

Keywords: thin film electroluminescence indicator, brightness, luminous efficiency, phosphor, activator centers, electroluminescence.

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИНДИКАТОРОВ НА РЕЖИМЫ ИХ РАБОТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР

О.В. Максимова, М.К. Самохвалов

*Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ)
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32*

Аннотация: Тонкопленочные электролюминесцентные структуры, возбуждаемые переменным током, являются перспективными активными плоскими индикаторными приборами, которые имеют ряд достоинств: высокую яркость, малую потребляемую мощность, высокие эффективность и срок службы и т.д. Имеется много публикаций с экспериментальными данными для электролюминесцентных светоизлучающих конденсаторов на основе сульфида цинка с марганцем или фторидами редкоземельных металлов и некоторыми другими люминофорами с различными диэлектрическими пленками. Изучены эффекты генерации носителей заряда и рассеяния энергии в тонкопленочных структурах. Основные характеристики индикаторных приборов определяются поляризационными эффектами, связанными с туннельной перезарядкой ловушек границы раздела люминофор-диэлектрик. Приведенные соотношения были адаптированы для разработки системы автоматизированного проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов. Произведена оценка влияния на электрические характеристики конструктивных параметров.

Ключевые слова: тонкопленочный индикатор, пороговое напряжение, максимально допустимое рабочее напряжение, электролюминесцентный конденсатор, электролюминесценция.

Введение

Тонкопленочные электролюминесцентные индикаторы (ТПЭЛИ) относятся к современным индикаторным устройствам и имеют высокий потенциал применения в качестве средств операторского интерфейса, особенно в специальной технике. Они представляют собой полностью твердотельную конструкцию и имеют высокие эксплуатационные показатели, такие как яркость, надежность, температурная стабильность, быстрое действие, большой угол обзора, радиационная стойкость.

Для создания средств автоматизации проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов была выбрана конструкция, которая является наиболее оптимальной для обеспечения высоких эксплуатационных показателей.

К настоящему времени достигнуты успехи в разработке и производстве индикаторов на основе тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов: определены физические основы работы этих приборов, материалы с требуемыми свойствами, разработан ряд конструкций.

Вместе с тем остаются недостаточно исследованными вопросы расчета основных функциональных характеристик приборов и проблемы автоматизации проектирования индикаторных элементов и устройств.

Исследование зависимости электрических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов от конструктивно - технологических факторов необходимо для определения математического аппарата и расчета функциональных параметров.

Анализ зависимости электрических характеристик от конструктивных параметров тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов.

Для проектирования ТПЭЛИ и расчета режимов работы устройств на их основе необходимо изучение влияния конструктивных параметров индикаторного элемента, который представляет собой тонкопленочный электролюминесцентный конденсатор (ТПЭЛК), на такие его характеристики как яркость, светоотдачу, пороговое напряжение, область безопасных для работы устройств напряжений (задача анализа) и решение обратной задачи, т.е. определение зависимости конструктивно – технологических факторов от электрических и светотехнических характеристик.

Рассмотрим ТПЭЛК (рис. 1.) со структурой МДЛДМ (прозрачный диэлектрик — люминофор — диэлектрик — металл). Диэлектрические слои структуры обладают высокими изолирующими свойствами и токами утечки можно пренебречь. Учитывая, что пленка люминофора является высокоомным полупроводником (для сульфида цинка удельное сопротивление составляет $(10^9 - 10^{10})$ Ом·см [1]), можно считать, что в предпороговом режиме активный ток через него не протекает и слой люминофора также является диэлектриком.

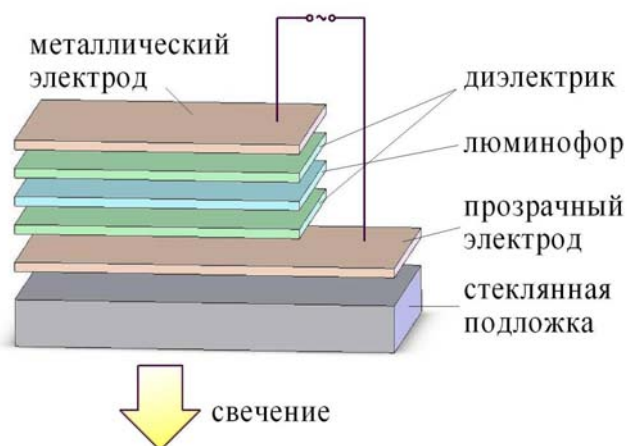


Рис. 1. Конструкция тонкопленочного электролюминесцентного источника излучения

Для своей работы ТПЭЛИ требуют знакопеременного напряжения, следовательно, в предпороговом режиме тонкопленочная структура представляет электролюминесцентный конденсатор, содержащий между обкладками (верхний и нижний электроды) последовательно три диэлектрических слоя.

