

## Влияние структурного совершенства сапфира на оптические характеристики оболочки импульсной газоразрядной лампы

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

*Приведены результаты исследований влияния на оптическое пропускание дефектов структуры сапфировой трубы, выращенной по методу А. В. Степанова, изменения прозрачности монокристалла после механической обработки поверхности и воздействия ультрафиолетового и радиационных облучений.*

*Ключевые слова:* сапфир, корунд, оболочка, импульсная газоразрядная лампа, оптическое пропускание, дефекты структуры, ультрафиолетовое излучение, гамма-излучение.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-404-410

Актуальность применения монокристаллического оксида алюминия (сапфира, корунда) в качестве материала оболочки (колбы), ограничивающей разряд в парах щелочных металлов или в инертных газах, доказательно подтверждена в работах [1–4]. Значительная часть данных о теплофизических процессах, происходящих в сапфире при изготовлении и эксплуатации газоразрядной лампы, подробно нами рассмотрена в публикациях [4–6]. В то же время приобретенный нами научный и технологический опыт при производстве источников излучения с сапфировой оболочкой позволяет расширить область полезных сведений о взаимосвязи структурного и поверхностного совершенства корундовой трубы, выращенной по методу А. В. Степанова, с оптическим пропусканием монокристалла и, как следствие, со спектрально-энергетическими параметрами излучения импульсной газоразрядной лампы.

### Факторы, воздействующие на оболочку при работе импульсной лампы

Цилиндрическая оболочка газоразрядной лампы выполняет несколько функций. Во-первых,

она является конструктивным остовом заполненного плазмообразующей средой разрядного объема с герметично установленными электродами (анод и катод), между которыми формируется плазменный канал. Во-вторых, колба изолирует развитие разряда от внешней окружающей среды, что очень важно для устойчивости горения плазменного канала и стабильности характеристик импульсной лампы. В-третьих, в силу оптической прозрачности применяемого материала оболочка обеспечивает выход излучения из плазмы в требуемом спектральном интервале. В-четвертых, форма и размеры колбы определяют габариты тела свечения и оказывают решающее влияние на оптические и электрические характеристики разряда, пространственное распределение выходящего из плазмы излучения.

Исходя из вышесказанного и сведений из монографий [7, 8], нами сформирована блок-схема основных факторов, оказывающих влияние на теплофизическое состояние колбы газоразрядной лампы (рис. 1). Условно представленные воздействия на оболочку можно разделить на внешние (вверху диаграммы) и внутренние (в нижней части блок-схемы) физические и химические механизмы. Влияние на свойства оболочки большинства приведенных факторов ранее нами уже рассматривались в [3–6, 9] и другими авторами (см. библиографию к [7, 8]). В частности, давление рабочего газа и ударной волны оценивалось в работе [3], связь состава плазмообразующей среды с тепловыми потоками на внутреннюю поверхность оболочки изучалась в [9], последствия распыления электродов, химического и механического воздействия на колбу лампы рассмотрены в [7, 8].

Гавриш Сергей Викторович, нач. отдела, д.т.н.

E-mail: svgavr@list.ru

Логинов Владимир Владимирович, нач. цеха, к.т.н.

Пучнина Светлана Викторовна, нач. лаб., к.т.н.

Ушаков Роман Максимович, инженер.

E-mail: ushakov98@gmail.com

ООО «НПП «Мелитта».

Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.

Статья поступила в редакцию 07 июля 2022 г.

© Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В., Ушаков Р. М., 2022

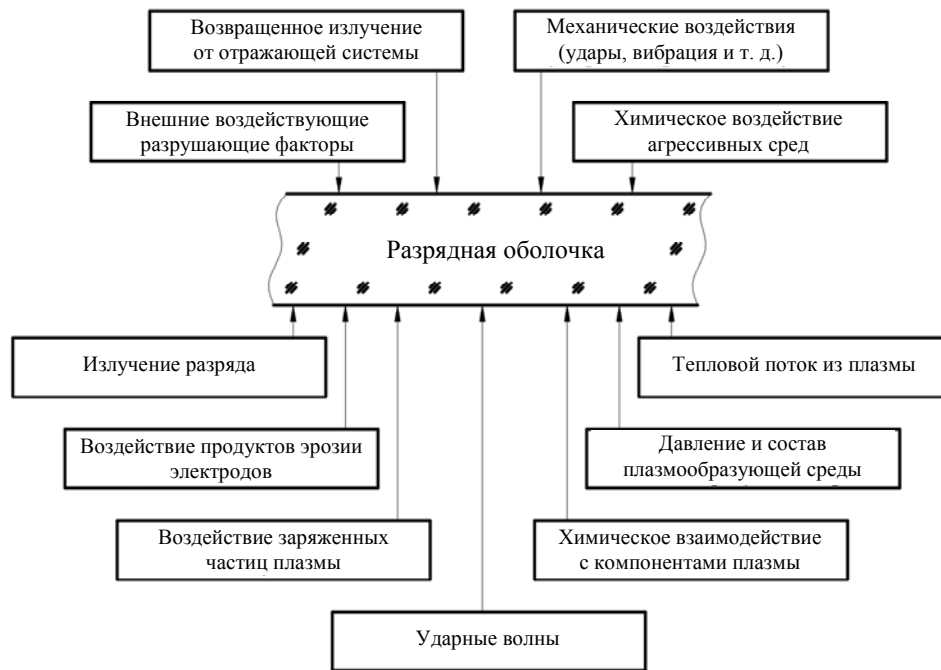


Рис. 1. Блок-схема воздействующих факторов на оболочку газоразрядной лампы

В то же время остается открытым вопрос о влиянии воздействия собственного излучения плазмы и внешних радиационных факторов на оптическую прозрачность сапфира.

### Общие сведения об оптическом пропускании сапфира

Монокристаллический оксид алюминия обладает решеткой корунда, образованной двухвалентными ионами кислорода и трехвалентными ионами алюминия. Кристаллы сапфира анизотропны, они являются одноосными и оптически отрицательными, т. е. в кристалле есть одно направление, где не происходит двойного лучепреломления, а показатель преломления необыкновенного луча меньше обыкновенного. В то же время анизотропия сапфира незначительна. Например, показатели преломления для линии натрия у обыкновенного луча имеют значение  $n_o = 1,7681 \div 1,7635$ , а для необыкновенного равняются  $n_n = 1,7599 \div 1,7631$ . В итоге, двулучепреломление ( $n_o - n_n$ ) составляет  $0,0004 \div 0,0082$ , поэтому при расчетах теплового состояния сапфировых оболочек им можно пренебречь.

Область полупрозрачности сапфира расположена между длинноволновым краем полосы электронного поглощения и коротковолновым краем первой молекулярной колебательной полосы поглощения. Если условно принимать длину волны, при которой величина поглощения достигает  $10 \text{ см}^{-1}$ , за границу поглощения, то у лейкосапфира эта область простирается при комнатной темпера-

туре от 0,1 до 6,2 мкм. Это способствует созданию разрядных источников с излучением в широком спектральном диапазоне.

Подробному рассмотрению оптических характеристик сапфира посвящена обзорная статья [10], которая обобщает результаты исследований оптических свойств сапфира в спектральном диапазоне 0,5–6,0 мкм при температурах от комнатной до 2300 К. Из данной публикации следует, что коэффициент поглощения при длине волны 500 нм составляет ~88 %.

Важно отметить, что приведенные в [10] данные относятся больше к оптически однородной среде, которая пропускает без рассеяния практически весь выходящий из плазмы поток. Основные потери в таких измерениях обусловлены только отражением на плоских поверхностях испытываемого образца. Оценим потери на отражение  $r$  следующим образом. При длине волны 0,665 мкм (максимум светового потока натриевых ламп) показатель преломления равен 1,7732 [11]. При этом потери на отражение для случая нормального падения луча на поверхность равны  $r = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 = 0,0777$ , где  $r$  – коэффициент отражения. Таким образом, пропускание каждой плоской поверхности равно 0,9223. Поскольку потери на отражение для каждой поверхности образца одни и те же, то интенсивность излучения, пропущенного материалом, в котором отсутствует поглощение и, имеющим малый показатель преломления приблизительно равна  $I = (1 - r)^2 = (0,9223)^2 = 0,85$  (т. е. ~85 %). Приведенные расчетные оценки совпадают с экспери-

ментально полученными коэффициентами пропускания сапфира в работе [12].

