

УДК 681.883.7

*Максимова О.В., Максимов С.М.**Ульяновский государственный технический университет*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ ИЗМЕРЕНИЙ СВОТОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИНДИКАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы исследования процессов подготовки измерений светотехнических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств. Проанализированы физические свойства параметров индикаторов. Были разработаны подходы и процедуры, применимые для создания аппаратно-программного комплекса измерения светотехнических параметров тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных элементов. Анализ формализуемых этапов проведения измерений при наличии банка данных конструкций, параметров индикаторных элементов, методов измерения и перечня измерительных инструментов показал, что можно разработать автоматизированную систему подготовки эксперимента. Модули, входящие в программный комплекс передачи, обработки и хранения результатов измерений, разрабатываются в зависимости от вида выходных экспериментальных данных (графики, числовые массивы данных, численные значения параметров индикаторов).

Ключевые слова: тонкие пленки, электролюминесценция, индикатор, измерения, автоматизация, эксперимент, яркость, вольт-яркостная характеристика, толщины слоев.

*O. Maksimova, S. Maksimov**Ulyanovsk State Technical University*

MODELING OF PROCESSES FOR THE PREPARATION OF MEASUREMENTS LIGHTING CHARACTERISTICS TFEL DEVICES

Abstract. The article deals with the study of processes of preparation measurements lighting characteristics TFEL devices. We analyzed the physical properties of indicator parameters. Have developed approaches and procedures applicable to the creation of hardware and software measurement lighting parameters TFEL elements. Analysis of formalized steps of measuring, in the presence of a data bank structures, parameters of indicator elements, measurement methods and the list of measuring instruments showed that it is possible to develop an automated system for training experiment. Modules included in the software package transmission, processing and storage of the measurements are developed depending

on the type of output experimental data (graphic, numeric data arrays, numerical values indicators).

Key words: thin film, electroluminescence, indicator, measurement, automation, experiment, brightness, current–brightness characteristics, layer thickness.

Технология производства тонкопленочных электролюминесцентных дисплеев является уникальной в области разработки специальной техники. Сочетание технических и оптических характеристик таких дисплеев делает их непревзойденными для применения в самых сложных и взыскательных областях, в которых другие технологии могут быть неработоспособны. Разработчики средств отображения информации предпочитают применять ТПЭЛ дисплеи в техническом оборудовании и системах вследствие возрастающих требований заказчиков к качеству изображения, продолжительности жизненного цикла и надежности.

Сложность конструирования такого типа устройств связана с необходимостью обеспечения как высоких электрических показателей, так и светотехнических. Для этого необходимо проводить постоянный научно-исследовательский поиск новых конструкций и материалов тонкопленочных электролюминесцентных структур.

Технологической задачей разработки любого метода исследований является скорость и простота измерений, что может обеспечиваться автоматизацией управления параметрами измерительного процесса и автоматизацией регистрации результатов измерений [1–4]. При этом может использоваться комбинация различных методик измерения в одной установке.

Целью исследования является моделирование процессов подготовки измерений светотехнических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств с учетом их физических свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выделение этапов подготовки физического эксперимента и проведения измерений светотехнических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных структур;

2. Анализ экспериментальных процедур на предмет их формализации;
3. Определение элемента банков данных экспериментов, определяющих параметры тонкопленочных электролюминесцентных структур;
4. Разработка универсальных подходов к измерениям параметров наноструктурированных индикаторных устройств.

Для создания автоматизированной системы подготовки измерений параметров индикаторных устройств необходимо определить ее основные компоненты и их взаимосвязь. Прежде всего, для этого была составлена классификация параметров индикаторных устройств [5; 6]. Параметры различных типов индикаторов можно разделить на следующие группы:

1. Электрические параметры (ток, напряжение питания, мощность рассеяния).

Согласно [1], при малых значениях приложенного напряжения ($u < U_n$) внешнее напряжение распределяется в слоях структуры в соответствии с их геометрическими емкостями. В этом случае ток заряда электролюминесцентного конденсатора равен току смещения в люминесцентной и диэлектрической пленке:

$$i = C \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1.1)$$

При превышении внешним напряжением порогового значения ($U_n < u < U_A$) дальнейший рост приложенного напряжения не приводит к увеличению падения напряжения в люминофоре. Изменение приложенного напряжения полностью перераспределяется на слои диэлектриков. В этом случае полный ток в структуре равен току проводимости в слое люминофора и является зарядным током емкости диэлектрика:

$$i = C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1.2)$$

Для управления электролюминесцентными излучателями в реальных условиях широко применяется переменное напряжение, изменяющееся по гармоническому закону:

$$u = U_A \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1.3)$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – циклическая частота управляющего напряжения,
 f – частота изменения внешнего напряжения.