При последовательном соединении соотношение суммарной емкости C и емкостей слоев ЭЛК определяется как

$$C^{-1} = C_{д1}^{-1} + C_{л}^{-1} + C_{д2}^{-1}$$

Заряд на обкладках каждой из последовательно включенной емкости равен заряду емкости всей структуры Q :

$$Q = Q_{д1} = Q_{д2} = Q_{л} \quad (1)$$

Здесь $C_{д1}$ и $Q_{д1}$, $C_{д2}$ и $Q_{д2}$, $C_{л}$ и $Q_{л}$ — емкости и заряд на обкладках конденсатора, образуемые первым, вторым диэлектрическим и люминесцентным слоями, соответственно.

Заряд на обкладках конденсатора определяется как $Q=C \cdot U$, где $U_{д1}$, $U_{д2}$, $U_{л}$ — падение напряжения на конденсаторе. Выражение (1) записываем в виде:

$$C \cdot U = C_{д1} \cdot U_{д1} = C_{д2} \cdot U_{д2} = C_{л} \cdot U_{л}, \quad (2)$$

где $U_{д1}$, $U_{д2}$, $U_{л}$ — падение напряжений, приходящиеся на первый, второй диэлектрические и люминесцентные слои, соответственно. Следовательно, в допороговом режиме падения напряжений на отдельных слоях конденсаторной структуры распределяются обратно пропорционально емкости каждого слоя.

При достижении порога включения ТПЭЛИ заряд всей структуры и заряд слоя люминофора будут равны:

$$Q = C \cdot U_{п} = Q_{л} = C_{пл} \cdot U_{пл} \quad (3)$$

где $U_{п}$ — пороговое напряжение включения полной структуры, $U_{пл}$ — падение напряжения, приходящееся на слой люминофора при достижении порога включения ТПЭЛИ.

Отсюда пороговое напряжение ТПЭЛИ связано с пороговым напряжением слоя люминофора как:

$$U_{п} = U_{пл} \frac{C_{л}}{C} \quad (4)$$

С учетом того, что емкости слоев ТПЭЛИ соединены между собой последовательно, выражение (4) принимает вид:

$$U_{п} = U_{пл} C_{л} \left(\frac{1}{C_{л}} + \frac{1}{C_{д1}} + \frac{1}{C_{д2}} \right) = U_{пл} \left(1 + \frac{(C_{д1} + C_{д2})C_{л}}{C_{д1} \cdot C_{д2}} \right) \quad (5)$$

Для того чтобы более наглядно показать зависимость порогового напряжения от конструктивных параметров конденсаторных слоев, необходимо детализировать формулу (5). Размеры электродов ТПЭЛИ много больше толщин слоев структуры, поэтому считаем ТПЭЛИ плоским. Поле можно считать однородным и пренебречь краевыми

эффектами. Тогда в формуле (5) выражаем емкости отдельных слоев C_i как емкости плоских конденсаторов

$$C_i = \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0 \cdot S / d_i,$$

где ε_i , d_i — соответственно, относительная диэлектрическая проницаемость и толщина отдельного слоя; S — площадь перекрытия обкладок конденсатора:

$$U_{\pi} = U_{\text{пл}} \left(1 + \frac{\left(\frac{\varepsilon_{д1} \varepsilon_0 S}{d_{д1}} + \frac{\varepsilon_{д2} \varepsilon_0 S}{d_{д2}} + \frac{\varepsilon_{л} \varepsilon_0 S}{d_{л}} \right)}{\frac{\varepsilon_{д1} \varepsilon_0 S}{d_{д1}} \cdot \frac{\varepsilon_{д2} \varepsilon_0 S}{d_{д2}}} \right) =$$

$$= U_{\text{пл}} \left(1 + \frac{\frac{\varepsilon_{д1} \varepsilon_{л}}{d_{д1} d_{л}} + \frac{\varepsilon_{д2} \varepsilon_{л}}{d_{д2} d_{л}}}{\frac{\varepsilon_{д1} \varepsilon_{д2}}{d_{д1} d_{д2}} + \frac{\varepsilon_{д1} \varepsilon_{д2}}{d_{д1} d_{д2}}} \right) = U_{\text{пл}} \left(1 + \frac{\varepsilon_{л} d_{д2} + \varepsilon_{л} d_{д1}}{\varepsilon_{д2} d_{л} + \varepsilon_{д1} d_{л}} \right) \quad (6)$$

