

УДК 681.883.7

С.М. Максимов, О.В. Максимова, М.К. Самохвалов

ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯРКОСТИ И СВЕТООТДАЧИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Максимов Сергей Михайлович, окончил Ульяновский государственный технический университет по специальности «Проектирование и технология электронных средств», аспирант кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет статьи в области оптоэлектроники. [e-mail: maximovsm@yandex.ru].

Максимова Оксана Вадимовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет статьи, монографии в области оптоэлектроники и СВЧ-техники. [e-mail: first32007@yandex.ru].

Самохвалов Михаил Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет статьи, монографии в области оптоэлектроники. [e-mail: sam@ulstu.ru].

Аннотация

Современные средства отображения информации должны соответствовать ряду требований, которые зависят от сферы их применения и условий эксплуатации. Исходя из требований, предъявляемых к системам визуализации, происходит выбор подходящих конструктивных решений. Создание системы автоматизированного проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов (ТПЭЛИ) упростит процедуру выбора конструкции с необходимыми характеристиками. Проведены исследования и расчеты светотехнических характеристик ТПЭЛ-конденсаторов. Основные характеристики индикаторных приборов определяются ударным возбуждением активаторных центров с последующей излучательной релаксацией. Приведенные соотношения были адаптированы для разработки системы автоматизированного проектирования ТПЭЛИ. Произведена оценка влияния на светотехнические характеристики конструктивных параметров. Физические процессы, определяющие работу ТПЭЛ-излучателей, изучены достаточно, что позволяет разрабатывать и производить различные индикаторы и дисплеи.

Ключевые слова: тонкопленочный индикатор, яркость, светоотдача, люминофор, активаторные центры, электролюминесценция.

TASKS OF MODELING AUTOMATION OF BRIGHTNESS AND LUMINOUS EFFICIENCY OF THIN-FILM ELECTROLUMINESCENT CONDENSATORS

Sergei Mikhailovich Maksimov, graduated from the Ulyanovsk State Technical University (UlSTU) with the specialty of Design and Technology of Electronic Instrumentation; a post-graduate student of the 'Design and Technology of Electronic Instrumentation' Department at UlSTU; an author of articles in the field of optoelectronics. e-mail: maximovsm@yandex.ru.

Oksana Vadimovna Maksimova, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Electronic Instrumentation Design and Technology of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles and monographs in the field of optoelectronic and microwave engineering. e-mail: first32007@yandex.ru

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

Abstract

The modern means of information representation intended for professional use must meet certain requirements which depend on their field of application and maintenance conditions. The selection of constructive decisions is made according to the visualization system requirements. Certain of the computer-aided design (CAD) system simplifies the procedure of the design choice with necessary characteristics. The presented of investigations and calculations of the lighting characteristics

of thin-film electroluminescent indicators. The main characteristics of indicator devices are explained by means impact excitation activator centers with the following light relaxation. These equations have been adapted for the development of CAD system of thin-film electroluminescent indicators. The presented of conspicuous lighting parameters dependence on the structural factors. Physical processes determined the thin-film light emitters work are sufficiently studied, that permits elaboration and production of different indicators and displays.

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

ВВЕДЕНИЕ

Тонкопленочные электролюминесцентные (ТПЭЛ) индикаторы относятся к современным индикаторным устройствам (ИУ) 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, быстродействие, большой угол обзора, радиационная стойкость.

Электролюминесцентные индикаторы обладают уникальными сочетаниями рабочих характеристик: широкий температурный диапазон работы, малая потребляемая мощность, пространственная однородность изображения, способность выдерживать ударные нагрузки высоты, легкость получения полутонов.

Создание ТПЭЛ ИУ представляет собой комплексную задачу, включающую аспекты проектирования устройства, технологию изготовления, анализ материалов, исследование физических процессов, протекающих в тонких пленках.

Для учета всех вышеизложенных процессов при разработке ТПЭЛИ необходимо использовать программные средства, обеспечивающие автоматизацию проектирования и исследования ТПЭЛ ИУ. Так как объектом исследования является непосредственно средство отображения информации (индикаторная панель), а не управляющий модуль, то программные средства и средства автоматизации должны учитывать специфику подобных разработок.

Был проведен анализ, который подтвердил отсутствие аналогичных комплексов на рынке систем автоматизации проектирования индикаторов, в то время как для проектирования управляющих модулей и схмотехнических решений предлагается большой спектр разнообразных автоматизированных систем и программных продуктов.

