

06;07

Определение сечения ударного возбуждения активаторов в люминофоре на основе измерений вольт-яркостных характеристик тонкопленочных электролюминесцентных структур

© М.К. Самохвалов, Р.Р. Давыдов, Э.И. Хадиуллин

Ульяновский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 10 ноября 2000 г.

Разработан новый способ определения параметров центров свечения в слое люминофора тонкопленочного электролюминесцентного индикатора на основе сульфида цинка. Осуществлена ее апробация и получены численные значения концентрации активаторных центров и сечения ударного возбуждения. Приводится сравнение полученных результатов с данными, полученными ранее.

В настоящее время тонкопленочные электролюминесцентные структуры являются основой для создания перспективных плоских активных индикаторных устройств. Для разработки эффективных и надежных индикаторов необходимы исследования свойств электролюминесцентных структур и зависимости параметров излучающих элементов от конструктивно-технологических факторов и особенностей режимов возбуждения электролюминесценции в тонкопленочных структурах. Исследования физических процессов в тонких люминесцентных пленках позволяют также изучить механизмы генерации и ускорения носителей заряда в сильном электрическом поле и их взаимодействие с активаторными центрами свечения. В связи с этим был разработан метод определения основных параметров, характеризующих свойства центров свечения в пленках люминофоров на основе измерений вольт-яркостных характеристик электролюминесцентных структур при воздействии переменного напряжения.

Основное уравнение электролюминесценции в рамках модели прямого ударного возбуждения центров свечения в люминофоре описывает кинетику изменения концентрации возбужденных активаторных центров

N^* следующим соотношением [1]:

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

где σ — сечение ударного возбуждения центра свечения, e — заряд электрона, j — плотность тока через люминесцентный слой, N — концентрация активаторных центров, τ — постоянная времени спада свечения. Используя это уравнение для установившегося режима, при котором за период изменения напряжения центры свечения переходят в возбужденное состояние и возвращаются в исходное состояние с генерацией излучения, то есть

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

и используя закон Тальбота (частота напряжения многократно превышает частоту мельканий, при которой обеспечивается их слияние для человеческого глаза):

$$B_1 = \frac{1}{T} \int_0^T B(t) dt,$$

найдем выражение для зависимости средней яркости свечения тонкопленочных электролюминесцентных структур B_1 от амплитуды и частоты приложенного напряжения, полученное в рамках модели прямого ударного возбуждения центров свечения в люминофоре:

$$B_1 = \frac{\eta_0 B_0 f k (V - V_n)}{B_0 + \eta_0 f k (V - V_n)}. \quad (2)$$

Здесь V и t — амплитуда и частота переменного напряжения, V_n — пороговое напряжение, B_0 — максимальная яркость, которая соответствует значению средней яркости излучения в случае, если за период изменения напряжения все активаторные центры переходят из возбужденного в основное состояние, η_0 — максимальная величина светоотдачи, физический смысл которой соответствует значению этого параметра в условиях, когда в результате протекания активного тока в пленке люминофора возбуждаются все активаторные центры и отсутствует

взаимодействие ускоренных электронов с уже возбужденными центрами [2,3]. Коэффициент $k = 4V_n C C_D C_L^{-1}$ определяется из выражения для средней рассеиваемой мощности в слое люминофора $P_1 = fk(V - V_n)$, где C — емкость всей электролюминесцентной структуры, C_D и C_L — емкости слоев диэлектрика и люминофора соответственно [2,3].

Яркость и светоотдача являются одними из основных параметров источников излучения, однако для тонкопленочных электролюминесцентных излучателей их значения сильно зависят от условий измерения, что затрудняет сравнение их величин для различных тонкопленочных структур. Предлагаемые нами параметры B_0 и η_0 характеризуются свойствами используемых материалов и конструктивными факторами, их значения не зависят от режимов возбуждения и определяют максимальную яркость и максимальную светоотдачу пленки люминофора. Данные величины предлагается использовать для сравнения различных индикаторных элементов и для расчетов режимов и устройств управления индикаторными приборами.

Несложные преобразования [2] позволяют привести выражение (2) к следующему виду:

$$\frac{1}{B_1} = \frac{1}{B_0} + \frac{1}{\eta_0 f k (V - V_n)}. \quad (3)$$

Таким образом, для определения величин максимальной яркости и светоотдачи необходимы измерения вольт-яркостных характеристик электролюминесцентных структур при разных частотах возбуждающего напряжения. Представление экспериментальных зависимостей в координатах $1/B$ от $1/f$ или от $1/(V - V_n)$ позволяет установить значения данных параметров (B_0 и η_0), используя аппроксимацию линейных зависимостей на ось ординат и определение тангенса угла наклона прямых линий.

Величина максимальной яркости свечения электролюминесцентной структуры определяется свойствами люминофора и конструктивными параметрами излучающего элемента:

$$B_0 = \eta_c d_L N \tau^{-1},$$

где η_c — эффективность светового выхода, определяемая оптическими константами используемых материалов; d_L — толщина пленки люминофора.