В случае, когда оба диэлектрических слоя выполнены из одного и того же материала, т.е. $\varepsilon_{д1} = \varepsilon_{д2} = \varepsilon_{д}$, выражение (6) принимает более простой вид:

$$U_{\pi} = U_{\text{пл}} C \left(1 + \frac{(d_{д1} + d_{д2}) \varepsilon_{л}}{\varepsilon_{л} d_{л}} \right) = U_{\text{пл}} \left(\frac{\varepsilon_{д} d_{л} + \varepsilon_{л} d_{д}}{\varepsilon_{д} d_{л}} \right), \quad (7)$$

где $d_{д} = d_{д1} + d_{д2}$ — суммарная толщина диэлектрических слоев.

Значение порогового напряжения слоя люминофора определяется величиной напряженности электрического поля в люминофоре $E_{\text{пл}}$, необходимой для возникновения свободных носителей заряда, участвующих в возбуждении центров свечения в соответствии с соотношением $U_{\text{пл}} = E_{\text{пл}} \cdot d_{\text{пл}}$.

Отсюда, выражение (7) принимает вид:

$$U_{\pi} = E_{\text{пл}} \cdot \frac{\varepsilon_{д} d_{л} + \varepsilon_{л} d_{д}}{\varepsilon_{д}} \quad (8)$$

Выражения (7), (8) ранее встречались в работах [2,3-7], но вывод их был менее подробным. В работах [3,4,7] выражение (7) преобразовано к виду:

$$U_{\pi} = U_{\text{пл}} \left(1 + \frac{d_{д} / d_{л}}{\varepsilon_{д} / \varepsilon_{л}} \right) \quad (9)$$

Падение напряжения на всей структуре ТП ЭЛК равно:

$$U = U_{\text{л}} + U_{\text{д1}} + U_{\text{д2}} = E_{\text{л}} \cdot d_{\text{л}} + E_{\text{д1}} d_{\text{д1}} + E_{\text{д2}} d_{\text{д2}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{л}}$ и $E_{\text{л}}$, $U_{\text{д1}}$ и $E_{\text{д1}}$, $U_{\text{д2}}$ и $E_{\text{д2}}$ — падения напряжений и напряженности электрического поля, приходящиеся на слой люминофора, первый и второй диэлектрические слои, соответственно. В идеальном случае при превышении порога включения ТПЭЛИ падение напряжения и напряженность электрического поля в слое люминофора остается практически постоянной и равна пороговым значениям [8].

Максимально допустимое напряжение, прикладываемое к структуре, ограничивается выражением:

$$U_{\text{max}} < E_{\text{пл}} d_{\text{л}} + E_{\text{пр.д1}} \cdot d_{\text{д1}} + E_{\text{пр.д2}} \cdot d_{\text{д2}}, \quad (11)$$

где $E_{\text{пр.д1}}$, $E_{\text{пр.д2}}$ — пробивные напряженности первого и второго диэлектрических слоев, соответственно.

В случае, когда оба диэлектрических слоя выполнены из одного и того же материала, выражение (11) принимает вид:

$$U_{\text{max}} < E_{\text{пл}} d_{\text{л}} + E_{\text{пр.д}} \cdot d_{\text{д}} \quad (12)$$

Следовательно, повышения максимально допустимых напряжений, прикладываемых к ТПЭЛИ можно добиться за счет увеличения толщин диэлектрических и люминофорного слоев, а также при использовании материалов с большими значениями электрических прочностей материалов люминофора и диэлектрика. Учитывая, что с увеличением $E_{\text{пл}}$, $d_{\text{л}}$ и $d_{\text{д}}$ одновременно будет происходить увеличение порогового напряжения, предпочтительным вариантом является увеличение U_{max} за счет использования диэлектриков с большими значениями $E_{\text{пр.д}}$.