Учитывая все вышеизложенное, актуальным направлением в развитии дисплейной и индикаторной техники является разработка монохромных и полноцветных ТПЭЛ-средств отображения информации, исследование параметров материалов тонкопленочных слоев (для снижения рабочего напряжения), создание алгоритмов и систем автоматизации инженерных расчетов электрических и светотехнических параметров, формирование технологических маршрутов производства ТПЭЛИ, адаптация математического аппарата для определения математического обеспечения разрабатываемых программных модулей, математическое моделирование функциональных характеристик ТПЭЛИ.

Основной задачей создания активных индикаторных элементов является эффективное преобразование электрической энергии в световое излучение. Поэтому важнейшими функциональными характеристиками этих приборов являются показатели, характеризующие выходящее оптическое излучение: яркость и цвет свечения, длительность послесвечения, эффективность выхода излучения, контрастность изображения, оптимальное сочетание цветов свечения [1].

Была рассмотрена классическая ТПЭЛ-структура конденсатора, которая состоит из пяти слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку [1]: проводящий нижний, диэлектрический нижний, люминесцентный, верхний диэлектрический, верхний проводящий.

Кроме рассмотренной классической конструкции, при производстве ТПЭЛ ИУ могут быть спроектированы другие типы источников излучения, имеющие меньшее число диэлектрических слоев (к достоинствам ИУ таких типов относятся, как правило, меньшие значения управляющего напряжения, а к недостаткам – более низкая яркость и светоотдача, меньшая надежность) [2].

С учетом предъявляемых требований к конструкциям ТПЭЛИ и к материалам их слоев, проектирование ТПЭЛ-структур, расчет и моделирование их светотехнических характеристик являются комплексной задачей. Основные функциональные параметры, такие как яркость и светоотдача, являются прогнозируемой величиной и могут быть выявлены на этапах исследования ТПЭЛИ.

1 Влияние люминофоров на светотехнические характеристики ТПЭЛИ

К люминофорам различных цветов свечения предъявляются такие основные требования, как высокая светоотдача, высокая яркость, совместимость технологии получения с другими элементами индикатора, низкие напряжения возбуждения, большой срок службы и ряд других [3].

В настоящее время в качестве материалов люминесцентного слоя опробованы узкозонные соединения групп A^3B^5 и A^2B^6 , твердых растворов на их основе, а также более широкозонные соединения A^2B^6 . Лишь в последнем случае спектральная область приборов охватывает всю видимую и ближнюю ультрафиолетовую часть спектра. К таким широкозонным соединениям относятся ZnS , $ZnSe$, CdS , $CdSe$, CaS , BaS , SrS и твердые растворы на их основе.

Следует отметить, что люминофоры на основе сульфида цинка уже нашли широкое применение на практике в рентгеновских экранах, электронно-лучевых трубках, детекторах инфракрасного излучения.

Наряду с наличием широкой запрещенной зоны указанные выше соединения обладают высокой эффективностью излучательной межзонной рекомбинации, а также большой вероятностью излучательной рекомбинации, вызванной значительной глубиной залегания центров люминесценции. Для получения различных цветов свечения производят активирование этих соединений легирующими примесями, а именно медью, серебром, переходными, редкоземельными элементами и их соединениями.

Слой полупроводника должен содержать центры свечения, создаваемые активаторными примесями, и обеспечивать их возбуждение электронами, ускоренными электрическим полем в полупроводнике. В большинстве люминофоров может наблюдаться несколько видов люминесценции, поэтому, например, все катодолюминесцентные материалы могли бы быть использованы в качестве матриц при создании электролюминофоров.

Однако электролюминосцентные материалы должны отвечать ряду специфических требований [3], в частности, высокое сопротивление и большая ширина запрещенной зоны, технологичность, т. е. допускать возможность получения однородных стабильных поликристаллических слоев методами тонкопленочной технологии.

Кристаллическая структура люминесцентных пленок зависит от их химического состава и условий получения. В большинстве случаев эти пленки являются поликристаллическими со столбчатой формой кристаллитов, продольные размеры которых порядка толщины пленки, а поперечные в зависимости от температуры подложки и последующего отжига лежат в пределах от сотых до десятых долей микрометра [4].

Параметры люминофоров ТПЭЛИ различных цветов свечения приведены в таблице 1.

Из приведенной таблицы следует, что наиболее полные данные имеются для люминофоров на основе сульфида цинка, легированных марганцем или фторидами тербия, самария или тулия.