Однако, как было показано в [13], реальные материалы оболочек ламп содержат оптические неоднородности различного происхождения, обуславливающие рассеяние. Если неоднородности по размерам малы по сравнению с длиной волны  $\lambda$  ( $\sim 0,1\lambda$ ), то рассеяние излучения отсутствует. Если дефекты структуры сравнимы с длиной волны, то рассеяние излучения резко возрастает. Такими неоднородностями в корунде, выращенном по методу А. В. Степанова, являются газовые и твердые включения, диаметром свыше 2 мкм. Поэтому следует говорить не об оптической однородности кристаллов, предусматривающей постоянство показателя преломления по всему объему среды, а об их оптической прозрачности. Степень прозрачности оценивается величиной интегрального светопропускания. Кроме этого, необходимо сделать еще одно замечание относительно результатов, приведенных в [10]. Все они относятся к плоскопараллельным пластинам. Цилиндрическая поверхность исследуемых образцов внесет коррективы в полученные результаты.

### Влияние на прозрачность сапфировых труб механической и термической обработки

Рассмотрим возможность повышения оптической прозрачности сапфира. Хорошо известно [13], что в процессе выращивания сапфировой трубы можно снижать концентрацию поверхностных пор путем подбора оптимальной конструкции формообразователя и режимов направленной кри-

сталлизации. В то же время избежать полного отсутствия указанных дефектов невозможно. Поэтому в производстве сапфира прибегают к механической обработке поверхности трубы. Так как пузыри располагаются почти непрерывной дугой вдоль наружной и внутренней поверхности трубы, их можно убрать шлифовкой и полировкой, удаляя поверхностные слои на глубину 0,2–0,25 мм. Необходимо отметить, что при полировании оптических кристаллов особенности тонкого приповерхностного слоя, искаженного многостадийным взаимодействием с абразивом, сказывается на коэффициенте отражения будущих сапфировых оболочек. В частности, интенсивности отражения монотонно растут, а их полуширины падают по мере уменьшения диаметра частиц абразива. Несмотря на указанные потери, возрастание оптического пропускания после механической шлифовки и полировки достигает до 10 %.

В подтверждение выше сказанному, нами проведены исследования спектрального распределения коэффициента пропускания образцов сапфировых труб, выращенных по методу А. В. Степанова. При этом один образец трубы не подвергался механической обработке, а у второго выполнена шлифовка и полировка внутренней и внешней поверхностей до 14 класса чистоты. Исследования прозрачности проводились на спектрофотометре СФ-26 и Фурье-спектрометре ФСМ 1201. Необходимо отметить, что во избежание искажений результатов измерения коэффициента пропускания использовались сегменты сапфировых труб диаметром более 20 мм. Полученные результаты представлены на рис. 2.