Исследование зависимости рассеиваемой мощности от конструктивных параметров необходимо для оценки области безопасных для работы ТПЭЛИ напряжений и определения взаимосвязи мощности рассеяния с электрическими параметрами слоев структуры, расчета их энергетических характеристик. Рассеяние энергии в пленке люминофора происходит, когда напряженность электрического поля в нем E превышает пороговое значение $E_{\text{п}}$ и начинает протекать ток проводимости. В идеальном случае в диэлектрических слоях ток проводимости отсутствует и протекает только ток смещения, поэтому рассеяния энергии в диэлектрике не происходит, и энергия рассеивается только в электролюминесцентном слое.

Выражение для средней рассеиваемой мощности, выделяющейся в пленке люминофора за период, изменение напряжения синусоидальной формы может быть записано в виде [8]:

$$P_{\text{ср.л}} = \frac{4f \cdot C_{\text{д}}^2}{C_{\text{д}} + C_{\text{л}}} \cdot U_{\text{п}} (U - U_{\text{п}}) \quad (13)$$

где f — частота возбуждающего напряжения U . Выражение (13) справедливо также и для процессов рассеяния энергии в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах при возбуждении знакопеременным импульсным и симметричным пилообразным напряжением.[9].

Учитывая выражение (4), запишем уравнение (13) в виде:

$$\begin{aligned} P_{\text{ср.л}} &= \frac{4f \cdot C_{\text{д}}^2}{C_{\text{д}} + C_{\text{л}}} \cdot U_{\text{пл}} \frac{C_{\text{л}}}{C} (U - U_{\text{л}}) = \\ &= 4f \cdot C_{\text{д}} \frac{C_{\text{д}} \cdot C_{\text{л}}}{C_{\text{д}} + C_{\text{л}}} \cdot \frac{1}{C} U_{\text{пл}} (U - U_{\text{л}}) \end{aligned} \quad (14)$$

Полученные выражения дают возможность оценить рассеиваемую в ТП ЭЛИ мощность в зависимости от конструктивных параметров — свойств материалов, используемых для создания индикаторов — диэлектрических проницаемостей, геометрических размеров — толщин слоев и площади перекрытия обкладок электродов для различных амплитуд и частот возбуждающего напряжения. Данные выражения можно использовать для разработки оптимальных конструкций ТПЭЛИ и выбора материалов диэлектрических слоев, обеспечения надежности их работы.

Снижение толщины диэлектрического слоя ведет к уменьшению порогового напряжения ТПЭЛИ, и одновременному увеличению значений рассеиваемой в пленке люминофора мощности. Можно заключить, что, несмотря на высокие напряжения, рассеиваемая в слое люминофора мощность много меньше той, которая рассеивается в микросхемах [10]. Это говорит о том, что при работе ТПЭЛИ не будет происходить перегрева индикатора, следовательно, не требуется специальных мер по теплоотводу, что подтверждено экспериментально [8,11].

Таким образом, приведенные выражения позволяют определить влияние конструктивных параметров тонкопленочного излучателя на пороговое и максимально допустимое напряжение, прикладываемое к структуре, т.е. оценить область рабочих напряжений ТПЭЛИ.

Для того чтобы поставить и решить задачи анализа в целях построения системы автоматизированного проектирования тонкопленочных электролюминесцентных элементов в индикаторных устройствах необходимо определить зависимость электрических характеристик от конструктивных параметров ТПЭЛИ. Проведенные теоретические исследования зависимости электрических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов от свойств пленок позволяют определить конструктивные требования к материалам и толщинам диэлектрических и люминесцентных слоев, исходя из требований к электрическим свойствам электролюминесцентных конденсаторов.

Результаты выполненных исследований позволяют дать рекомендации по методике расчета электрических параметров. Уточненные аналитические выражения для расчета электрических параметров ТПЭЛИ представляют собой математический аппарат для создания системы автоматизированного проектирования.

Приведенные исследования были финансированы за счет средств Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе

«Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») – государственный контракт №7462Р/10267 от 30.01.2010 г.

