

УДК 621.327.2

М.К. Самохвалов

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Самохвалов Михаил Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, профессор кафедры «Проектирование и технология электронных средств» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи и монографии в области оптоэлектроники. [e-mail: sam@ulstu.ru].

Аннотация

Проведены теоретический анализ и экспериментальные исследования процессов рассеяния электрической мощности и разогрева в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах в рабочих режимах. Анализ тепловых потоков в тонкопленочной структуре позволил разработать тепловую схему электролюминесцентного конденсатора. Проведен расчет численных значений элементов тепловой схемы с учетом особенностей свойств материалов и конструкций излучателей. Исследования показали, что электрическая мощность, выделяемая в пленке люминофора в виде тепла, рассеивается в основном через стеклянную подложку. Установлено, что величина теплового сопротивления тонкопленочного электролюминесцентного конденсатора составляет 300–350 К/Вт и тепловая постоянная 150–200 с. Разогрев тонкопленочной структуры не превышает 10–15 К и не может привести к деградации излучающего индикаторного элемента.

Ключевые слова: тонкопленочный электролюминесцентный конденсатор, тепловое сопротивление, люминофор, электролюминесценция, индикатор.

THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THIN-FILM ELECTROLUMINESCENT CAPACITORS

Mikhail Konstantinovich Samokhvalov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor; graduated from the Faculty of Physics of Saratov State University; Professor at the Department of Design and Technology of Electronic Devices at Ulyanovsk State Technical University; an author of articles and monographs in the field of optoelectronics. e-mail: sam@ulstu.ru.

Abstract

Theoretical analysis and experimental studies of the processes of electric power dissipation and heating in thin-film electroluminescent capacitors in operating modes are carried out. The analysis of heat fluxes in a thin-film structure allowed to develop the thermal scheme of the electroluminescent capacitor. The calculation of numerical values of the thermal scheme elements taking into account features of properties of materials and designs of radiators is carried out. Studies have shown that the electrical power generated in the phosphor film in the form of heat is dissipated mainly through the glass substrate. It is established that the thermal resistance of a thin-film electroluminescent capacitor is 300-350 K/W and the thermal constant is 150-200 s. Heating of a thin-film structure does not exceed 10-15 K and cannot lead to degradation of the emitting indicator element.

Key words: thin film electroluminescent capacitor, temperature resistance, phosphor, electroluminescence, indicator.

ВВЕДЕНИЕ

Для тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов, работающих на переменном напряжении, величина светоотдачи может достигать 8–12 лм/Вт [1–3]. Вместе с тем соответствующий энергетический выход не превышает нескольких процентов, большая часть потребляемой прибором мощности рассеивается в виде тепла, и незначительная часть может переходить

в звуковую энергию из-за пьезоэлектрических свойств сульфида цинка [4]. В связи с этим представляют интерес изучение процессов рассеяния тепла в тонкопленочной структуре и исследование теплофизических характеристик. Основные функциональные характеристики устройств слабо зависят от изменения температуры: яркость излучения при температуре от 100 до 400 К изменяется на несколько процентов, зарядовые характеристики практически не зависят от температуры [2, 3].

Большой интерес представляет изучение разогрева на надежность тонкопленочных структур, на свойства диэлектрических слоев, в частности на электрическую прочность, на долговечность работы излучателей. В связи с этим целью исследований стал анализ процессов рассеяния тепла в слоях тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов в рабочих режимах для расчета теплофизических параметров.

АНАЛИЗ ТЕПЛОЙ СХЕМЫ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КОНДЕНСАТОРА