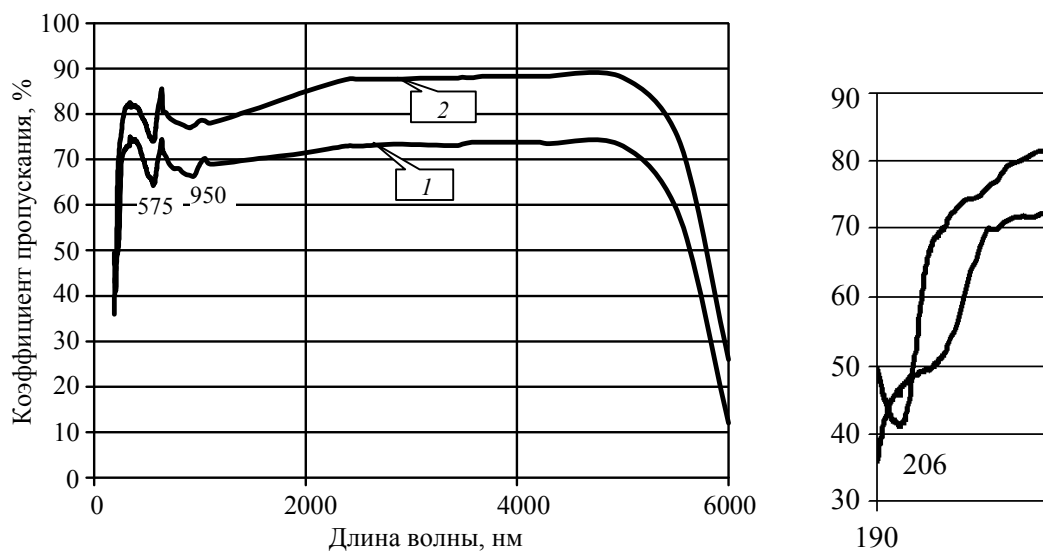


Рис. 2. Спектральное пропускание сапфировых труб с толщиной стенки 1,3 мм: 1 – отсутствие механической обработки; 2 – шлифовка и полировка внутренней и наружной поверхности трубы

Из приведенных данных следует, что выполнение шлифовки и полировки позволяет достичь величины коэффициента пропускания сапфира до 90 %, что на 10 % выше, чем в случае образцов без механической обработки. Важно отметить в случае полированной поверхности еще один важный эффект. Использование высокотемпературного отжига в вакууме ( $7 \times 10^{-4}$  мм рт. ст.) в течение  $t = 1,5$  и 8 часов при температуре  $1980^\circ\text{C}$  способствует повышению прозрачности сапфира. При этом, чем меньше толщина нарушенного слоя после механической обработки, тем более прозрачнее образец после высокотемпературного нагрева. Наблюдаемое изменение прозрачности обусловлено рекристаллизацией дефектного приповерхностного слоя. Результаты отжига приводят к уменьшению числа элементарных отражающих площадок и, как следствие, числа многократных отражений, вносящих основной вклад в снижение прозрачности обработанной поверхности.

Таким образом, исходя из полученных данных и работ [4, 5, 13], интенсивность потока излучения плазмы, прошедшего сквозь нагретую оболочку, и температура разрядной трубки существенно зависят не только от технологии выращивания, но и дальнейшей обработки сапфировой трубы.

### **Изменение оптического пропускания сапфира в условиях собственного УФ-излучения плазмы и радиационных воздействий**

В процессе направленной кристаллизации корундовой трубы в структуре монокристалла появляются точечные дефекты и центры окраски [11, 13]. Проникновение выходящего из плазмы излучения в толщу сапфировой оболочки приводит к его поглощению центрами окраски в УФ- и видимом диапазонах. Такие механизмы больше характерны для ионизирующих излучений. Поэтому в данном разделе мы рассмотрим указанные явления совместно.

Из литературных источников, например работы [14], известно, что поглощение сапфира при длинах волн 220, 285, 330, 380, 470, и 538,8 нм характерно для примесей магния. Ванадий поглощает в областях 240, 315, 400–405, 575–580 нм, титан в трехвалентном состоянии в полосах 487–494,8 нм, а в четырехвалентном – в полосе 250 нм. Примеси хрома в количестве  $3 \times 10^{-4}$  вес. % сдвигают УФ границу пропускания с 140 до 200 нм.

В случае бездефектных кристаллов корунда поглощение в области линий 175, 206, 230, и 400 нм связывается с наличием электронных и ды-

рочных центров окраски. Полосы 206 и 230 нм приписывают переходам в F-центрах, а 400 нм соответствует V-центру.

Таким образом, возвращаясь к рис. 2, можно сделать заключение, что в исследуемых образцах наблюдались примеси ванадия (575 нм) и F-центры (206 нм), наличие которых в отсутствие ионизиационного облучения не совсем понятно. Наличие полосы 950 нм нами пока не идентифицировано.

