

06;07;11

ВОЛЬТ-ЯРКОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СВЕТООТДАЧА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СТРУКТУР

© М.К. Самохвалов

Ульяновский государственный технический университет,
432027 Ульяновск, Россия
(Поступило в Редакцию 24 марта 1995 г.
В окончательной редакции 4 июля 1995 г.)

Исследованы электронные процессы в тонкопленочных электролюминесцентных структурах при возбуждении электролюминесценции переменным напряжением. На основе физической модели ударного возбуждения активаторных центров свечения в слое люминофора получены соотношения для расчета вольт-яркостных характеристик и светоотдачи светоизлучающих структур. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов и определены параметры марганцевых активаторов в пленке сульфида цинка.

Одной из основных задач разработок тонкопленочных электролюминесцентных источников излучения типа металл-диэлектрик-люминофор-диэлектрик-прозрачный электрод является повышение эффективности преобразования электрической энергии в световое излучение [1-8]. Для решения этой задачи были проведены исследования закономерностей, устанавливающих зависимости выходных характеристик от условий возбуждения электролюминесценции переменным напряжением.

Для объяснения физики процессов электролюминесценции в пленках люминофоров используется модель ударного возбуждения активаторных центров ускоренными электронами, в рамках этой модели рассматривается непосредственное взаимодействие электронного потока с центрами свечения в люминесцентном слое [1,2]. Анализ кинетики процессов электролюминесценции таким образом сводится к анализу процессов возбуждения активаторных центров, определяемых взаимодействием их с ускоренными электронами, и возвращения возбужденных центров в основное состояние с излучением фотонов, определяемого свойствами примесных атомов и их взаимодействием с кристаллической решеткой. Кинетика ударного возбуждения описывается изменением плотности возбужденных центров свечения в люминофоре,

скорости которого определяется разностью скоростей перехода активаторной примеси в возбужденное состояние и обратно [1,2],

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

где N — концентрация центров свечения, N^* — концентрация возбужденных центров, σ — сечение ударного возбуждения активатора, τ — постоянная времени излучательной релаксации активатора, j — плотность тока в люминофоре, e — заряд электрона, β — вероятность безызлучательной релаксации активатора.

Мгновенное значение яркости излучения тонкопленочной электролюминесцентной структуры пропорционально плотности возбужденных активаторов в пленке люминофора [3] и

$$B(t) = \eta_e dN^*(t)/\tau, \quad (2)$$

где $\eta_e = \eta_S K_\lambda h\nu$ — эффективность светового выхода; d — толщина люминофора; $h\nu$ — энергия излучаемых фотонов; η_S — коэффициент, определяемый отношением числа фотонов, излучаемых с поверхности электролюминесцентного конденсатора, к полному числу фотонов, возникающих в слое люминофора; K_λ — коэффициент видности, определяющий переход от энергетических характеристик излучения к величинам, характеризующим световое восприятие человеческого глаза (для $\lambda = 585$ нм $K_\lambda = 520$ лм/Вт [3]).

Таким образом, соотношения (1) и (2) позволяют произвести расчет временной зависимости яркости излучения при известной кинетике плотности тока в люминофоре, а также решить обратную задачу, т.е. с помощью экспериментальных измерений волн яркости и активного тока определить основные параметры люминофора [4].

Особенностью анализа оптических и электрических свойств электролюминесцентных излучателей при возбуждении переменным напряжением является периодичность изменения основных характеристик. В установившихся режимах возбуждения заряд, ток, рассеиваемая мощность и яркость излучения электролюминесцентного конденсатора изменяются одинаковым образом в течение каждого периода, поэтому некоторые характеристики являются взаимосвязанными друг с другом и могут быть выражены с помощью усредненных за период значений параметров.

При возбуждении электролюминесцентных структур переменным напряжением в установившемся режиме число центров, переходящих за период в возбужденное состояние, равно числу центров, возвращающихся в основное состояние, т.е.

$$\int_0^T \frac{dN^*}{dt} dt = 0.$$

Интегрирование за период правой части уравнения (1) с учетом соотношения (2) позволяет установить взаимосвязь между скоростью возбуждения центров свечения и средней яркостью излучения. Для

определения величины средней яркости излучения B_E использован известный закон Тальбота [1], согласно которому при любой частоте, обеспечивающей устранение влияния мельканий ($\geq 20-30$ Гц), эффективная (кажущаяся) яркость мерцающего источника света с периодическим изменением интенсивности равна его средней яркости за период изменения

$$B_E = \int_0^T B(t) dt.$$

Для исследованных нами тонкопленочных излучателей безызлучательная релаксация центров свечения была незначительной [4], поэтому анализ электронных процессов в электролюминесцентных структурах проводился без учета этого явления.

Соотношение для средней яркости излучения, устанавливающее зависимость ее от условия возбуждения и свойств тонкопленочной структуры, было получено в работе [6]

$$B_E = \frac{\eta_e d}{T} \left(\frac{\sigma}{e} N Q_T - \int_0^T j N^* dt \right), \quad (3)$$

где T — период изменения возбуждающего напряжения, Q_T — заряд, проходящий через слой люминофора за период.