Основными физическими процессами, протекающими в пленке люминофора в условиях возбуждения тонкопленочного излучателя переменным напряжением, являются генерация свободных носителей, их ускорение сильным электрическим полем, возбуждение центров свечения и их переход в невозбужденное состояние с излучением фотонов [3]. При этом в диэлектриках протекают токи смещения, а в люминофоре – ток проводимости, приводящий к выделению тепловой энергии. Выделение энергии происходит в пленке при рассеянии носителей, их захвате ловушками прианодной границы раздела люминофор-диэлектрик, безызлучательных переходах центров свечения в невозбужденное состояние и др. Тепловые потоки выходят с обеих сторон слоя люминофора: с одной стороны через пленку диэлектрика нагревается непрозрачный электрод, с другой стороны через пленки диэлектрика и прозрачного электрода тепло рассеивается в стеклянной подложке. Величина этих потоков определяется геометрическими размерами и теплопроводностью материалов пленок и подложки. Внешние поверхности электрода и подложки обмениваются теплом с окружающей средой вследствие конвекции и теплоизлучения. Граничащая с окружающей средой поверхность стеклянной подложки охлаждалась вследствие конвекции воздуха, так как в проводимых нами исследованиях использовались в основном негерметизированные образцы. Поскольку все материалы пленочных структур, за исключением пленочного электрода, обладали высокой прозрачностью в видимой и инфракрасной области спектра, то можно считать, что теплообмен излучением обусловлен лишь непрозрачным металлическим электродом.

При анализе тепловых схем тонкопленочных структур предполагалось, что рассеяние мощности происходит равномерно по площади люминофора и этот процесс является стационарным. Равномерность рассеяния мощности косвенно подтверждается равномерной яркостью свечения излучателей в рабочих режимах, а стационарность процесса – постоянным уровнем электрических и оптических характеристик электролюминесцентных конденсаторов.

Тепловая модель тонкопленочной структуры, находящейся в условиях теплового равновесия с окружающей средой в рабочем режиме, может быть представлена в следующем виде (рис. 1). В состав полной тепловой схемы входят тепловые сопротивления пле-

нок диэлектрика (R_D); тепловые сопротивления пленок верхнего и нижнего электродов ($R_{ВЭ}$ и $R_{НЭ}$); тепловые сопротивления, обусловленные теплообменом между верхним электродом и окружающей средой вследствие излучения, конвекции и теплопроводности электрического контакта ($R_{ЭИЗЛ}$, $R_{ЭКОНВ}$ и $R_{ЭКОHT}$ соответственно); тепловое сопротивление подложки под электродом ($R_{П}$); тепловое сопротивление, обусловленное теплопроводностью вдоль подложки ($R_{ПП}$), и тепловое сопротивление, обусловленное теплообменом между стеклянной подложкой и окружающей средой за счет конвекции ($R_{ПКОНВ}$).

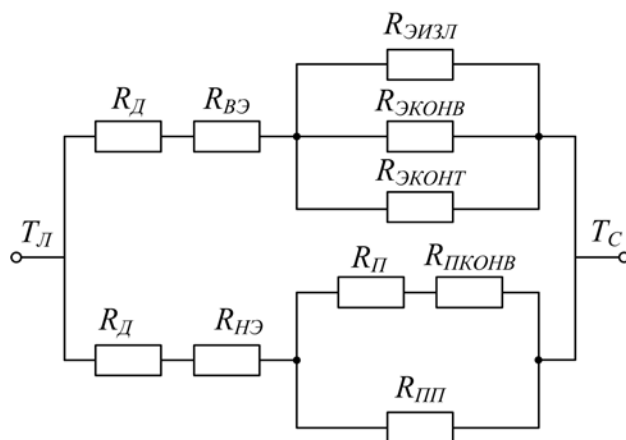


Рис. 1. Тепловая схема тонкопленочной электролюминесцентной структуры: T_L – температура люминофора; T_C – температура окружающей среды

Тепловое сопротивление участка цепи R определяется как отношение разности температур между двумя изотермическими поверхностями тела ΔT к тепловому потоку через них q [5]:

$$R = \Delta T/q.$$

Величина теплового потока сравнима с удельной мощностью электрического тока P , протекающего через пленку люминофора в рабочих условиях. Расчет рассеиваемой электрической мощности имеет свои особенности для светоизлучающих приборов. В стандарте EIA/JEDEC JESD51-1 для теплового сопротивления светодиодов говорится о «мощности, рассеиваемой прибором», но не поясняется, как ее рассчитать [6]. Для кремниевых диодов электрическая мощность, подводимая к диоду, рассчитывается как произведение общего прямого тока на прямое напряжение. Для светоизлучающих диодов компонента мощности, связанная с излучательной рекомбинацией, составляет значительную часть (25–50 %) от общей величины [6]. Поэтому часть электрической мощности, связанная с генерацией излучения, не должна быть включена в расчет рассеиваемого тепла, поскольку связанная с ним энергия излучается в виде света. Для тонкопленочных электролюминес-

центных конденсаторов доля электрической мощности, рассеиваемой в виде света, значительно меньше, не превышает 5–7 % от общей рассеиваемой электрической мощности, поэтому погрешность определения теплового сопротивления этих излучателей значительно меньше.