Выводы

1. Проведено исследование зависимости электрических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов от свойств пленок.
2. Проведено исследование зависимости порогового и максимально допустимого рабочего напряжения от конструктивных параметров конденсаторных слоев.
3. Установлена аналитическая зависимость основных электрических характеристик: порогового и максимально допустимого напряжения от электрических параметров и толщины пленок люминесцентных и диэлектрических материалов в тонкопленочных электролюминесцентных индикаторах.
4. Показана зависимость электрической мощности, рассеиваемой в пленке люминофора тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов, от свойств люминесцентных и диэлектрических пленок и условий возбуждения люминесценции (амплитуды и частоты переменного напряжения).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Верещагин, И.К.* Электролюминесцентные источники света [Текст] / И.К. Верещагин, Б.А. Ковалев, Л.А. Косяченко, С.М. Кокин – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 168 с.
2. *Muller, G.O.* Basics of electron impact-excited luminescence devices [Текст] / G.O. Muller // Phys. stat. Sol. (a). – 1984. – v.81. – P. 597 – 608.
3. *Гурин, Н.Т.* Взаимосвязь параметров диэлектрических слоев и порогового напряжения ТП ЭЛК [Текст] / Н.Т. Гурин //Электронная техника. Сер.3, Микроэлектроника.- 1990.- В.1 (135).- с.88-90.
4. *Гурин, Н.Т.* Анализ параметров ТП ЭЛК с разными диэлектрическими слоями. [Текст] / Гурин Н.Т. //Лазерная техника и оптоэлектроника.- 1992.-№ 3-4 (64-65).- С.74-77.
5. *Pratt, G.W.* Long-term charge Storage in interface states of ZnS MOS capacitors. [Текст] / G.W. Pratt L.G. Walker, // J.Appl.Phys/- 1975.- v.46.-№7.- p.2992-2997.
6. *Howard, W.E.* The importance of insulator properties in a thin-film electroluminescent device. [Текст] / W.E. Howard // IEEE Trans.Electron Dev.-1977. - v.ED-24. №7- p.903-906.
7. Проведение теоретических и экспериментальных исследований физических процессов, протекающих в самосканирующих устройствах и микроэлектронных средствах отображения информации. Теоретические и экспериментальные исследования физических процессов в самосканирующих оптоэлектронных устройствах: Отчет о НИР (промежут.) [Текст] /Ульяновский политехн. ин-т;Руководитель Н.Т.Гурин.- №90-02; №ГР 0188.0040947 ;Инд.02890010701 Ульяновск, 1988. – С.85.
8. *Самохвалов, М.К.* Электролюминесцентные процессы в тонкопленочных электролюминесцентных структурах [Текст] / М.К. Самохвалов Дис. докт.физ.-мат. наук.- Ульяновск, 1994.- 315 с.

9. *Мишин, А.И.* Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Мишин Александр Иванович, Математическое моделирование процессов рассеяния энергии в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах. Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ [Текст] / А.И. Мишин. - Ульяновск, 2007. – С.16.
10. *Кулешова, В.И.* Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник [Текст] / С.В.Якубовский, Л.И.Ниссельсон, В.И.Кулешова и др.; Под ред. С.В.Якубовского.- М.: Радио и связь, 1989.- С.496.
11. *Самохвалов, М.К., Пугачев С.Ф., Бригаднов И.Ю.* Спектральные характеристики тонкопленочных электролюминесцентных структур на основе ZnS. [Текст] / М.К.Самохвалов, С.Ф. Пугачев, И.Ю. Бригаднов // Тез.докл. 28-й науч.-техн.конф.УлПИ, ч.1. – Ульяновск. - 1994.- С.27-28.

**THE INVESTIGATION OF THE EFFECT
OF DESIGN PARAMETERS OF
THIN-FILM ELECTROLUMINESCENT INDICATORS
OF MODES OF OPERATION FOR THE DEVELOPMENT
OF SOFTWARE OF THE CAD SYSTEM**

O. Maksimova, M. Samokhvalov

*Ulyanovsk State Technical University
32, Sev. Venec st., Ulyanovsk, 432027, Russia*

Abstract: Thin-film electroluminescent alternating current driven structures are the perspective active flat indicator devices, which have a number of advantages: high brightness, small consumed power, high efficiency, long working life et.al. There are many publications about the experimental datas for electroluminescent light emitted capacitors on the bases of zinc sulphide with manganese or rare-earth metal fluorides and some other phosphors with various insulator films. Effects of charge carrier generation and energy dissipation are studied for thin-film structures. The main characteristics of indicator devices are explained by means of polarization effects connected with tunnel recharge of luminophore-insulator interface traps. These equations have been adapted for the development of CAD system of thin-film electroluminescent indicators. The presented of conspicuous electrical parameters dependence on the structural factors.

Keywords: thin film electroluminescence indicator, threshold voltage, maximum allowable voltage, electroluminescent capacitor, electroluminescence.