### **Воздействие УФ-излучения**

У большинства излучающих плазменных сред в спектральном составе выходящего потока значительную долю составляет УФ-диапазон. В качестве примера в работе [5] представлено расчетное спектральное распределение КПД излучения импульсной цезиевой лампы высокого давления с диаметром и длиной разрядного канала, соответственно, 7 и 90 мм. При средней мощности на лампе 3 кВт расчетный КПД излучения в спектральном диапазоне 270–400 нм составит 11,8 %. Поэтому при такой мощности УФ-излучения, проходящего сквозь оболочку, очень важно сохранение оптических свойств сапфира неизменными.

Коэффициент пропускания в ультрафиолете особенно чувствителен к чистоте и структурному совершенству кристаллов, на которое оказывают влияние технологические особенности процесса роста. В процессе производства газоразрядной лампы из выращенной сапфировой трубы вырезается необходимый для изготовления отрезок и важным является какой стадии процесса направленной кристаллизации (начальной, средней или конечной) соответствует этот участок, какой использован материал тигля: молибденовый, вольфрамовый, иридиевый, какой по счету процесс проводился в этом тигле [13]. Это, по-видимому, связано как с некоторой очисткой тигля от летучих примесей в процессе эксплуатации и улучшением структуры его поверхности, соприкасающейся с расплавом, так и изменением условий кристаллизации, например, постепенное накопление некоторых примесей в монокристалле (хром, ванадий и т. д.).

Авторами данной публикации изучалось изменение прозрачности монокристаллических корундовых труб различной цветности под воздействием одиночных вспышек импульсной коаксиальной ксеноновой лампы УФ-излучения. Исследуемый образец помещался во внутреннюю полость лампы. В момент вспышки от источника подсветки излучение направлялось на торцевую

полированную поверхность сапфировой трубы, а с другого полированного торца фокусировалось в монохроматор и сигнал с ФЭУ регистрировался на осциллографе. В результате получено, что снижение прозрачности при длине волны 400 нм у бесцветных сапфировых труб не наблюдается, а у образцов, имеющих розовую окраску (предположительно наличие примеси хрома и титана) коэффициент пропускания снижается на 10–50 %. Проведенный химико-спектральный анализ показал, что в розовых образцах процентное содержание примесей составляет:

Таблица 1

Содержание примесей в исследуемых образцах (весовые %)

Молибден	Хром	Железо	Титан
$3 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$

Следует отметить, что не только концентрация инородных атомов определяет коэффициент поглощения. Он также будет изменяться в зависимости от величины потенциалов ионизации этих примесей. Более того, при работе лампы, в нагретых до высоких температур монокристаллических корундовых оболочках могут наблюдаться явления переноса заряда между активаторами.

### Радиационное воздействие

Характер спектров пропускания одинаков для различных видов ионизирующих излучений [15], что позволяет выделить для исследований один специальный фактор: непрерывное гамма-излучение.

Основной характеристикой оболочек для промышленных газоразрядных ламп (натриевые источники света, лампы накачки лазеров и т. д.) является интегральное пропускание сапфира в ви-

димом диапазоне. Авторами данной работы для контроля интегрального светопропускания была разработана установка и методика измерений. Поскольку корундовые трубки имеют направленно-диффузное пропускание, измерения проводят по светопропусканию боковой поверхности трубки в шаровом фотометре. Корундовая трубка помещается в светометрический шар Ульбрихта и освещается изнутри лампой накаливания. Световой поток, выходящий от лампы накаливания, проходит через стенки трубки и попадает на фотометрическую головку и измерительный блок. Сигнал на выходе пропорционален световому потоку, а значит и коэффициенту пропускания боковой поверхности. Для образцов различной цветности в табл. 2 представлены значения интегрального пропускания в видимой области спектра.

Как видно из представленных результатов интегральное светопропускание зависит от исходного цвета исследуемого образца. При этом после  $\gamma$ -облучения дозой  $5 \times 10^7$  рентген исходная цветность сапфира изменяется. Например, в случае розового образца с примесным составом, приведенным в табл. 1, после  $\gamma$ -облучения дозой  $5 \times 10^7$  рентген появляются серые оттенки. Кроме этого, у исследуемого образца в видимом диапазоне возрастает интегральное светопропускание (см. табл. 2).

