

# ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 628.9.038

М.К. Самохвалов

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЯРКОСТИ 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

Проанализированы процессы возбуждения свечения тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов в рамках модели прямого ударного возбуждения активаторных центров в люминофоре. Проведено математическое моделирование динамики яркости источников излучения на основе решения нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего кинетику изменения плотности возбужденных центров свечения в пленке люминофора. Разработана программа для численного решения с помощью компьютера нелинейного уравнения динамики яркости свечения методом Рунге-Кутты. Показано, что длительность переходных процессов, определяемая по волнам яркости, достигает 8–10 периодов прикладываемого знакопеременного напряжения. Для получения высоких уровней яркости электролюминесцентных индикаторов необходимо обеспечивать возбуждение индикаторных элементов пакетами импульсов знакопеременного напряжения, длительность которых должна быть не менее времени достижения установившегося режима работы.

Ключевые слова: тонкопленочный электролюминесцентный конденсатор, яркость, люминофор, электролюминесценция, индикатор.

### MODELING THE BRIGHTNESS DYNAMICS 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 named after N.G. Chernyshevsky; Professor 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 processes of excitation of luminescence of thin-film electroluminescent capacitors within the model of direct shock excitation of activator centers in the luminophore are analyzed. Mathematical modeling of the dynamics of the brightness of radiation sources is carried out on the basis of the solution of the nonlinear ordinary differential equation describing the

kinetics of changes in the density of excited centers of luminescence in the phosphor film. A program for numerical solution of nonlinear equation of luminance dynamics by Runge-Kutt method using a computer is developed. It is shown that the duration of transient processes determined by the brightness waves reaches 8-10 periods of applied alternating voltage. In order to obtain high brightness levels of electroluminescent indicators, it is necessary to excite the indicator elements with suites of alternating voltage pulses, the duration of which must be at least the time of reaching the steady-state operation.

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

## ВВЕДЕНИЕ

Тонкопленочные структуры, включающие в себя прозрачный электрод-диэлектрик-люминофор-диэлектрик-металл на стеклянных или других диэлектрических подложках и работающие на переменном напряжении, в настоящее время используются в различных индикаторных устройствах. Они выделяются среди различных типов активных индикаторов плоской твердотельной конструкцией, быстродействием, широким диапазоном рабочих температур, высокой яркостью и разрешающей способностью, долговечностью и др. Эти индикаторы нашли применение в приборных панелях транспортных средств, промышленном оборудовании и военной технике [1–3]. Важной задачей продолжающихся исследований остается оптимизация существующих и разработка новых режимов возбуждения электролюминесценции в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах и схем управления как дискретными индикаторами, так и матричными панелями различной информационной емкости. Одним из необходимых этапов решения данной задачи являются анализ физических процессов возбуждения электролюминесценции в тонких пленках и определение временной зависимости яркости свечения излучающих элементов индикаторных устройств.

## АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ЯРКОСТИ СВЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ

Исследования электронных процессов, протекающих в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах, показали, что для последовательного описания функционирования источников излучения достаточно использования базовых моделей квазиизолированной поверхности широкозонных полупроводников (люминофоров), туннельной эмиссии электронов ловушками границы раздела полупроводник-диэлектрик в слой люминофора, квазистационарного самоэкранирования люминесцентного слоя и прямого ударного возбуждения центров свечения в люминофоре [4].

Для количественного анализа влияния параметров возбуждающего напряжения на светотехнические характеристики электролюминесцентных излучательных элементов, в частности временные зависимости яркости, необходимо решить дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения плотности возбужденных центров свечения в пленке люминофора при подаче напряжения [4]:

$$\frac{dN^*(t)}{dt} = \frac{\sigma}{e} j(t) [N - N^*(t)] - \frac{N^*(t)}{\tau}, \quad (1)$$

где  $N$  – концентрация активаторных центров свечения;  $N^*$  – концентрация возбужденных центров;  $s$  – сечение ударного возбуждения активатора;  $e$  – заряд электрона;  $t$  – постоянная времени релаксации, обусловленная излучательными переходами активаторов из возбужденного в основное состояние;  $j(t)$  – плотность активного тока, протекающего в люминофоре.