При возбуждении переменным синусоидальным напряжением величина рассеиваемой электрической мощности для исследованных структур составляла от 1 до 50 мВт/мм². Разность температур поверхности, стеклянной подложки и окружающей среды для установившихся режимов не превышала 10–15 К. Оценка величины полного теплового сопротивления исследованных структур давала значения 300–350 К/Вт. Для оценки распределения в структуре тепловых потоков необходимо рассчитать величины составляющих полного теплового сопротивления тонкопленочных конденсаторов, представленных на тепловой схеме (рис. 1).

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН КОМПОНЕНТОВ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ

Оценка величин каждого из тепловых сопротивлений, включенных в тепловую схему тонкопленочной электролюминесцентной структуры (рис. 1), проводилась по формулам [5, 7] для расчетов теплофизических параметров компонентов электронной аппаратуры.

Для теплового сопротивления, обусловленного теплопроводностью [5],

$$R_T = \frac{l}{\lambda \cdot S},$$

где l – толщина слоя, λ – коэффициент теплопроводности материала, S – площадь конденсатора.

Тепловое сопротивление, обусловленное теплообменом излучением, рассчитывалось следующим образом [5]:

$$R_H = \left[5,67 \cdot \varepsilon_{ПР} \cdot S \frac{(T_H/100)^4 - (T_C/100)^4}{(T_H - T_C)} \right]^{-1},$$

где T_H – температура нагретого материала, $\varepsilon_{ПР}$ – приведенный коэффициент черноты (для алюминиевых электродов, использованных в экспериментах $\varepsilon_{ПР} \approx 0,05$ [7]).

Тепловое сопротивление, обусловленное теплообменом за счет конвекции воздуха, рассчитывалось по формуле [5]:

$$R_K = \left[(1,42 \div 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot t_m) \cdot S \cdot N \cdot \sqrt[4]{(T_H - T_C)/L} \right]^{-1},$$

где $t_m = (T_H - T_C)/2 - 273$;

N – коэффициент, определяемый пространственным положением конструкции (для вертикальной пластины $N=1$; для горизонтальной, рассеивающей потоки вверх – $N=1,3$; вниз – $N=0,7$;

L – определяющий размер в миллиметрах (максимальный размер пластины) [7].

Исходные расчетные величины для использованных материалов слоев и подложки тонкопленочной структуры представлены в таблице [8].

Таблица

Тепловые параметры материалов, использованных в тонкопленочных излучателях

Материал	ZnS	Al	SnO ₂	ZrO ₂	Стекло
Плотность d , г/см ³	4,1	2,7	6,95	5,0	3,0
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	16	210	2	3,5	1,25
Теплоемкость C , Дж/(кг·К)	485	900	349	500	892
Толщина l , мкм	1	0,2	0,2	0,2	2,3·10 ³

Большая часть различных экспериментальных исследований проводилась для тонкопленочных структур с круглыми алюминиевыми верхними электродами диаметром $\approx 1,6$ мм, поэтому оценка проводилась для площади ≈ 2 мм².

Расчеты значений тепловых сопротивлений тонких пленок диэлектрика, прозрачного электрода и верхнего электрода составили относительно малые величины: $R_D \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$ К/Вт, $R_{НЭ} \approx 10^{-2}$ К/Вт и $R_{ВЭ} \approx 10^{-3}$ К/Вт. Отсюда следует, что разность температур люминофора и внешних поверхностей электродов можно считать одинаковой.