Данное явление связано со сдвигом УФ границы прозрачности сапфира в видимую область (рис. 3) и возрастанием коэффициента пропускания с длины волны около 500 нм. Причина сдвига границы прозрачности подробно рассмотрена в [16] и обусловлена тем, что интенсивность высокоэнергетических полос поглощения центров окраски в спектре наведенного поглощения выше, чем низкоэнергетических, а рост прозрачности после воздействия радиации со снижением концентрации V – центров, но данное предположение требует экспериментальной проверки.

Таблица 2

Интегральное пропускание сапфировых труб в видимом диапазоне до и после  $\gamma$ -облучения дозой  $5 \times 10^7$  рентген

Номер образца	Цвет образца		Интегральное пропускание, %	
	До облучения	После облучения	До облучения	После облучения
1	Розовый	Серо-розовый	94,0	95,0
2	Бесцветный	Светло-серый	97,1	97,6
3	Розовый	Серо-розовый	98,7	98,2
4	Бесцветный	Желтый	97,0	98,7

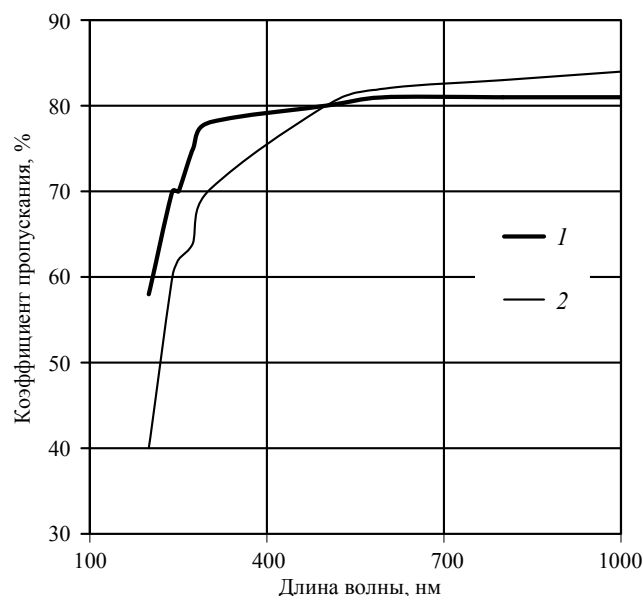


Рис. 3. Спектральное пропускание розового образца трубы до (1) и после (2) облучения дозой  $10^5$  рентген

### Заключение

Представленные в данной работе результаты имеют практическое значение при разработке импульсных источников излучения в видимом и УФ диапазонах спектра. При этом при использовании в конструкции сапфировой трубы, выращенной по методу А. В. Степанова, необходимо учитывать следующие рекомендации:

- Для оболочки требуется использовать участок корундовой трубы, выращенный в середине процесса направленной кристаллизации.
- Перед изготовлением колбы требуется провести химико-спектральный анализ на наличие примесей и дефектов в монокристаллической структуре.
- Выполнить механическую обработку (шлифовку и полировку) внутренней и внешней цилиндрических поверхностей на глубину до 0,25 мм до 14 класса чистоты с целью устранения приповерхностных газонаполненных пор.

- Провести отжиг колб в вакууме ( $7 \times 10^{-4}$  мм рт. ст.) в течение 1–5 часов при температуре 1980 °С.