Уравнение (1) характеризует динамику изменения плотности возбужденных центров свечения для механизма прямого ударного внутрицентрового возбуждения активаторных центров, который является основным для предпробойной электролюминесценции в тонкопленочных электролюминесцентных структурах [2].

Яркость свечения электролюминесцентной структуры определяется скоростью переходов центров свечения из возбужденного в основное состояние с излучением фотонов следующим образом [4]:

$$B(t) = \eta_c d_{ph} \frac{N^*(t)}{\tau}, \quad (2)$$

где  $d_{ph}$  – толщина люминофора;

$$\eta_c = \frac{K_\lambda}{\pi} h\nu \times \eta_s - \text{эффективность светового}$$

выхода,

$K_\lambda$  – спектральная световая эффективность монохроматического излучения, определяющая переход от энергетических характеристик излучения к величинам, характеризующим световое восприятие человеческого глаза;

$h\nu$  – энергия излучаемых фотонов;

$\eta_s$  – коэффициент выхода, определяемый отношением числа фотонов, излучаемых с поверхности электролюминесцентного конденсатора, к полному числу фотонов, возникающих в объеме люминесцентного слоя.

После подстановки соотношения (2) в уравнение (1) можно получить обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка в следующем виде:

$$\frac{dB(t)}{dt} = \frac{\sigma}{e} j(t) \left[ \frac{N\eta_c d_{ph}}{\tau} - B(t) \right] - \frac{B(t)}{\tau}, \quad (3)$$

решением которого является временная зависимость яркости свечения электролюминесцентного конденсатора (волна яркости). Уравнение (3) является нелинейным, т. к. плотность активного тока  $j(t)$  связана

с функцией  $B(t)$  нелинейной зависимостью, и может быть решено численными методами. В результате такого решения зависимость яркости от времени получается табулированной, в виде массива точек  $(B_i, t_i)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ .

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ЯРКОСТИ СВЕЧЕНИЯ**

Общим методом решения дифференциального уравнения (3) является его интегрирование, имеющее бесконечное множество решений. Для получения единственного решения, соответствующего конкретным условиям задачи, необходимо задать начальные условия, т. е. значения независимой переменной  $t_0 = t_{нач}$  и соответствующей зависимой переменной  $B_0 = B(t_0)$ . В качестве начальных условий обычно используются значения  $t_0 = 0$  с,  $B_0 = B(t_0) = 0$  кд/м<sup>2</sup>.

Решение уравнения (3) при заданных начальных условиях является задачей Коши, которая формулируется следующим образом: для принятых начальных условий требуется найти функцию  $B(t)$ , удовлетворяющую исходному уравнению и начальным условиям на диапазоне изменения независимой переменной  $(t_{нач} = t_0) \leq t \leq t_{кон}$ , т. е. на интервале интегрирования уравнения. Численное решение задачи Коши получают, вычисляя сначала по правой части (3) значение производной, а затем, задавая малое приращение  $\Delta t$  независимой переменной, переходят к новой точке  $t_1 = t_0 + \Delta t$ . Координаты этой точки  $(B_1, t_1)$  определяют по наклону касательной, вычисленному с помощью дифференциального уравнения. Таким образом, график численного решения представляет собой последовательность коротких прямолинейных отрезков, которыми аппроксимируется истинная кривая временной зависимости яркости. Сам численный метод определяет порядок действий при переходе от данной точки вычисляемых значений функции к следующей.

Для решения задачи Коши наиболее широко используются различные одношаговые методы [5–7], в которых для нахождения последующей точки искомой зависимости требуется информация лишь об одной предыдущей точке. Такими одношаговыми являются методы Эйлера и Рунге-Кутты, с помощью которых рассчитываются последовательные значения  $B_i$ , соответствующие значениям независимой переменной  $t_i$  на принятом диапазоне изменения. Простейший метод решения задачи Коши – метод Эйлера; на практике он используется сравнительно редко, поскольку его точность невелика. Достоинством метода является меньшая длительность расчетов, т. к. для расчета последующей точки на искомой зависимости необходимо вычислить лишь одно значение производной правой части (3).