Рассеяние тепла верхним непрозрачным электродом определяется процессами теплового обмена с окружающей средой излучением, конвекцией и теплопередачей через контактный электрод. Тепловое сопротивление, обусловленное излучением, составило по нашим расчетам $R_{ЭИЗЛ} \approx 7,5 \cdot 10^5$ К/Вт. В тонкопленочных индикаторах для увеличения контрастности используют черный контрастный слой малой толщины ($\approx 0,1$ мкм) [2]. Его приведенная чернота близка к единице и тепловое излучение этого слоя будет примерно на порядок больше, чем алюминиевой пленки. В этом случае тепловое сопротивление, обусловленное излучением, будет составлять $\approx 10^5$ К/Вт. Рассчитанное значение теплового сопротивления, обусловленное теплообменом конвекцией, для воздуха как окружающей среды составляло $R_{ЭКОНВ} \approx 1,8 \cdot 10^5$ К/Вт. Следует отметить, что в ряде работ при герметизации тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов в корпус заливалось силиконовое масло, в этом случае величина теплового сопротивления будет меньше на два порядка [3] и составит $\approx 10^3$ К/Вт. В наших исследованиях образцы не герметизировались таким способом, при измерениях использовался латунный прижимной контакт, его тепловое сопротивление составляло ≈ 50 К/Вт. Однако площадь контакта была много меньше площади электрода, и теплоотвод через контакт мог приводить

к тому, что поверхность электрода нельзя было считать изотермической. Тогда необходимо учитывать распределенное тепловое сопротивление пленки верхнего алюминиевого электрода, его оценка давала величину $\approx (5\div 8) \cdot 10^3$ К/Вт. Таким образом, общая величина теплового сопротивления, обусловленного теплопроводностью контактов, определялась сопротивлением пленки электрода. Для тонкопленочных электролюминесцентных матричных панелей прижимной контакт не применяется, и тепловое сопротивление определяется теплопроводностью проводящих дорожек, оценка теплового сопротивления давала значения $\approx 10^4$ К/Вт.

Таким образом, для теплового потока, направленного от слоя люминофора через верхний непрозрачный электрод, значение теплового сопротивления определяется в основном сопротивлением пленки электрода и составляет величину $\approx 10^3\div 10^4$ К/Вт.

Для теплового потока слоя люминофора через нижний прозрачный электрод тепловое сопротивление обусловлено теплопроводностью стеклянной подложки и теплообменом конвекцией с наружной стороны подложки. Тепловое сопротивление участка стеклянной подложки непосредственно под электродом составляет величину $R_{\text{пл}} \approx 1 \cdot 10^3$ К/Вт, а тепловое сопротивление, обусловленное конвекционным теплообменом, $\approx 2 \cdot 10^4$ К/Вт. Вместе с тем необходимо учитывать рассеяние тепла за счет теплопроводности вдоль стеклянной подложки. Если принять расстояние, на которое происходит теплопередача, равным 1–2 толщинам стеклянной подложки, т. е. $\approx 2\div 5$ мм, то значение теплового сопротивления составит $\approx 250\div 400$ К/Вт. Эта величина и будет определять значение общего теплового сопротивления, которое по порядку величины соответствует экспериментальным данным.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что выделяемая в пленке люминофора тепловая энергия рассеивается в основном через стеклянную подложку и разогрев тонкопленочной структуры в установленном рабочем режиме при возбуждении переменным напряжением не превышает $10\div 15$ К. Эти данные показывают, что возможная деградация параметров и пробой тонкопленочных конденсаторов не могут быть вызваны перегревом структур в рабочих режимах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования были проведены для тонкопленочных электролюминесцентных структур на основе люминесцентных пленок сульфида цинка, легированного марганцем. Данные электролюминесцентные конденсаторы были получены и экспериментально исследованы в технологической лаборатории кафедры «Проектирование и технология электронных средств» Ульяновского государственного технического университета [9].

Проведенные экспериментальные измерения изменения температуры тонкопленочных электролюминес-

центных структур вследствие рассеяния электрической мощности в рабочих режимах подтвердили результаты теоретического анализа. Подробное описание методики измерения мощности и температуры приведены в работе [10]. На рисунке 2 представлена типичная зависимость температуры металлического электрода электролюминесцентного конденсатора от средней полной электрической мощности, рассеиваемой в пленке люминофора излучателя. Как видно на рисунке, эта зависимость носит линейный характер, отклонение от линейности наблюдалось в начале участка графика для малых значений рассеиваемой мощности. Значения теплового сопротивления, определенные из экспериментальных измерений, составили $300\div 350$ К/Вт.