Для использования других люминесцентных материалов для автоматизированного проектирования ТПЭЛИ необходимо получить дополнительные параметры люминофоров на основе сульфидов стронция и кальция, в частности, напряженность порогового поля, концентрацию и сечение ударного возбуждения центров, их постоянную времени излучательных переходов. В настоящее время достаточно трудоемким являются процедуры исследования параметров люминофоров, а следовательно формирование тонкопленочных структур с оптимальными светотехническими характеристиками [5].

Основной характеристикой электролюминосцентных индикаторов является вольт-яркостная. На рисунке 1 представлена типичная вольт-яркостная характеристика электролюминосцентной структуры на основе сульфида цинка, легированного марганцем, измеренного для разных частот гармонического напряжения [6].

Создание математических моделей и исследование физических процессов, описывающих тот или иной процесс в электролюминосцентных индикаторах, ведется и в настоящее время. Производилось моделирование светотехнических параметров, и, в частности, временных зависимостей яркости свечения (волн яркости) производилось на основе численного решения нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего кинетику изменения плотности возбужденных центров в пленке люминофора [7].

Таблица 1

Параметры люминофоров в ТПЭЛИ

Состав люминофора	Максимум спектра излучения λ_m , нм	Оптимальная концентрация примеси (весовые, молярные, атомные проценты)	Концентрация центров свечения N , 10^{24} м^{-3}	Напряженность поля в люминофоре E_{nl} , 10^8 , В/м	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Сечение ударного возбуждения σ , 10^{16} см^2	Постоянная времени свечения τ , мс
ZnS: SmF ₃	650	0,5% вес.	3,6	0,7	8,5	7,00	0,27
ZnS: Sm,P		P – 0,5% ат.		0,7	8,5		
CaS:Eu	650	0,1% мол.			9,3		
ZnS:Mn	585	0,5% вес.	1,25	0,7	8,5	3,5	1,3
ZnS:Dy ₂ F ₃	570	0,5% вес.		0,7	8,5		
ZnS:TbF ₃	542	2% ат.	5,6	0,7	8,5	2,00	0,64
ZnS:Eu	525	(2–3%) ат.		0,7	8,5		
CaS:Ce	—	0,1% мол.			9,3		
SrS:Ce	475	0,1% мол.			9,4		
SrS:CeF ₃	470	—			9,4		
ZnS:TmF ₃	476	0,4% мол.	1,7	0,7	8,5	60,0	0,055
SrS:Pr,Ce	490	PrS – 0,1% мол.			9,4		
ZnS:PrF ₃	—	0,5% вес.		0,7	8,5		

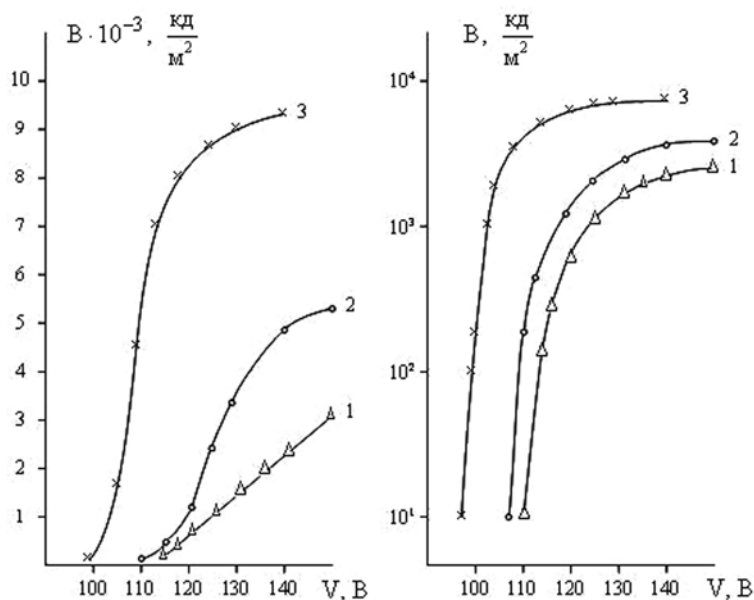


Рис. 1. Вольт-яркостная характеристика

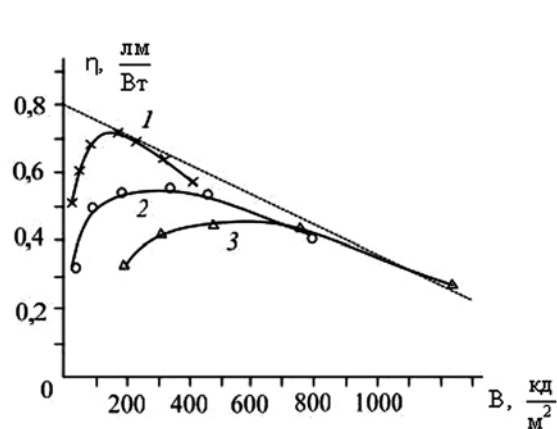


Рис. 2. Зависимость светоотдачи от яркости излучения (частоты напряжения: 1–0,4; 2–1 и 3–5 кГц)