С учетом (1.3), производная напряжения по времени может быть записана следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = U_A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (1.4)$$

Тогда значения токов при напряжениях больше и меньше порогового могут быть выражены в следующем виде:

$$\begin{cases} i = C \cdot U_A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t), & u < U_n \\ i = C_0 \cdot U_A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t), & u \geq U_n \end{cases} \quad (1.5)$$

Рассматривая случай превышения приложенным напряжением порогового значения, можно определить амплитудное значение рабочего тока в электролюминесцентной структуре:

$$I_A = \varepsilon_0 \cdot S \cdot U_A \cdot \omega \cdot \left(\frac{d_{d1}}{\varepsilon_{d1}} + \frac{d_{d2}}{\varepsilon_{d2}} + \dots + \frac{d_{dm}}{\varepsilon_{dm}} \right)^{-1} \quad (1.6)$$

Полученное выражение характеризует зависимость значения тока проводимости от конструктивных факторов в ТПЭЛ-структуре. Это позволяет оценить потребляемую энергию при функционировании индикаторов.

2. Светотехнические параметры (яркость, светоотдача, контрастность, угол обзора, спектр излучения).

Основной характеристикой электролюминесцентных источников света является вольт-яркостная характеристика, то есть зависимость яркости излучения ТПЭЛ-индикаторного элемента от амплитуды и частоты приложенного напряжения [1]. Типичная вольт-яркостная характеристика ТПЭЛ-индикатора представлена на рис. 1.

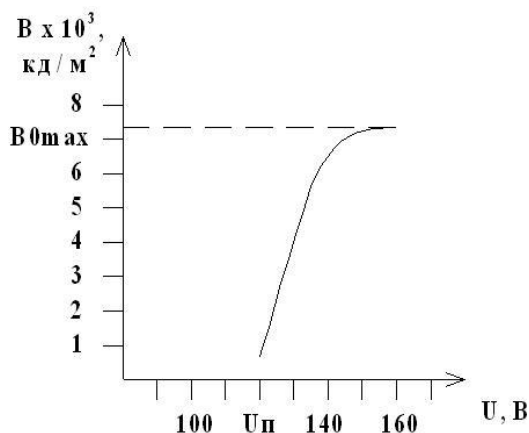


Рис. 1. Вольт–яркостная характеристика тонкопленочного электролюминесцентного индикатора.

Данная характеристика имеет пороговый характер – рост яркости происходит при превышении некоторого значения напряжения. Данное значение было обозначено как пороговое напряжение. Оно определяется свойствами материала люминофора, пороговой напряженностью электрического поля в нем, величиной и соотношением емкостей люминесцентного и диэлектрического слоев. Значения пороговой напряженности электрического поля в пленках люминофоров варьируется в диапазоне $7 \cdot 10^5 \div 7 \cdot 10^6$ В/см [1].

Максимальное значение яркости излучения тонкопленочного электролюминесцентного индикатора ограничивается максимально допустимым напряжением в рабочем диапазоне. Значение максимального напряжения зависит от свойств люминофора и диэлектрических слоев, конструктивных параметров светоизлучающей структуры и от условий возбуждения свечения [5].

Эффективность процессов преобразования электрической энергии в световое излучение характеризуется коэффициентом светоотдачи тонкоплёночного электролюминесцентного излучателя, определяемого как отношение излучаемого светового потока к потребляемой активной мощности. Величина светоотдачи зависит от состава и толщины плёнки люминофора, параметров диэлектрических слоев, амплитуды, частоты

и формы возбуждающего напряжения. Основными процессами, определяющими значение светоотдачи, являются: возбуждение центров свечения ускоренными электронами; излучательные переходы в активаторах; выход света во внешнюю среду [1; 5].

Максимальная средняя яркость излучения ТПЭЛ индикатора описывается выражением:

$$B_0 = \frac{\eta_{onm} \cdot d_l \cdot N}{W \cdot \tau_r}, \quad (1.7)$$

где

$$W = \frac{I}{B_{cp} \cdot Q_{\Pi 0}} \int_0^T \eta_{onm} \cdot d_l \cdot \frac{N^*}{\tau_r} \cdot i_{aэ} dt = \frac{I}{B_{cp} \cdot Q_{\Pi 0}} \int_0^T B(t) \cdot i_{aэ}(t) dt \quad (1.8)$$

Физический смысл максимальной средней яркости излучения в том, что она соответствует значению средней яркости при условии перехода всех активаторных центров в основное состояние за период изменения напряжения. Согласно формуле (1.8), величина W характеризуется взаимодействием ускоренных электронов с возбужденными атомами активаторной примеси [1].

Проанализировав полученные выражения, можно прийти к выводу, что в данных условиях достижение максимальной средней яркости является практически невозможным, так как описываемая ситуация равенства средней яркости и максимальной требует бесконечно большой плотности тока в слое люминофора.