Для решения нелинейного дифференциального уравнения (3) может быть использован метод Рунге-Кутты, обеспечивающий более высокую точность, которая

полностью оправдывает большую трудоемкость вычислений. Усложнение обусловлено тем, что для расчета последующей точки искомой зависимости необходимо вычислить четыре значения производных. Формулы, применяемые при использовании метода Рунге-Кутты для расчета точек зависимости  $B(t)$ , имеют следующий вид [8]:

$$B_{i+1} = B_i + (K_0 + 2K_1 + 2K_2 + K_3) / 6,$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t.$$

где  $K_0 = \Delta t \cdot dB(t_i, B_i) / dt$ ,

$$K_1 = \Delta t \cdot dB(t_i + \Delta t / 2, B_i + K_0 / 2) dt,$$

$$K_2 = \Delta t \cdot dB(t_i + \Delta t / 2, B_i + K_1 / 2) dt,$$

$$K_3 = \Delta t \cdot dB(t_i + \Delta t, B_i + K_2) dt$$

– значения производных, вычисленных по правой части уравнения (3) во внутренних точках шага интегрирования  $\Delta t$ , координаты которых приведены в круглых скобках.

Разработанное программное обеспечение позволяет находить численное решение нелинейного уравнения (3) указанным методом и состоит из двух взаимосвязанных модулей:

- 1) подпрограмма-функция  $F$ , посредством которой вычисляются значения производных;
- 2) основная программа, в которой реализовано считывание исходных данных из файла, расчет по формулам методом Рунге-Кутты, вызов подпрограммы-функции  $F$  и формирование файла результатов, содержащего искомую табулированную зависимость  $B(t)$ .

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ЯРКОСТИ СВЕЧЕНИЯ ТОНКОПЛОНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

Выбранный численный метод решения уравнения динамики яркости свечения и разработанное программное обеспечение были использованы для расчетов волн яркости при возбуждении знакопеременным напряжением различной формы тонкопленочных электролюминесцентных структур на основе люминесцентных пленок сульфида цинка, легированного марганцем. Этот материал обладает достаточно высокими значениями электрических и светотехнических параметров и наиболее часто применяется в индикаторных устройствах [3]. Данные электролюминесцентные конденсаторы были получены и экспериментально исследованы в технологической лаборатории кафедры «Проектирование и технология электронных средств» Ульяновского государственного технического университета [9].

Количественные данные для численного расчета временных зависимостей яркости свечения были получены из справочных материалов и измерений светотехнических характеристик экспериментальных образцов тонкопленочных электролюминесцентных структур [9] и приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Значения параметров, используемые для люминофора на основе сульфида цинка, легированного марганцем ( $ZnS:Mn$ ) при решении кинетического уравнения (3)

Параметр	Значение*
$N$	$2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$
$\sigma$	$2 \times 10^{-16} \text{ см}^2$
$e$	$1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$
$\tau$	1,3 мс
$K_\lambda$	520 лм/Вт
$h\nu$	2,1 эВ
$\eta_s$	0,09
$d_{ph}$	1 мкм

На рисунке 1 приведены рассчитанные предложенным методом волны яркости для тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов, возбуждаемых периодическим синусоидальным, симметричным треугольным и знакопеременным импульсным напряжением амплитудой 240 В и частотой 1 кГц. Для знакопеременного импульсного напряжения время нарастания/спада и ширина импульсов были заданы равными 5 мкс и 30 мкс, соответственно.

Следует отметить, что зависимость плотности активного тока от времени  $j(t)$  в уравнении (3) также определялась условиями возбуждения, т. е. амплитудой, частотой и формой знакопеременного напряжения, и значениями конструктивных параметров структур. Значения  $j(t)$  были получены ранее для данных тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов численными методами [10, 11] и использованы в расчетах светотехнических характеристик.

Полученные расчетные данные показывают, что при возбуждении электролюминесценции периодическим знакопеременным импульсным напряжением нарастание яркости происходит до более высокого максимального значения, чем при возбуждении тех же структур знакопеременным напряжением других форм, причем это различие значений яркости может достигать 30%. Поэтому для получения большей яркости индикаторных устройств целесообразно их возбуждение знакопеременным импульсным напряжением.