Данная модель основана на описании электрической эквивалентной схемы электролюминесцентной структуры уравнениями, составленными согласно теории электрических цепей. Это позволило рассмотреть электролюминесцентные источники света в качестве компонентов электрической цепи и установить необходимые характеристики приборов, а также использовать полученные в результате расчетов данные для моделирования светотехнических характеристик.

В работе [1] было рассмотрено математическое моделирование процессов рассеяния энергии в ТПЭЛ-элементах и устройствах для различных режимов работы и конструкций приборов, что позволяет определить потребляемую мощность индикаторных элементов и устройств для различных режимов возбуждения. Были получены соотношения, представленные на рисунке 2, при этом в модель вводились математические упрощения: слои люминесцентных материалов, используемые в ТПЭЛ-конденсаторах, являются высокоомными, поэтому рассеяние энергии в предпороговом режиме возбуждения электролюминесценции при расчетах не учитывалось. Используемые в ТПЭЛ-конденсаторах пленки диэлектрических материалов обладают высокими изолирующими свойствами, поэтому при расчетах можно было не учитывать омические потери энергии в пленках диэлектриков.

В теории для прямого ударного возбуждения существует уравнение изменения плотности возбужденных центров свечения в пленке люминофора [1]:

$$\frac{\tau_r}{\eta_{opt} \cdot d_l} \cdot \left(\frac{B}{\tau_r} + \frac{dB}{dt} \right) = \frac{\sigma}{e} \cdot j_{LA} \cdot (N - N_a), \quad (1)$$

где τ_r – постоянная времени для излучательных переходов, соответствующая основной (рабочей длине) волны;

η_{opt} – оптический выход, зависящий от показателя преломления люминофора;

d_l – толщина слоя люминофора;

σ – сечение столкновения;

j_{LA} – ток проводимости в слое люминофора;

N_a – концентрация возбужденных центров;

N – концентрация центров свечения;

B – яркость излучения.

Для решения этого уравнения используют различные приближения. Так решение разбивается на несколько частных случаев: когда ток люминофора равен нулю, а яркость имеет отличное от нуля значение. Однако для решения данного уравнения можно использовать другие методы, например решение с помощью математического моделирования с использованием систем автоматизации проектирования, и найти яркость от времени. Рассмотрим параметры ТПЭЛ-структуры, зависящие от времени: величину тока в люминофоре j_{LA} , количество активаторных атомов примеси N_a [2–3].

$$j_{LA} = \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \frac{C_L \cdot d_l \cdot F}{(t + \tau_E) \cdot \left[\ln \left(\frac{t}{\tau_E} + 1 \right) + \frac{F}{E_{L0} \cdot \left(1 - \frac{Q_0}{Q_m} \right)} \right]^2}, \quad (2)$$

где τ_E – постоянная времени релаксации;

C_D, C_L – емкости плоских конденсаторов;

Q_0 – поляризационный заряд в начальный момент релаксации;

Q_m – максимальное значение поляризационного заряда;

E_{L0} – напряженность электрического поля в люминофоре;

F – коэффициент, определяемый свойствами полупроводника;

t – время релаксации.

Для случая, когда G, R – коэффициенты прозрачности и отражения соответственно являются постоянными, количество активаторных атомов примеси определяется по формуле:

$$N_a = \frac{G}{G+R} \cdot N \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{G}{G+R} \cdot \frac{N_0}{N} \right) \cdot e^{-(G+R)t} \right], \quad (3)$$

где N_0 – концентрация возбужденных центров в начальный момент времени;

Учитывая выражения (1)–(3), выразим яркость:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\sigma}{e} \cdot j_{LA} \cdot (N - N_a) \cdot \frac{\eta_{opt} \cdot d_l}{\tau_r} - \frac{B}{\tau_r}. \quad (4)$$

Получение аналитического уравнения с минимальной аппроксимацией параметров без использования средств вычислительной техники весьма затруднительно [4]. Поэтому для решения данной задачи необходимо применять автоматизированные системы моделирования функциональных характеристик ТПЭЛ-устройств.