Для упрощения расчета максимальной средней яркости вводится ряд допущений. Величина W полагается постоянной, а рассеяние электрической энергии в диэлектрических слоях отсутствует. В этом случае для расчета максимальной яркости ТПЭЛ-индикаторного элемента используется выражение [1; 5]:

$$B_0 = \frac{h \cdot c \cdot \eta_{onm} \cdot d_l \cdot K(\lambda) \cdot N}{\lambda \cdot \tau_r}, \quad (1.9)$$

где $\frac{h \cdot c}{\lambda}$ – энергия кванта излучения, h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – максимум спектра излучения люминофора.

Важной особенностью определения максимальной яркости ТПЭЛ-индикаторного элемента (с точки зрения разработки методов проектирования) является ее линейная зависимость от толщины слоя люминофора.

Световая отдача ТПЭЛ-источника излучения определяется энергетическим выходом и спектральным составом излучения люминофора. Отношение излученной энергии к поглощенной за один и тот же промежуток времени является энергетическим выходом. Согласно [1; 5], светоотдача ТПЭЛ-индикаторного элемента определяется как отношение среднего значения светового потока излучения к энергии электрического поля в люминесцентном слое за период изменения внешнего управляющего напряжения, то есть к средней рассеиваемой мощности:

$$\eta = \frac{\pi \cdot B_{cp}}{P_{cp}}, \quad (1.10)$$

Анализ позволяет выделить максимальную величину светоотдачи:

$$\eta_0 = \frac{\pi \cdot \eta_{onm} \cdot d_l \cdot \sigma \cdot N}{e \cdot U_{nl}} = \frac{\pi \cdot \eta_{onm} \cdot \sigma \cdot N}{e \cdot E_{nl}}. \quad (1.11)$$

Физический смысл этой величины соответствует значению светоотдачи при условиях, что в результате протекания активного тока в люминесцентном слое ТПЭЛ-структуры возбуждаются все активаторные центры свечения. Также для данного процесса протекания тока принимается допущение об отсутствии взаимосвязи между ускоренными электронами и возбужденными центрами свечения.

3. Конструктивные параметры (толщины слоев, размеры диагонали экрана, параметры материалов).

4. Показатели надежности (долговечность, виброустойчивость, радиационная стойкость, рабочий диапазон температур).

Проанализировав данную классификацию, можно сделать вывод, что светотехнические параметры являются наиболее важными для конечного пользователя индикаторов общего назначения, а показатели надежности являются основными для разработчиков специальной индикаторной техники

при сохранении светотехнических характеристик неизменными в течение всего срока эксплуатации устройства [7].

На ранних этапах исследования были проведены измерения яркости и светоотдачи тонкопленочного электролюминесцентного конденсатора [1; 3–7]. В лабораторных условиях это достаточно трудоемкая процедура. Сначала необходимо получить образец тонкопленочной структуры с заданными конструктивными параметрами, далее собрать измерительную установку, включающую достаточно дорогостоящее оборудование, а затем провести цикл измерений. Были обозначены следующие этапы исследовательских процессов [9]:

1. Определение конструкции и параметра индикаторного элемента для проведения измерений (определение объекта и предмета исследования);
2. Выбор методики исследования параметров индикаторов;
3. Формирование аппаратного решения для проведения физического эксперимента;
4. Обеспечение передачи данных на персональный компьютер;
5. Обработка и хранение результатов измерений.

Анализ данных экспериментальных процедур позволил определить степень формализации задач измерения параметров индикаторных устройств:

1. Полностью формализуемые процессы:
 - 1.1. Обеспечение передачи данных на персональный компьютер;
 - 1.2. Обработка и хранение результатов измерений.
2. Частично формализуемые процессы:
 - 2.1. Выбор методики исследования параметров индикаторов;
 - 2.2. Формирование аппаратного решения для проведения физического эксперимента.
3. Неформализуемые процессы:
 - 3.1. Принятие решений о повторном эксперименте;
 - 3.2. Проверка эксперимента на адекватность.

Определение степени формализации задач исследования необходимо для создания автоматизированной системы подготовки измерений параметров индикаторных устройств.

Любая автоматизированная система включает в себя следующие составные элементы:

1. Интерфейс пользователя.
2. Модули, обеспечивающих автоматизацию вычислений конечных параметров индикаторных устройств.
3. Банк данных входных и выходных параметров с возможностью хранения и пополнения.

Для определения задач банка данных в автоматизированной системе подготовки измерений параметров тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств была проведена классификация ее возможных элементов [8]. В результате в состав банка данных входят:

1. Производственная оснастка для получения индикаторных структур;
2. Измерительные средства эксперимента;
3. Конструкции (структуры) индикаторных устройств;
4. Материалы индикаторных устройств и их параметры;
5. Методики измерения светотехнических параметров индикаторных устройств:

5.1. Математические модели эксперимента;

5.2. Физические модели эксперимента (схемы экспериментальных установок).