Анализ и расчет значений тепловых сопротивлений был проведен для установившихся тепловых полей. Для оценки процессов изменения температуры в структурах при включении и выключении возбуждающего напряжения необходимо учитывать не только тепловое сопротивление, но и теплоемкость образца. Значение теплоемкости тонкопленочной структуры рассчитывается как сумма теплоемкостей входящих в нее компонентов [5]:

$$C_T = \sum_i C_i d_i \cdot V_i,$$

где C_i – удельная теплоемкость материала пленки или подложки;

d_i и V_i – плотность и объем i -го материала в структуре соответственно.

Теплоемкость структуры рассчитывалась с использованием данных таблицы.

Тепловая постоянная, характеризующая длительность процесса установления теплового равновесия, определялась по формуле [6]:

$$\tau_T = R_T \cdot C_T.$$

Оценка величины тепловой постоянной с использованием полученных значений теплового сопротивления и теплоемкости давала значения $\approx 100\div 200$ с. Рассчитанные значения достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными (рис. 3).

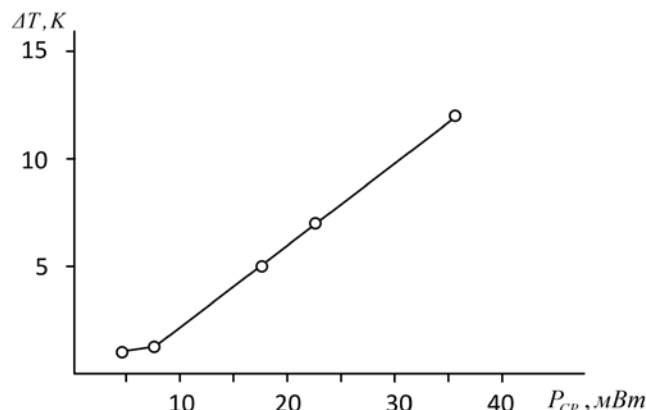


Рис. 2. Зависимость изменения температуры тонкопленочной структуры от средней рассеиваемой электрической мощности

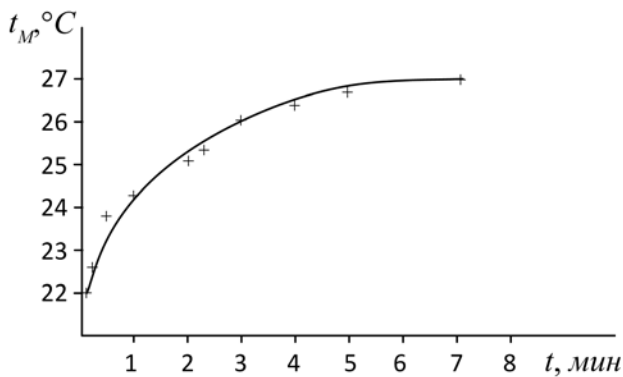


Рис. 3. Зависимость температуры тонкопленочной структуры от времени после приложения возбуждающего напряжения

На рисунке 3 представлена экспериментально полученная зависимость температуры металлического электрода тонкопленочной электролюминесцентной структуры от времени после включения возбуждающего напряжения в режиме излучения. Постоянная времени, характеризующая длительность процесса установления теплового равновесия, составляла ≈ 180 с, что соответствует результатам расчетов. Таким образом, после приложения возбуждающего напряжения в структуре не происходит резкого повышения температуры, которое могло бы привести к деградации электролюминесцентных излучателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования процессов рассеяния электрической мощности и разогрева в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах показали высокую эффективность рассеяния тепла в рабочих режимах. На основе анализа тепловых потоков в тонкопленочной структуре разработана тепловая схема электролюминесцентного конденсатора. Проведен расчет численных значений компонентов тепловой схемы с учетом особенностей свойств материалов и конструкций излучателей. Показано, что электрическая мощность, выделяемая в пленке люминофора в виде тепла, рассеивается в основном через стеклянную подложку. Установлено, что величина теплового сопротивления тонкопленочного электролюминесцентного конденсатора составляет 300–350 К/Вт и тепловая постоянная 150–200 с. Разогрев тонкопленочной структуры не превышает 10–15 К и не может привести к электрическому пробое и деградации характеристик излучающего индикаторного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самохвалов М.К. Элементы и устройства оптоэлектроники. – 2-е изд. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 223 с.
2. Technology. Thin Film Electroluminescent Displays // Beneq Products Oy, Finland, 2018. – URL: <http://lumineq.com/en/technology>.