Авторы выражают надежду, что представленные в данной работе результаты позволят разработчикам плазменных устройств сократить область экспериментального исследования при создании оптимальной конструкции прибора на основе монокристалла сапфира.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 42.
2. Тумашевич К. А., Киреев С. Г., Шапковский С. Г., Пугачев Д. Ю. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 608.
3. Гавриш С. В., Кугушев Д. Н., Пугачев Д. Ю., Пучнина С. В., Шапковский С. Г. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 69.
4. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.
5. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 45.
6. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пугачев Д. Ю., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 5. С. 480.
7. Маршак И. С., Дойников А. С., Жильцов В. П. и др. Импульсные источники света. / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.
8. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
9. Гавриш С. В., Петренко Н. Ю., Пугачев Д. Ю. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 1. С. 75.
10. Лингарт Ю. К., Петров В. А., Тихонова Н. А. // ТВТ. 1982. Т. 20. № 5. С. 872.
11. Добровинская Е. Р., Литвинов Л. А., Пищик В. В. Энциклопедия сапфира. – Харьков: Институт монокристаллов, 2004.
12. Aric Loytty. // Lighting Design and application. 1976. February. P. 14.
13. Гавриш С. В. // Технология машиностроения. 2008. № 6. С. 56.
14. Сатункин Г. А., Татарченко В. А., Цейтлин Е. М., Яловец Т. Н. // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. 1976. Т. 40. № 7. С. 1492.
15. Торопкин Г. Н. Основы надежности изделий квантовой электроники. – М.: Сов. Радио, 1983.
16. Арбузов В. И. Основы радиационного оптического материаловедения: учеб. пособие. – СПб: СПбГУИТМО. 2008.

## Influence of the structural perfection of sapphire on the optical characteristics of the shell of a pulsed discharge lamp

*S. V. Gavrish, V. V. Loginov, S. V. Puchnina, and R. M. Ushakov*

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd  
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia  
E-mail: [svgavr@list.ru](mailto:svgavr@list.ru)

*Received July 07, 2022*

***The paper presents the results of studies of the influence on the optical transmission of defects in the structure of a sapphire tube grown by the method of A.V. Stepanov, changes in the transparency of a single crystal after mechanical surface treatment and ultraviolet and radiation exposure.***

***Keywords:*** sapphire, corundum, shell, pulsed discharge lamp, optical transmission, structural defects, ultraviolet radiation, gamma radiation.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-404-410

### REFERENCES

1. S. V. Gavrish, Applied Physics, No. 4, 42 (2011) [in Russian].
2. K. A. Tumashevich, S. G. Kireev, S. G. Shashkovsky, and D. Yu. Pugachev, Usp. Prikl. Fiz. **7** (6), 608 (2019).
3. S. V. Gavrish, D. N. Kugushev, D. Yu. Pugachev, S. V. Puchnina, and S. G. Shashkovsky, Applied Physics, No. 3, 69 (2020).
4. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, Usp. Prikl. Fiz. **6** (4), 333 (2018).
5. S. V. Gavrish, Applied Physics, No. 4, 45 (2010) [in Russian].
6. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, D. Y. Pugachev, and S. V. Puchnina, Usp. Prikl. Fiz. **7** (5), 480 (2019).
7. I.S. Marshak, A.S. Doinikov, V.P. Zhiltsov, et al., *Pulsed light sources*, 2nd ed. revised. and additional. (Energy, Moscow, 1978).
8. G. N. Rokhlin, *Discharge light sources*. (Energoatomizdat, Moscow, 1991).
9. S. V. Gavrish, N. Yu. Petrenko, and D. Yu. Pugachev, Usp. Prikl. Fiz. **8** (1), 75 (2020).
10. Yu. K. Lingart, V. A. Petrov, and N. A. Tikhonova, TVT **20** (5), 872 (1982).
11. E. R. Dobrovinskaya, L. A. Litvinov, and V. V. Pishchik, *Sapphire Encyclopedia*. (Institute of Single Crystals, Kharkov, 2004).
12. Aric Loytty, Lighting Design and application, February, 14 (1976).
13. S. V. Gavrish, Engineering Technology, No. 6, 56 (2008).
14. G. A. Satunkin, V. A. Tatarchenko, E. M. Zeitlin, and T. N. Yalovets, Izv. USSR Academy of Sciences, ser. Physical **40** (7), 1492 (1976).
15. G. N. Toropkin, *Fundamentals of reliability of products of quantum electronics*. (Sov. Radio, Moscow, 1983).
16. V. I. Arbuzov, *Fundamentals of Radiation Optical Materials Science: tutorial*. (SPbGUITMO, St. Petersburg, 2008).