряжений, сформировавшихся в процессе изготовления и эксплуатации;
- воздействие механических (ударных и вибрационных) нагрузок при транспортировке и эксплуатации;
- действие импульса давления, амплитуда которого превышает предел прочности материала оболочки.

Если устойчивость к первым двум воздействующим факторам определяется в основном конструкцией и технологией производства газоразрядной лампы, то сохранение целостности при повышенном внутреннем давлении плазмообразующей среды зависит от свойств материала оболочки при рабочих температурах. Поэтому далее основное внимание будет сосредоточено на оценке прочности оболочек при критических значениях давления ксенона.

Давление на оболочку складывается из трех составляющих:

- усилия, возникающие в результате нагрева газа проходящим током;
- распространение ударной волны;
- воздействие теплового импульса.

Статическое разрушение трубки внутренним давлением P_p происходит при достижении растягивающих напряжений, превышающих пределы прочности материала:

$$P_p = \sigma_p \frac{R/r^2 - 1}{R/r^2 + 1}, \quad (1)$$

где σ_p – разрушающее напряжение материала оболочки, R и r внешний и внутренний радиусы разрядной трубки.

На рис. 1 представлена зависимость предельной величины разрушающего давления в зависимости от R/r , построенная по уравнению 1, для разрядной трубки из кварцевого стекла ($\sigma_{\text{кв}} = 50$ МПа [4, 5]) и сапфира ($\sigma_{\text{с}} = 100$ МПа [6, 10, 12]). Из приведенных кривых видно, что с увеличением толщины стенки механическая устойчивость к разрушению у сапфира имеет резко возрастающий запас прочности, чем у кварцевого стекла. Данный вывод подтверждает правомочность использования сапфира в качестве материала оболочки импульсной ксеноновой лампы.

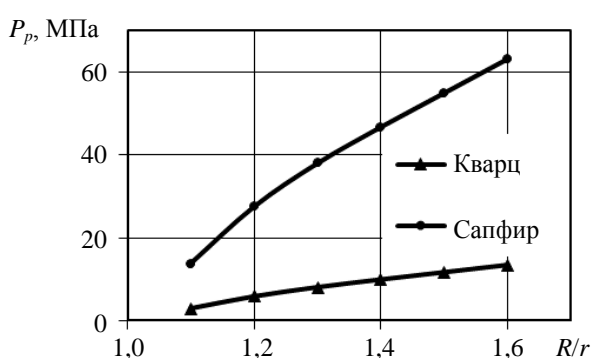


Рис. 1. Зависимость предельного разрушающего давления наполняющего газа от R/r для разрядных оболочек из кварцевого стекла и сапфира.

В работе [4] механизм термического разрушения связывается с воздействием теплового импульса на внутреннюю поверхность разрядного объема. При этом в приповерхностном слое возникают напряжения сжатия $\sigma_{\text{сж}}$ при равенстве которых предельным значениям разрушения σ_p происходит треск оболочки газоразрядной лампы. Предельная энергия разряда $W_{\text{пр}}$ в случае возникновения термического разрушения определяется по формуле [4]:

$$W_{\text{пр}} = \frac{k}{1 - \eta_e} \sqrt{\pi} \frac{\sigma_p (1 - \nu) \lambda}{\alpha_p E \sqrt{a}} V \sqrt{t}, \quad (2)$$

где σ_p – разрушающее напряжение; k – коэффициент, зависящий от формы импульса тока длительностью t ; $1 - \eta_e$ – доля энергии, превращаемой в тепло; ν – коэффициент Пуассона; λ , a – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности; α_p – температурный коэффициент расширения материала кол-

бы; E – модуль упругости; V – внутренний объем лампы.