Методы приближения позволяют значительно упростить решение уравнения, однако несколько частных случаев приводят к весомым погрешностям в построении зависимостей. Также нельзя забывать, что все уравнения являются аппроксимацией реальных процессов, и вносить дополнительную погрешность нецелесообразно [5].

2 АНАЛИЗ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯРКОСТИ И СВЕТООТДАЧИ ТПЭЛИ

На ранних этапах исследования функциональных характеристик ТПЭЛ-структур были разработаны алгоритмы и программы, позволяющие проанализировать электрические и светотехнические характеристики и синтезировать конструкции с заданными параметрами яркости и светоотдачи [6].

Был проведен теоретический анализ и расчет зависимости светотехнических характеристик ТПЭЛ-конденсаторов от конструктивно-технологических параметров многослойных структур. Полученные аналитические уравнения для яркости и светоотдачи были представлены в качестве математического обеспечения системы автоматизации проектирования ТПЭЛИ при решении задачи синтеза конструкций [7, 8].

Для анализа яркости и светоотдачи определялись значения средней мощности рассеивания P_{cp} при ограниченных размерах излучающей поверхности.

Для определения средней мощности рассеивания P_{cp} были рассчитаны значения емкостей диэлектриков и люминофора. В программном коде расчета площадь верхней обкладки или непрозрачного электрода устанавливалась программно, то есть расчет проводился при условии $S_{непр. \text{ элек.}} = const$.

```
//начало расчета Cd, Cl
S:=3.14/1000000;
Epsn0:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[lum_column,17]);
Memo1.Lines.Add('Абсолютная диэлектрическая проницаемость E0='+ FloatToStr(Epsn0)+'*10^-12 Ф/м');
Epsn0:=Epsn0/1000000000000;
Cd:=Epsnd*Epsn0*S/(2*dd);
Memo1.Lines.Add('Cd='+ FloatToStr(Cd*1000000000)+' нФ');
Cl:=Epsnl*Epsn0*S/dl;
Memo1.Lines.Add('Cl='+ FloatToStr(Cl*1000000000)+' нФ');
//конец расчет Cd, Cl
```

Для расчета средней мощности рассеивания P_{cp} частота возбуждения центров свечения берется из таблицы 1 значений параметров люминофоров.

```
//начало расчет Pcp0
//f:=1500;
f:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[lum_column,6]);
Memo1.Lines.Add('Рабочая частота f='+ FloatToStr(f/1000)+' кГц');
Psr0:=4*f*Cd*Cd*Up*(1.06*Up-Up)/(Cd+Cl);
Memo1.Lines.Add('Pcp0='+ FloatToStr(Psr0*1000)+' мВт');
Psr_str:=FloatToStr(Psr0*1000);
//конец расчет Pcp0
// начало расчета мощности
Psr:=Psr0/S;
Memo1.Lines.Add('Pcp.='+ FloatToStr(Psr/1000)+' мВт/мм2');
// конец расчета удельной мощности
```

Для расчета усредненной яркости значения B_0, η_0 берутся из таблицы значений параметров люминофоров, а P_{cp} – из вышеприведенного расчета.

```
// начало расчет Bcp
B0:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[lum_column,5]);
Memo1.Lines.Add('Максимальная яркость B0='+ FloatToStr(B0)+'*10^3 Кд/м2');
B0:=B0*1000;
n0:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[lum_column,7]);
Memo1.Lines.Add('Максимальная светоотдача n0='+ FloatToStr(n0)+' Лм/Вт');
Bsr:=1/(1/B0+3.1415/(n0*Psr));
Memo1.Lines.Add('Bcp='+ FloatToStr(Bsr)+' Кд/м2');
Bsr_str:=FloatToStr(Bsr);
// конец расчета Bcp
```

В расчете светоотдачи используется рассчитанное выше значение усредненной яркости.

```
//начало расчета n
n:=n0*(1-Bsr/B0);
Memo1.Lines.Add('n='+ FloatToStr(n)+' - Расчет закончен.');
```

$n_str:=FloatToStr(n);$
//конец расчет n!
Результат расчета яркости и светоотдачи представлен на рисунке 3.