Светоотдача электролюминесцентного источника излучения определяется как отношение средней яркости к энергии электрического поля, рассеиваемой в пленке люминофора за период изменения напряжения, т.е. к средней рассеиваемой мощности — $\eta = B_E / \pi P$. Электронные процессы в тонкопленочных структурах при возбуждении люминесценции переменным напряжением протекают в квазистационарном режиме [5], тогда средняя рассеиваемая мощность определяется как произведение величины заряда, протекающего через пленку люминофора за период, на величину порогового напряжения люминесцентного слоя $P = Q_T V_{LT} / T$. Тогда выражение для светоотдачи электролюминесцентного конденсатора может быть записано в следующем виде:

$$\eta = \frac{B_E}{\pi P} = \frac{B_E T}{\pi Q_T V_{LT}} = \eta_0 \left(1 - \frac{B_E}{B_0} \right), \quad (4)$$

где

$$\eta_0 = \frac{\eta_e d \sigma N}{\pi e V_{LT}} = \frac{\eta_0 \sigma N}{\pi e E_{LT}}$$

— максимальная величина светоотдачи, $E_{LT} = V_{LT} / d$ — пороговая напряженность электрического поля в люминесцентном слое.

Физический смысл введенной таким образом величины соответствует значению светоотдачи, когда в результате протекания активного тока в пленке люминофора производится возбуждение всех активаторных центров свечения и отсутствует взаимодействие ускоренных электронов с уже возбужденными центрами. В (4) $B_0 = \eta_e d N / (F \tau)$ — максимальная средняя яркость излучения,

$$F = \frac{1}{B_E Q_T} \int_0^T \left(\eta_e d \frac{N}{\tau} \right) j dt = \frac{1}{B_E Q_T} \int_0^T B(t) j(t) dt.$$

Физический смысл величины B_0 соответствует среднему значению яркости излучения, когда за период изменения напряжения возникает излучение, обусловленное переходом в основное состояние всех активаторных центров в пленке люминофора.

При использовании полученного соотношения для анализа зависимости светоотдачи от яркости излучения следует учитывать, что условия, рассмотренные при введении величин максимальной светоотдачи η_0 и максимальной средней яркости B_0 , являются практически нереализуемыми. Поэтому выражение (4) может применяться для оценки значений этих величин с помощью экстраполяции экспериментальных графических зависимостей. На основе экспериментально определенных значений параметров η_0 и B_0 можно рассчитать величины N , σ , τ и др. [4].

Из определения светоотдачи и выражения (4) может быть получено следующее соотношение для средней яркости

$$B_E = \left(\frac{1}{B_0} + \frac{1}{\eta_0 P} \right)^{-1} = \frac{\eta_0 B_0 P}{B_0 + \eta_0 P}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что для малых значений рассеиваемой в люминофоре мощности ($\eta_0 P \ll B_0$) яркость линейно возрастает с увеличением мощности $B_E \approx \eta_0 P$. Состояние насыщения яркости излучения $B_E = B_0$ возможно лишь для бесконечно большой мощности, т.е. является практически недостижимым.

Величина рассеиваемой в люминофоре мощности может быть получена усреднением выделяющейся энергии за период изменения напряжения [7]

$$P = \frac{Q_T V_{LT}}{T} = \frac{4}{T} \frac{C_D^2}{C_D + C_L} V_T (V - V_T), \quad (6)$$

где

$$V_T = \frac{C_D + C_L}{C_D} V_{LT}$$

— пороговое напряжение тонкопленочного электролюминесцентного излучателя, C_D и C_L — емкости диэлектрического и люминесцентного слоев соответственно.

Здесь полагается, что рассеяние электрической энергии в диэлектрических слоях отсутствует, в противном случае выражения (3)–(6) значительно усложняются.

Соотношения (5) и (6) позволяют объяснить зависимости яркости от напряжения (вольт-яркостные характеристики) и частоты, а также произвести расчет вольт-яркостной характеристики и светоотдачи для различных условий возбуждения, свойств материалов люминофора и диэлектрика и конструкции тонкопленочных электролюминесцентных источников излучения при воздействии переменного напряжения в установившемся режиме.

На рис. 1 представлены вольт-яркостные характеристики тонкопленочных электролюминесцентных структур, полученные с помощью расчетов с использованием соотношений (4)–(6) и экспериментальных

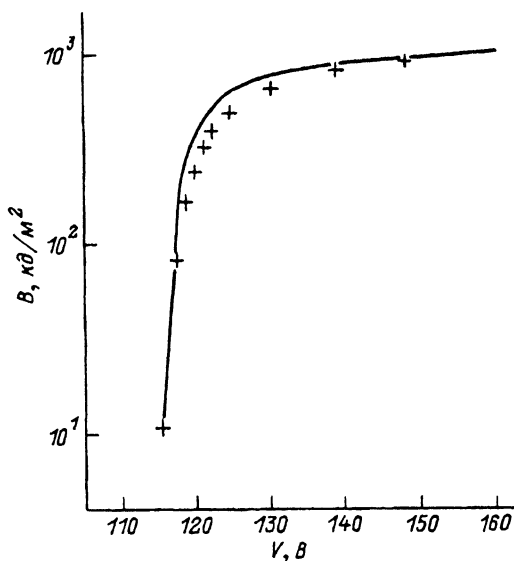


Рис. 1.