По формуле (2) выполним оценку предельной энергии разряда для кварцевой ($W_{\text{пр кв}}$) и сапфировой ($W_{\text{пр с}}$) оболочек разрядного объема лампы. В предположении идентичности условий разряда и при использовании справочных данных работ [5, 7, 8] получаем, что в случае импульсного ксенонового разряда, ограниченного сапфировой трубкой, $W_{\text{пр с}}$ в 1,3 раза выше предельной нагрузки на кварцевую колбу $W_{\text{пр кв}}$. Полученный результат вызывает некоторое сомнение, так как в результате проведенных нами исследований [10, 12] сапфировая трубка имеет минимальное давление разрушения 100 МПа в диапазоне температур 600–800 °С, в то время как кварцевая трубка с такими же размерами при аналогичном тепловом воздействии выдерживает нагрузки на оболочку в два раза меньше (менее 50 МПа [5]). В любом случае, замена кварцевого стекла на сапфир обеспечивает большую устойчивость к механизму термического разрушения.

Вторым воздействующим фактором на оболочку импульсной газоразрядной лампы является ударная волна. Используем аппроксимационное выражение для давления фронта ударной волны $p_{\text{ф}}$ импульсного разряда в ксеноне, приведенном в [4]:

$$p_{\text{ф}} \approx 3,2 \left(\frac{p_0}{L} \right)^{0,5} \frac{U_0^{0,64}}{l^{0,4}}, \quad (3)$$

где p_0 – давление ксенона в холодном состоянии; U_0 – напряжение на рабочем конденсаторе; L – индуктивность разрядного контура; l – межэлектродное расстояние.

Для оценки $p_{\text{ф}}$ воспользуемся данными работы [13], где выполнена оптимизация конструкции лампы и параметров разрядного контура для электрического питания импульсного ксенонового источника УФ-излучения с диаметром плазменного канала 5 мм и давлением наполнения 220 мм рт. ст. (0,029 МПа). Применяв формулу (3) путем несложных расчетов получены давления фронта ударной волны для двух граничных значений емкостей рассматриваемого в работе

[13] интервала.

Как следует из таблицы для рассматриваемых режимов давление фронта ударной волны намного меньше предела механической прочности кварцевой (50 МПа [5]) и сапфировой (100 МПа [6, 10, 12]) оболочек. Полученный результат хорошо согласуется с утверждением авторов монографии [4], что при

рассматриваемом давлении ксенонового наполнения наибольшее значение p_f лежит заведомо ниже 0,5 МПа. Таким образом, p_f не оказывает влияния на механизм разрушения импульсных ксеноновых ламп с кварцевыми и сапфировыми оболочками при работе в «мягких» режимах.

Таблица 1

W , Дж	C , мкФ	U_0 , кВ	l , см	p_f , МПа
53,0	80	1,15	10	0,1
	10	3,25	30	0,133

Надежность токовводов в газоразрядные лампы с кварцевой и сапфировой оболочками

Применяемые в настоящее время электродные узлы импульсных газоразрядных ламп представляют собой комбинацию электрода с цилиндром из тонкой молибденовой фольги, особым образом герметично соединяемой с кварцевой оболочкой [4, 14, 15]. В частности, в рассмотренном выше случае [13], цилиндр токоввода имеет толщину 30 мкм, т. е. поперечное сечение 0,6 мм². Таким образом, в соответствии с графическими расчетно-экспериментальными зависимостями работы [14] предельная сила тока $I_{пред.}$ через фольгу составляет не более 50 А. В качестве критерия при оценке $I_{пред.}$ в работе [14] принято считать нагрев фольговой части до 400 °С, т. е. выбрана температура при которой начинается интенсивное окисление молибдена.

В случае газоразрядной лампы с сапфировой оболочкой в качестве токоввода используется держатель электрода из сплава 29 НК диаметром 5 мм. Выполним оценку предельного тока, достигаемого предлагаемой конструкцией. В предположении, что основной нагрев токоввода осуществляется проходящим током, можно, уравнив известную формулу Джоуля–Ленца с выражением количества теплоты, необходимого для нагрева прутка сплава 29 НК от комнатной до температуры 400 °С получить уравнение, позволяющее оценить предельный ток в течение цикла работы лампы (времени экспозиции). Данное уравнение служит для приблизительной оценки, так как не учитывает тепловые потоки от нагретых

плазмой электродов, сапфировой оболочки, а также теплоотдачу поверхности лампы в окружающую атмосферу. Несмотря на разнящиеся данные по теплофизическим характеристикам ковара [7, 8] значение $I_{пред.}$, рассчитанное по полученной формуле составляет не менее 400 А при времени работы лампы 100 секунд и 250 А при функционировании до 5 минут. При этом согласно работе [6], температура токоввода может быть значительно выше, чем 400 °С, как это предполагалось в нашем расчете.