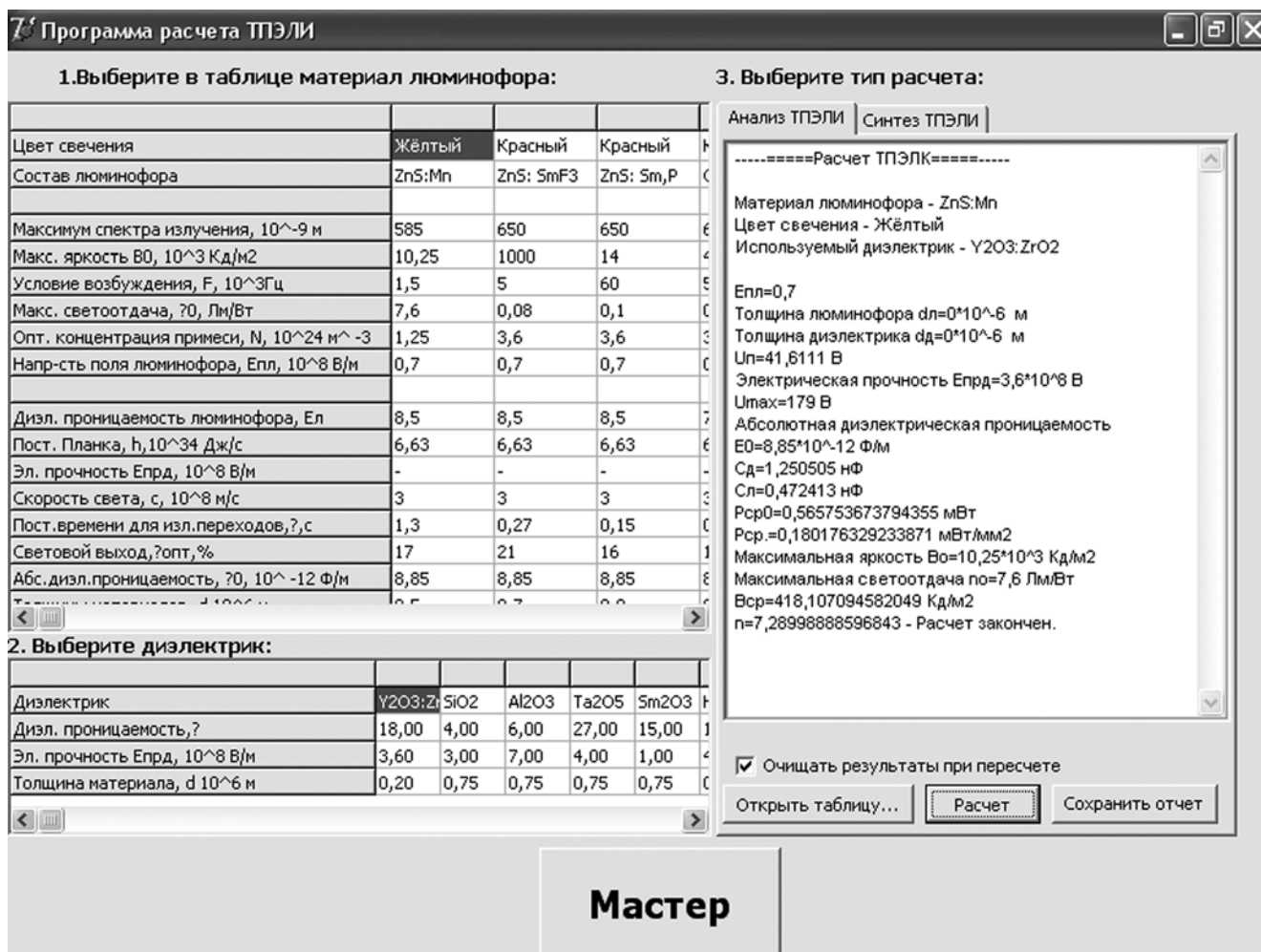


Рис. 3. Результирующая форма расчета яркости и светоотдачи в программе LECap

На современном этапе исследования светотехнических характеристик данный расчет позволяет оценить параметры яркости и светоотдачи на этапе предпроектных процедур при существенных ограничениях как конструктивных, так и функциональных. Для получения информации о поведении данных параметров при различных площадях излучения, а также с учетом процессов, протекающих в люминесцентных слоях, необходимо использовать средства автоматизации моделирования процессов возбуждения свечения в ТПЭЛ-структурах.

В связи с изложенными проблемами были рассмотрены различные варианты применения уже существующих средств автоматизации моделирования [9, 10].