3. Самохвалов М.К. Тонкопленочные электролюминесцентные источники излучения. – Ульяновск : УлГТУ, 1999. – 117 с.
4. Васильченко В.П., Войханский М.А., Матизен Л.А. Механические колебания в тонкопленочных электролюминесцентных устройствах // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1987. – № 12. – С. 91–92.
5. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М. : Высшая школа, 1984. – 247 с.
6. Ежов В. Стандартизация и расчет тепловых характеристик мощных светодиодов // Электронные компоненты. – 2009. – № 6. – С. 42–48.
7. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / А.А. Чернышев, В.И. Иванов, А.И. Аксенов, Д.Н. Глушкова. – М. : Энергия, 1980. – 216 с.
8. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий [и др.] – М. : Энергоатомиздат, 1986. – Т. 2. – 463 с.
9. Бригаднов И.Ю., Самохвалов М.К. Получение и свойства диэлектрических и люминесцентных пленок электролюминесцентных композиций на основе сульфида цинка // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 1998. – № 3. – С. 64–68.
10. Самохвалов М.К., Рябинов Е.Б. Рассеяние энергии в тонкопленочных электролюминесцентных структурах // Журнал прикладной спектроскопии. – 1993. – Т. 58, № 5–6. – С. 495–499.

REFERENCES

1. Samokhvalov M.K. *Elementy i ustroystva optoelektroniki. 2-e izd.* [Elements and Devices of Optoelectronics. 2nd Edition]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015. 223 p.
2. Technology. Thin Film Electroluminescent Displays. *Beneq Products Oy*, Finland, 2018. Available at: <http://lumineq.com/en/technology>.
3. Samokhvalov M.K. *Tonkoplennochnyye elektroluminestsentnyye istochniki izlucheniia* [Thin-Film Electroluminescent Emitting Sources]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 1999. 117 p.
4. Vasilchenko V.P., Voikhanskii M.A., Matizen L.A. *Mekhanicheskie kolebaniia v tonkoplennochnykh elektroluminestsentnykh ustroystvakh* [Mechanical Oscillations in Thin-Film Electroluminescent Devices]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika* [Proceedings of Higher Schools. Physics], 1987, no. 12, pp. 91–92.
5. Dulnev G.N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoi apparature* [Heat and Mass Transfer in Electronic Equipment]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1984. 247 p.
6. Ezhov V. *Standartizatsiia i raschet teplovykh kharakteristik moshchnykh svetodiodov* [Standardization and Calculation of Thermal Characteristics of Powerful LEDs]. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2009, no. 6, pp. 42–48.
7. Chernyshev A.A., Ivanov V.I., Aksenov A.I., Glushkova D.N. *Obespechenie teplovykh rezhimov izdelii elektronnoi tekhniki* [Ensuring of Thermal Modes of Products

of Electronic Equipment]. Moscow, Energiia Publ., 1980. 216 p.

8. Koritskiy Iu.V. et al. *Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam* [Handbook on Electrotechnical Materials]. Moscow, Energoatomizdat Publ., vol. 2, 1986. 463 p.

9. Brigadnov I.Iu., Samokhvalov M.K. Poluchenie i svoistva dielektricheskikh i liuminescentnykh plenok elektroluminescentnykh kompozitsii na osnove sulfida tsinka [Preparation and Properties of Dielectric and

Luminescent Films for Electroluminescent Compositions Based on Zinc Sulphide]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki* [Proc. of Higher Schools. Materials of Electronics Engineering], 1998, no. 3, pp. 64–68.

10. Samokhvalov M.K., Ryabinov E.B. Rasseianie energii v tonkoplennoknykh elektroluminescentnykh strukturakh [Energy Scattering in Thin-Film Electroluminescent Structures]. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy], 1993, vol. 58, no. 5–6, pp. 495–499.