Для того чтобы разработать физическую модель процессов подготовки измерений светотехнических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств в целях дальнейшей автоматизации эксперимента, необходимы следующие составляющие [9]:

- Схема с автоматическим управлением параметрами исследования;
- Инструменты измерения с возможностью передачи результатов исследования в автоматизированном режиме на персональный компьютер;
- Программное обеспечение передачи и регистрации результатов экспериментов;
- Результаты эксперимента в виде чисел, числовых массивов, графиков.

Вышеуказанные подходы и процедуры применимы для создания аппаратно-программного комплекса измерения светотехнических параметров тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных элементов. В результате анализа методов и средств исследования светотехнических параметров для измерения яркости тонкопленочных электролюминесцентных структур были выполнены следующие процедуры [9]:

- разработана схема с автоматическим управлением амплитудным напряжением и частотой для измерения яркости при различных формах управляющего напряжения;

- определены приборы для измерения яркости – спектрометры, колориметры с интерфейсами для современных персональных компьютеров;

- разработано программное обеспечение «Автоматизированная система научных исследований тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств (АСНИ ТПЭЛИ)» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610067 10.01.2012г.), которая позволяет обрабатывать результаты эксперимента и хранить их в пополняемой базе данных. В случае применения математических автоматизированных систем (MathCAD, MatLAB) достоинством является их универсальность и гибкость расчета, так как позволяет вносить коррективы в системы уравнений, участвующих в расчете, в то время как готовый программный модуль может быть изменен только программистом с большими затратами времени и недоступен исследователю для внесения коррективов в процесс моделирования. Математические автоматизированные системы имеют ряд ограничений: они обусловлены заложенными алгоритмами решения, имеют пределы по сложности решаемых уравнений. Однако, ввиду их гибкости и быстроты, они являются наиболее оптимальным вариантом для решения уравнений. В случае, когда решение не может быть найдено существующими программами или не является объективным, возникает необходимость в специальном программном обеспечении [9];

- разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать зависимость яркости от напряжения и формировать вольт-яркостную характеристику тонкопленочных электролюминесцентных элементов

«Автоматизированная система анализа вольт–яркостной характеристики тонкопленочных электролюминесцентных структур» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610262 12.01.2015 г.).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Евсевич Д.А. Методы и средства структурно-параметрического синтеза тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов в автоматизированном проектировании / Д.А. Евсевич, О.В. Максимова; под реда. Проф. М.К. Самохвалова. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 92 с.
2. Максимова, О.В. Анализ процессов проектирования и технологии наноструктурированных тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств / О.В. Максимова, М.К. Самохвалов, С.М. Максимов. Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2013. № 3. С. 74–78.
3. Максимова, О.В. САПР тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / О.В. Максимова, Д.А. Евсевич // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2012. № 2. С. 131–135.
4. Максимова О.В. Задачи автоматизации моделирования яркости и светоотдачи тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов / О.В. Максимова, С.М. Максимов, М.К. Самохвалов // Автоматизация процессов управления. 2014. № 2 (36). С. 98–105.
5. Максимова, О.В. Математическое обеспечение САПР тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов при решении задач синтеза конструкций / О.В. Максимова, М.К. Самохвалов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2012. № 1. С. 77–85.
6. Evseichev, D. The CAD System of the Thin Film Electroluminescent Display: collection of scientific papers / D. Evseichev, O. Maksimova, M. Samokhvalov // The 11th International Meeting on Information Display (IMID 2011). KINTEX, Seoul, Korea. 2011. P. 768–769.
7. Максимова О.В. Разработка алгоритмов и программ исследования светотехнических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / О.В. Максимова, Д.А. Евсевич, А.С. Яманчев // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014: Материалы 11 междунар. науч.-техн. конференции, г. Саратов, 25–26 сентября 2014 г. Саратов: ООО «Буква», 2014. С. 72–74.
8. Максимова О.В. Разработка средств автоматизации конструирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / О.В. Максимова, Д.А. Евсевич, М.К. Самохвалов, С.М. Максимов // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014: Мат-лы 11 междунар. Науч.-техни. конференции, г. Саратов, 25–26 сентября 2014 г. Саратов: ООО «Буква», 2014 С. 66–71.

9. Максимова О.В. Автоматизация процессов измерения светотехнических характеристик наноструктурированных индикаторных устройств / О.В. Максимова, С.М. Максимов, С.В. Мойсеенко // Автоматизация процессов управления. 2015. № 1 (39). С. 106–113.