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. Так же к достоинству математических автоматизированных систем можно отнести наглядность, так как все зависимости вид-

ны пользователем. С другой стороны, математические автоматизированные системы имеют ряд ограничений: они ограничены заложенными алгоритмами решения, имеют ограничения по сложности решаемых уравнений. Однако ввиду их гибкости и быстроты, они являются наиболее оптимальным вариантом для решения уравнений. В данной работе решение уравнений (1)–(4) с использованием указанных систем не было получено, а в случае, когда решение не может быть найдено существующими программами или не является объективным, возникает необходимость в специальном программном обеспечении [11–13].

Можно разработать комбинированный подход, который позволит в некоторых случаях решить сложные уравнения математического моделирования в математических автоматизированных системах путем упрощений, понятных исследователю, но не понятных вычислительным средствам, ввиду того что они ограничены алгоритмом, заложенным в них, и решают только формализуемые задачи.

Исходя из вышеизложенного, необходимо разработать алгоритмы и программы, позволяющие решать математические уравнения, описывающие процессы возбуждения в ТПЭЛ-структурах, для создания эффективной базы данных люминофоров в целях проектирования ТПЭЛ-устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный анализ светотехнических характеристик ТПЭЛИ позволяет сделать вывод о необходимости создания автоматизированной системы моделирования яркости и светоотдачи. Были представлены дифференциальные уравнения, решение которых невозможно без использования специальных программных средств. В работе произведена оценка существующих систем автоматизации расчетов функциональных характеристик ТПЭЛ-устройств, выявлены ограничения на исследования параметров яркости и светоотдачи.

Полученные в результате выполнения данной работы выводы и результаты могут быть использованы при создании систем автоматизации проектирования и автоматизации технологической подготовки производства ТПЭЛ-индикаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самохвалов М.К. Тонкопленочные электролюминесцентные источники излучения : учеб. пособие. – Ульяновск : УлГТУ, 1999. – 117 с.
2. Максимова О.В., Самохвалов М.К. Разработка методов анализа и синтеза тонкопленочных электролюминесцентных элементов в индикаторных устройствах. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 101 с.
3. Максимова О.В., Самохвалов М.К. Разработка алгоритмов проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Технические науки». – 2008. – № 1(21). – С. 99–106.
4. Гамма Э., Хелм Р., Влиссидес Джексон Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования : пер. с англ. – СПб. : Питер, 2001. – 848 с.
5. Максимова О.В., Максимов С.М., Самохвалов М.К. Анализ процессов проектирования и технологии наноструктурированных тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств // Вестник МГОУ. Сер. «Физика – Математика». 2013. – № 3. – С. 74–78.
6. Максимова О.В., Самохвалов М.К. Математическое обеспечение САПР тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов при решении задач синтеза конструкций // Вестник МГОУ. Сер. «Физика – Математика». – 2012. – № 1. – С. 77–85.
7. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 360 с.
8. Максимова О.В., Самохвалов М.К. Исследование процессов проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов для автоматизации расчетов их функциональных характеристик // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2011. – № 10(36). – С. 99–104.
9. Максимова О.В., Самохвалов М.К. Исследование влияния конструктивных параметров тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов на режимы их работы для формирования математического обеспечения

// Вестник МГОУ. Сер. «Физика – Математика». – 2012. – № 1. – С. 85–92.

10. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР : учебник для вузов. – М. : Радио и связь, 1990. – 352 с.

11. Евсевичев Д.А., Максимова О.В., Самохвалов М.К. Автоматизированная система технологической подготовки производства тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств TFEL DDS // Автоматизация в промышленности. – М. : ИнфоАвтоматизация. – 2013. – № 9. – С. 39–42.

12. Максимова О.В., Евсевичев Д.А. САПР тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов // Вестник МГОУ. Сер. «Физика – Математика». – 2012. – № 2. – С. 131–135.

13. Максимова О.В., Евсевичев Д.А., Самохвалов М.К. Решение задач автоматизированного проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов // Автоматизация процессов управления. – 2013. – № 3 (33). – С. 69–75.