Данные зависимости согласуются с представленными в работе [12] временными характеристиками яркости свечения тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов на основе пленок сульфида цинка, полученными с помощью экспериментальных исследований.

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод, имеющий важное практическое значение при создании устройств управления тонкопленочными

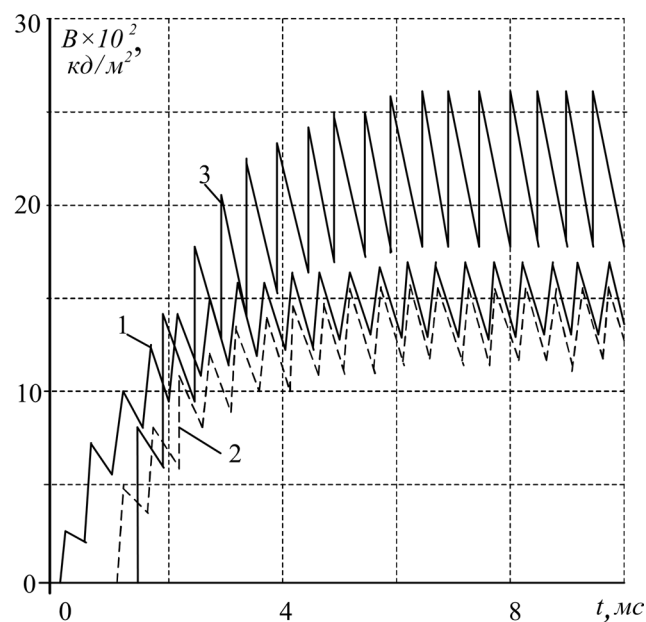


Рис. 1. Волны яркости тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов структур при возбуждении синусоидальным (1), симметричным треугольным (2) и импульсным знакопеременным напряжением (3)

электролюминесцентными индикаторными устройствами. При изучении электрических характеристик на основе математического моделирования и результатов экспериментальных измерений [10, 11] было установлено, что длительность электрических переходных процессов в тонкопленочных структурах составляет 1–3 периода приложенного знакопеременного напряжения. В то же время на основании проведенного моделирования динамики яркости показано, что продолжительность переходных процессов, определяемая по временным зависимостям яркости свечения электролюминесцентных излучателей, может достигать 8–10 периодов.

Таким образом, усредненная яркость индикаторного элемента при возбуждении люминесценции периодическим знакопеременным напряжением в течение одного или даже нескольких периодов значительно ниже значений яркости, которые могут быть получены при приложении к индикаторному элементу напряжения на время, соответствующее большему числу периодов. Поэтому при разработке схем управления панелями с большим числом элементов для получения высоких уровней яркости необходимо обеспечивать высвечивание индикаторных элементов пакетами импульсов знакопеременного напряжения, причем длительность этих пакетов не должна быть меньше времени, необходимого для достижения установившегося режима свечения излучающих элементов, т. е. 10–12 периодов.

Кроме того, полученные результаты могут быть использованы при выборе режимов модуляции яркости свечения излучающих элементов в матричных панелях и разработке методов и средств получения полутонковых изображений с необходимым числом градаций яркости для индикаторных панелей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование переходных светотехнических процессов в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах. Дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения плотности возбужденных центров свечения в пленке люминофора, преобразовано в обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, решением которого является временная зависимость яркости свечения электролюминесцентного конденсатора (волна яркости).