измерений. Расчеты и экспериментальные исследования были проведены для образцов, в которых в качестве люминофора использованы пленки сульфида цинка, легированного марганцем (0.5 вес.% в исходном материале), в качестве диэлектрического материала использован твердый раствор оксидов циркония и иттрия (13%) [7]. Тонкопленочные структуры были получены последовательным нанесением слоев диэлектрика, люминофора, диэлектрика и металла с помощью электронно-лучевого испарения.

Как видно из рис. 1, хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов наблюдается в области низкой и высокой яркости излучения. В то же время в средней части графика экспериментальные точки находятся ниже расчетной кривой, т.е. яркость излучения тонкопленочных структур не достигает теоретических значений. Расхождение данных в этом участке вольт-яркостной характеристики может быть обусловлено тем, что при преобразовании вы-

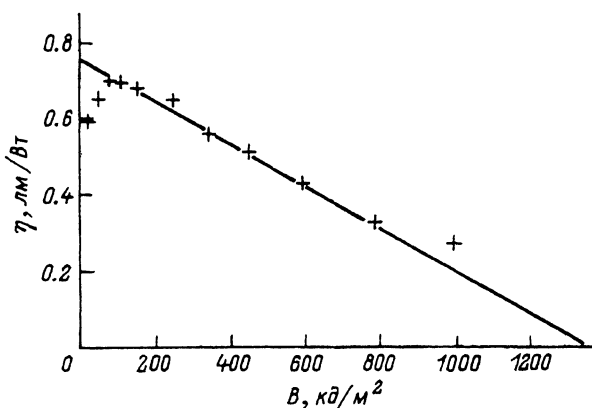


Рис. 2.

ражения (3) в выражение (4), использованная для расчетов величина параметра F полагалась постоянной, тогда как значения яркости излучения и плотности активного тока не являются независимыми величинами. Поэтому для уточнения представленных соотношений и проведения скорректированных вычислений необходим более детальный анализ процессов взаимодействия электронного потока с возбужденными активаторными центрами.

На рис. 2 представлены графики зависимости светоотдачи от яркости излучения тонкопленочных электролюминесцентных структур. Экспериментальная зависимость соответствует полученному соотношению (4). Однако на начальном участке графика зависимости наблюдается уменьшение светоотдачи, совпадающее с известными данными [3], что может быть объяснено особенностями механизмов генерации свободных носителей заряда в пленке люминофора [8]. С помощью данных измерений для исследованных образцов были определены значения параметров $\eta_0 = 0.7$ лм/Вт и $B_0 = 1250$ кд/м². На основании полученных соотношений рассчитаны значения плотности активаторных центров марганца в пленке сульфида цинка $N = 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и их сечение ударного возбуждения $\sigma = 3.5 \cdot 10^{-16}$ см², что совпадает с величинами этих параметров, определенными с помощью релаксационных измерений [4] и полученными другими авторами.

Линейность зависимости для больших значений яркости свидетельствует о незначительном влиянии безызлучательных процессов, что также согласуется с данными релаксационных измерений [4].

Таким образом, проведенные исследования электронных процессов в тонкопленочных электролюминесцентных структурах позволили получить соотношения для расчета вольт-яркостных характеристик и светоотдачи многослойных источников излучения. Полученные результаты могут быть использованы для экспериментального определения параметров люминофоров в тонкопленочных структурах, а также для разработки конструкций электролюминесцентных излучателей и расчетов режимов управления индикаторными устройствами на их основе.

Список литературы

- [1] *Верещагин И.К.* // Электролюминесценция кристаллов. М.: Наука, 1974. 280 с.
- [2] *Allen J.W.* // J. Lum. 1981. Vol. 23. P. 127-139.
- [3] *Mach R., Müller G.O.* // Phys. Stat. Sol. 1984. Vol. 81a. P. 609-623.
- [4] *Самозвалов М.К.* // Тез. докл. Междунар. конф. по люминесценции. М.: 1994. С. 40.
- [5] *Самозвалов М.К.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 6. С. 67-71.
- [6] *Самозвалов М.К.* // Электронная техника. Полупроводниковые приборы. 1990. № 3. С. 86-89.
- [7] *Самозвалов М.К., Рябинов Е.Б.* // ЖПС. 1993. Т. 58. С. 495-499.
- [8] *Самозвалов М.К.* // Изв. Вузов. Физика. 1988. № 10. С. 124.