REFERENCES

1. Samokhvalov M.K. *Tonkoplennochnyye elektroluminescentnyye istochniki izlucheniya : ucheb. Posobiye* [Thin-Film Electroluminescent Emitters: Textbook]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 1999. 117 p.
2. Maksimova O.V., Samokhvalov M.K. *Razrabotka metodov analiza i sinteza tonkoplennochnykh elektroluminescentnykh elementov v indikatornykh ustroystvakh* [Development of Methods for the Thin-Film Electroluminescent Elements Analysis and Synthesis in Indicator Units]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2010. 101 p.
3. Maksimova O.V., Samokhvalov M.K. *Razrabotka algoritmov proyektirovaniya tonkoplennochnykh elektroluminescentnykh indikatornykh ustroystv* [Design Algorithms of Development of Thin-Film Electroluminescent Display Devices]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. 'Tekhnicheskkiye nauki'* [Bulletin of the Samara State Technical University. Technical Science], 2008, no. 1(21), pp. 99–106.
4. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides Jh. *Priyemy obyektno-oriyentirovannogo proyektirovaniya. Patterny proyektirovaniya : per. s angl.* [Design Patterns. Elements of Reusable Object-Oriented Software. Translation from Engl.]. Sankt-Peterburg, Piter Publ., 2001. 848 p.
5. Maksimova O.V., Maksimov S.M., Samokhvalov M.K. *Analiz protsessov proyektirovaniya i tekhnologii nanostrukturirovannykh tonkoplennochnykh elektroluminescentnykh indikatornykh ustroystv* [The Analysis of Processes of Design and Technology of Nanostructured Thin Film Electroluminescent Display Devices]. *Vestnik MGOU. Ser. 'Fizika – Matematika'* [Bulletin MSRU. Physics and Mathematics], 2013, no. 3, pp. 74–78.
6. Maksimova O.V., Samokhvalov M.K. *Matematicheskoye obespecheniye SAPR tonkoplennochnykh elektroluminescentnykh indikatorov pri reshenii zadach sinteza konstruksiy* [The Mathematical Tools for Solving

the Synthesis Problem of CAD Thin Film Electroluminescence Indicator]. *Vestnik MGOU. Ser. 'Fizika – Matematika'* [Bulletin MSRU. Physics and Mathematics], 2012, no. 1, pp. 77–85.

7. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proyektirovaniya : uchebnyk dlya vuzov* [Basis of Computer-Aided Design: Text-book for Higher Education]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2000. 360 p.

8. Maksimova O.V., Samokhvalov M.K. Issledovaniye protsessov proyektirovaniya tonkoplnochnykh elektrolyuminestsentnykh indikatorov dlya avtomatizatsii raschetov ikh funktsionalnykh kharakteristik [Research on the Processes of Design of Thin-Film Electroluminescent Indicators for the Calculi Automation of Performance Characteristics]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the Sankt-Peterburg State Institute of Technology (Technical University)], 2011, no. 10 (36), pp. 99–104.

9. Maksimova O.V., Samokhvalov M.K. Issledovaniye vliyaniya konstruktivnykh parametrov tonkoplnochnykh elektrolyuminestsentnykh indikatorov na rezhimy ikh raboty dlya formirovaniya matematicheskogo obespecheniya [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]. *Vestnik MGOU. Ser. 'Fizika – Matematika'* [Bulletin MSRU. Physics

and Mathematics], 2012, no. 1, pp. 85–92.

10. Kureychik V.M. *Matematicheskoye obespecheniye konstruktorskogo i tekhnologicheskogo proyektirovaniya s primeneniyem SAPR : uchebnyk dlya vuzov* [Mathematical Support of Engineering Design with the Use of CAD: College Textbook]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990. 352 p.

11. Evsevichev D.A., Maksimova O.V., Samokhvalov M.K. Avtomatizirovannaya sistema tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva tonkoplnochnykh elektrolyuminestsentnykh indikatornykh ustroystv TFEL DDS [Automated System of the Preproduction Design of the Thin-Film Electroluminescent Indicators of TFEL DDS Units]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry]. Moscow, InfoAvtomatizatsiya Publ., 2013, no. 9, pp. 39–42.

12. Maksimova O.V., Yevsevichev D.A. SAPR tonkoplnochnykh elektrolyuminestsentnykh indikatorov [CAD Thin-Film Electroluminescent Indicators]. *Vestnik MGOU. Ser. 'Fizika – Matematika'* [Bulletin MSRU. Physics and Mathematics], 2012, no. 2, pp. 131–135.

13. Maksimova O.V., Yevsevichev D.A., Samokhvalov M.K. Resheniye zadach avtomatizirovannogo proyektirovaniya tonkoplnochnykh elektrolyuminestsentnykh indikatorov [A Solution of Computer-Aided Design of the Thin-Film Electroluminescent Indicators]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2013, no. 3 (33), pp. 69–75.