Следующей важной задачей при создании токоввода в газоразрядную лампу является получение герметичного соединения с сапфиром металлической манжеты, в которой, например, посредством лазерной сварки, будет закреплен держатель электрода. Технология и конструкция спая сапфира с коваром для газоразрядных ламп с оболочкой диаметром 20 мм подробно рассмотрена в работах [6, 12]. Однако, встает вопрос расчетной оценки безопасных напряжений в спаяе при использовании сапфировой трубы меньшего диаметра. Данная проблема реализуется путем решения задачи Ляме, суть которой подробно изложена в монографии [15].

При этом нами сделаны следующие допущения:

- концевой эффект отсутствует, т. е. не существует изменения распределения напряжения на концах спая;
- поперечные сечения остаются плоскими после изменения температуры;
- расчет напряжений производится в зоне спая, так как в данной точке они достигают максимума.

Величина тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta n}$

в случае охватывающего спае (сапфир внутри) рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_{\theta n} = \frac{E_b \cdot h \cdot \alpha}{2b - c + h \cdot d - 2b} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \quad (4)$$

где $c = 1 + \frac{r_3^2}{r_2^2}$; $d = 1 + \frac{r_1^2}{r_2^2}$; $h = \frac{E_n}{E_b} \times \frac{r_2^2 - r_3^2}{r_2^2 - r_1^2}$;
 $a = \alpha_n - \alpha_b \times T - T_0$; $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

В приведенных формулах E_n , α_n , и E_b , α_b – соответственно, модули упругости и коэффициенты линейного расширения материала внешнего и внутреннего соединяемых цилиндров, b – коэффициент Пуассона, T – температура пайки, r_1 , r_2 , r_3 – радиусы цилиндров согласно рис. 2. Значения модуля упругости и коэффициентов линейного расши-

рения спаиваемых материалов взяты из литературных источников, например [7, 8, 15].

Для спае ковар–сапфир используется металлический припой (медь, ПСр-72 и т. д.), который при охлаждении после пайки будет частично релаксировать возникающие напряжения за счет своей пластичности. При оценке напряжений предполагается, что спаянные соединения остывают до комнатной температуры от температуры расплавления меди (1100 °C).

Как следует из расчетных данных на рис. 2 величина дифференциального сжатия (А) имеет положительное значение, следовательно, напряжения в спае являются сжимающими и достаточно безопасными. Для охватывающего спае необходимо добиваться, чтобы r_1/r_2 имело малое значение. Приведенные на рис. 2 данные позволяют прогнозировать напряжение в спае при конструировании тоководов в сапфировую лампу.