Показано, что для решения нелинейного дифференциального уравнения является предпочтительным использование метода Рунге-Кутты, обеспечивающего более высокую точность, которая полностью оправдывает большую трудоемкость вычислений. Разработана программа для численного решения нелинейного уравнения динамики яркости свечения методом Рунге-Кутты с помощью компьютера. Полученные результаты численного моделирования зависимостей яркости свечения электролюминесцентных конденсаторов при возбуждении переменным напряжением различной формы позволяют использовать их при выборе режимов возбуждения электролюминесценции и разработке схем управления тонкопленочными электролюминесцентными индикаторными элементами и устройствами на их основе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самохвалов М.К. Элементы и устройства оптоэлектроники. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 223 с.
2. Георгобiani А.Н., Пипинис П.А. Туннельные явления в люминесценции полупроводников. – М. : Мир, 1994. – 224 с.
3. Technology. Thin Film Electroluminescent Displays // Beneq Products Oy, Finland, 2018. – URL: <http://lumineq.com/en/technology>.
4. Самохвалов М.К. тонкопленочные электролюминесцентные источники излучения. – Ульяновск : УлГТУ, 1999. – 117 с.
5. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров : пер. с фр. – М. : Наука, 1967. – 779 с.
6. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. – М. : Наука, 1967. – 368 с.
7. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров : пер. с англ. – М. : Наука, 1972. – 400 с.
8. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ / под ред. Л.В. Данилова и Е.С. Филиппова. – М. : Радио и связь, 1983. – 343 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. Перенос заряда в тонкопленочных электролюминесцентных структурах // Письма в журнал технической физики. – 1995. – Т. 21, № 15. – С. 78–82.
11. Забудский Е.Е., Самохвалов М.К. Моделирование электрических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств // Микроэлектроника, 1998. – Т. 28, № 2. – С. 117–125.
12. Neyts K.A. et al. Transient measurements on AC thin-film electroluminescent devices // Proceedings of 6th International Workshop on Electroluminescence, 1992. – pp. 140–145.

## REFERENCES

1. Samokhvalov M.K. *Elementy i ustroystva optoelektroniki. 2-e izd.* [Optoelectronic Components and Devices, the 2nd Edition]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015. 223 p.
2. Georgobiani A.N. *Tunnelnye iavleniia v liuminesentsii poluprovodnikov* [Tunneling in Semiconductor Luminescence]. Moscow, Mir Publ., 1994. 224 p.
3. Technology. Thin Film Electroluminescent Displays. *Beneq Products Oy, Finland, 2018*. Available at: <http://lumineq.com/en/technology>.
4. Samokhvalov M.K. *Tonkoplionochnye elektroliuminescentnye istochniki izlucheniia* [Thin Film Electroluminescent Emitting Sources]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 1999. 117 p.
5. Anko A. *Matematika dlia elektro- i radioinzhenеров. Per. s fr.* [Mathematics for Electrical and Radio Engineers. Transl. from French]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 779 p.
6. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. *Demidovich B.P. Chislennye metody analiza* [Numerical Analysis Methods]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 368 p.
7. Hamming R. V. *Chislennye metody dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Numerical Methods for Scientists and Engineers. Transl. from Engl.]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 400 p.
8. *Raschiot elektricheskikh tsepei i elektromagnitnykh polei na EVM*. Pod red L.V. Danilova i E.S. Filippova [Electrical Circuits and Electromagnetic Fields Computing. Edited by L.V. Danilov and E.S. Filippov]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1983. 383 p.
9. Brigadnov I.Iu., Samokhvalov M.K. *Poluchenii i svoystva dielektricheskikh i liuminescentnykh plionok elektroliuminescentnykh kompozitsii na osnove sulfida zinka* [Production and Features of Dielectric Luminescent Films of Electroluminescent Zinc-Sulphide-Based Compositions]. *Izvestiia vysshnykh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki* [Proc. of Higher Educational Institutions. Materials of Electronics], 1998, no. 3, pp. 64–68.
10. Samokhvalov M.K. *Perenos zariada v tonkoplionochnykh elektroliuminescentnykh strukturakh* [Charge Transfer in thin Film Electroluminescent Structures]. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Letters to the Journal of Applied Physics], 1995, vol. 21, no. 15, pp. 78–82.

11. Zabudskii E.E., Samokhvalov M.K. Modelirovanie elektricheskikh kharakteristik tonkoplionochnykh elektroluminescentnykh indikatornykh ustroystv [Simulation of Electrical Characteristics of Thin-Film Electroluminescent Displays]. *Mikroelektronika* [Journal of microelectronics], 1998, vol. 28, no. 2, pp. 97–104.

12. Neyts K.A. et al. Transient Measurements on AC Thin-Film Electroluminescent Devices. *Proc. of the 6th International Workshop on Electroluminescence*. 1992, pp. 140–145.