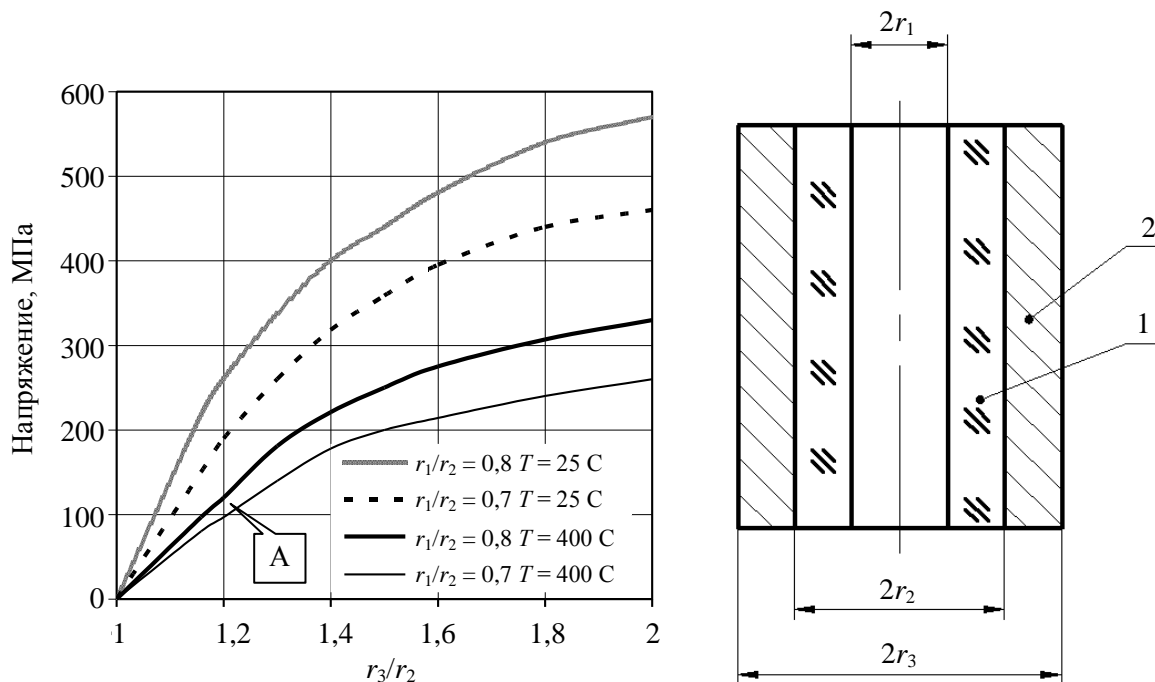


Рис. 2. Тангенциальные напряжения, действующие в сапфире (1) цилиндрического спае с коваром (2).

На основании расчётных и экспериментальных зависимостей проведём оценку требуемых толщин стенки ковара для получения вакуумно-плотных спаев импульсной ксеноновой лампы мощностью 200 Вт. Используемые в данной лампе сапфировая трубка имеет

внешний диаметр $D = 2r_2 = 7,0$ мм, толщину стенки $h = 1,0$ мм, т. е. $r_1/r_2 = 0,7$.

Как следует из работы [5], у внешнего баллона в зоне спае температура составляет около 600 °C при максимальной рабочей мощности ламп. Поэтому предельное тангенци-

альное напряжение составляет $\sigma_0 = 100$ МПа (см. рис. 2). Для данного значения σ_0 при соотношении $r_1/r_2 = 0,7$, согласно рис. 2, получаем (точка А) $r_3/r_2 = 1,2$, т. е. $r_3 = 3,5 \times 1,2 = 4,2$ мм. Таким образом, в случае соединения ковар–сапфир наименьшее термическое напряжение при рабочей температуре 600°C будет иметь спай сапфировой трубы с размерами: внешним диаметром 7,0 мм и толщиной стенки 1,0 мм с цилиндрической коваровой манжетой толщиной менее 0,7 мм.

Заключение

На основе проведенного расчетно-теоретического анализа убедительно доказано, что в импульсных ксеноновых лампах замена кварцевого стекла, используемого в качестве материала оболочки, на сапфировые трубы позволит без ущерба эксплуатационным характеристикам (механическая и климатическая устойчивость, спектр излучения и т. д.) повысить предельную величину удельной мощности разряда и электрическую нагрузку на токовводы источника света.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн Я. А., Голубцов А. А., Киреев С. Г., Шашковский С. Г. // Медицинский альманах. 2019. № 3–4. С. 95.

2. Андреев Ю. П., Браиловский В. Б., Веревка В. Г.

и др. // Электронная техника. Сер. Материалы. 1971. Вып. 1. С. 82.

3. Кобзарь А. И., Константинов Б. А., Андреев Ю. П. и др. // Обзоры по электронной технике. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1981. Вып. 2 (846). С. 57.

4. Маршак И. С., Дойников А. С., Жильцов В. П. и др. Импульсные источники света. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.

5. Андреев Ю. П., Браиловская Р. В., Воскресенская Н. А. // Обзоры по электронной технике. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1976. Вып. 8 (407).

6. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.

7. Добровинская Е. Р., Литвинов Л. А., Пицик В. В. Энциклопедия сапфира. – Харьков: Институт монокристаллов, 2004.

8. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. – М.: Наука, 1965.

9. Лингарт Ю. К., Петров В. А., Тихонова Н. А. // ТВТ. 1982. Т. 20. № 5. С. 872.

10. Браиловский В. Б., Гавриш С. В., Рыжков А. Е. // Контроль. Диагностика. 2007. № 2. С. 49.

11. Крымов В. М., Носов Ю. Г., Бахолдин С. И. и др. // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 11. С. 2190.

12. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пугачев Д. Ю., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 5. С. 480.

13. Киреев С. Г., Кулебякина А. И., Шашковский С. Г., Тумашевич К. А. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 71.

14. Гоухберг Д. А., Ровинский Р. Е. // Сборник по вакуумной технике. 1967. Вып. 3. С. 3.

15. Любимов М. Л. Спаи металла со стеклом. – М.: Энергия, 1968.

PACS: 07.50-e

Increasing the limiting value of the specific power of pulsed xenon discharge lamps

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

Scientific and Production Enterprise “Melitta”, Ltd, Moscow
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia
E-mail: svgavr@list.ru

Received March 16, 2020

To increase the limiting value of the specific discharge power of a pulsed xenon lamp, it is proposed to replace the quartz glass used as a shell material with sapphire. Proved higher resistance of sapphire to thermal stresses, shock wave and internal discharge pressure. Calculation of current leads into the sapphire shell of a pulsed xenon lamp is performed.

Keywords: quartz glass, sapphire, fracture pressure, shock wave, current limit, concerted brazing.

REFERENCES

1. Ya. A. Goldshtein, A. A. Golubtsov, S. G. Kireev, and S. G. Shashkovskiy, *The journal Medical almanac*, № 3–4, 95 (2019).
2. Yu. P. Andreev, V. B. Brailovsky, V. G. Verevka et al., *Electronic technology. Ser. Materials*, № 1, 82 (1971).
3. A. I. Kobzar, B. A. Konstantinov, Yu. P. Andreev et al., *Reviews on electronic technology. Laser technology and optoelectronics*, № 2 (846). – 57 (1981).
4. I. S. Marshak, A. S. Doinikov, V. P. Zhiltsov and others. *Pulse light sources 2nd ed., Rev. and add.* (Energy, Moscow, 1978).
5. Yu. P. Andreev, R. V. Brailovskaya, N. A. Voskresenskaya, *Reviews on electronic technology. Ser. Vacuum and gas discharge devices*, № 8 (407), 76 (1976).
6. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, *Successes in Applied Physics* **6** (4), 333 (2018).
7. E. R. Dobrovinskaya, L. A. Lytvynov, and V. V. Pischik, *Sapphire Encyclopedia* (Institute of Single Crystals, Kharkov, 2004).
8. E. M. Voronkova, B. N. Grechushnikov, G. I. Distler, and I. P. Petrov, *Optical materials for infrared technology* (Nauka, Moscow, 1965).
9. Yu. K. Lingart, V. A. Petrov, and N. A. Tikhonova, *TVT* **20** (5), 872 (1982).
10. V. B. Brailovskiy, S. V. Gavrish, and A. E. Ryjkov, *Kontrol'. Diagnostika [Testing. Diagnostics]*, № 2, 49 (2007).
11. V. M. Krymov, Yu. G. Nosov, S. I. Bakholdin et al., *FTT* **57** (11), 2190 (2015).
12. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, D. Y. Pugachev, and S. V. Puchnina, *Usp. Prikl. Fiz.* **7** (5), 480 (2019).
13. S. G. Kireev, A. I. Kulebyakina, S. G. Shashkovskiy, and K. A. Tumashevich, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 71 (2019).
14. D. A. Goukhberg and R. E. Rovinsky, *Collection of vacuum equipment*, № 3, 3 (1967).
15. M. L. Lyubimov, *Joints of metal with glass* (Energy, Moscow, 1968).