Величина максимальной светоотдачи зависит от свойств люминофора:

$$\eta_0 = (\eta_c \sigma N)(\pi e E_{LT})^{-1},$$

где E_{LT} — пороговое значение напряженности электрического поля в люминофоре. Таким образом, определение максимальной яркости и светоотдачи позволяет рассчитать параметры центров свечения в люминесцентном слое: концентрацию и сечение ударного возбуждения активаторов. Особенно полезным предлагаемый способ обработки вольт-яркостных характеристик представляется для определения сечения ударного возбуждения центров свечения, так как другие способы требуют либо сложной измерительной аппаратуры для изучения кинетики процессов, либо дополнительных измерений рассеиваемой мощности [4,5].

Изучение свойств тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов проводилось для систем металл–диэлектрик–люминофор–диэлектрик–прозрачный электрод, изготовленных методом вакуумного напыления на стеклянную подложку. В качестве люминофора использовались пленки сульфида цинка, легированного марганцем (0.5 at.%), толщиной 0.5–2.5 μm , в качестве диэлектрических слоев — твердые растворы оксидов циркония и иттрия толщиной 0.2–0.3 μm . Проводились измерения вольт-яркостных характеристик и частотной зависимости интегральной яркости при возбуждении электролюминесценции гармоническим напряжением. Типичные экспериментальные зависимости яркости от амплитуды и частоты возбуждающего напряжения в координатах $1/B$ от $1/f$ и $1/B$ от $1/(V - V_n)$ представлены на рис. 1 и 2.

Как видно на представленных рисунках, полученные экспериментальные точки в данных координатах хорошо аппроксимируются прямыми линиями, сходящимися при пересечении оси ординат. Таким образом, полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическим соотношением (3), полученным на основе модели прямого ударного возбуждения активаторных центров свечения в пленке люминофора.

С помощью предложенного метода на основе измерений вольт-яркостных характеристик и частотных зависимостей яркости определены максимальные яркость $B_0 = (1.35 \pm 0.01) \cdot 10^4 \text{ kd/m}^2$ и светоотдача $\eta_0 = 4.76 \pm 0.05 \text{ lm/W}$, полученные значения соответствуют величинам, определенным другими методами, а также известным

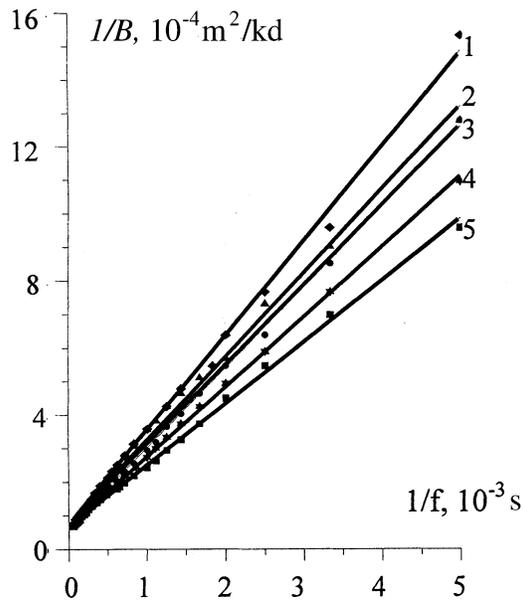


Рис. 1. Зависимость величины, обратной яркости, от величины, обратной частоте: 1 — $V = 200$ V, 2 — $V = 207$ V, 3 — $V = 214$ V, 4 — $V = 221$ V, 5 — $V = 228$ V.

данным. Нами были вычислены параметры марганцевых активаторных центров свечения в цинк-сульфидном люминофоре: концентрация $N = (1.25 \pm 0.12) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и сечение ударного возбуждения активаторов $\sigma = (2.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$.

Концентрация центров свечения составляет несколько процентов от введенной в люминесцентный слой примеси марганца при изготовлении структур. Данное расхождение объясняется эффектом собственного активаторного насыщения TAS (true activated saturation), когда значительная часть ионов марганца занимает в люминофоре положение, в котором они имеют существенно меньшую эффективность излучения или же совсем не принимают участия в процессах возбуждения и излучения. При напылении пленки сульфида цинка, легированного марганцем, ионы марганца не только замещают ионы цинка, но в большей

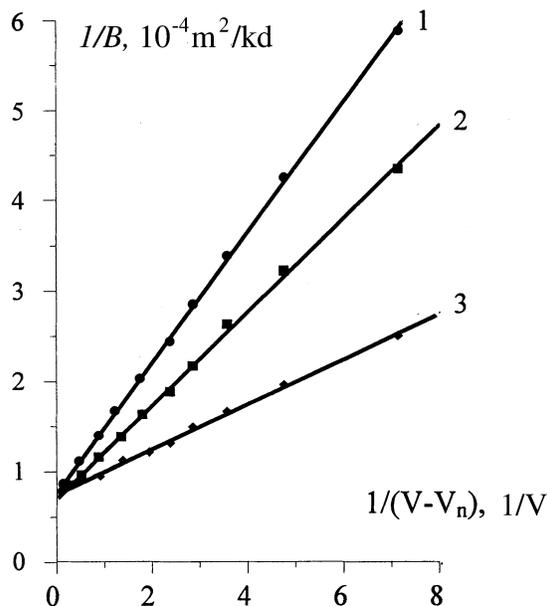


Рис. 2. Зависимость величины, обратной яркости, от $1/(V - V_n)$:
 1 — $f = 800$ Hz, 2 — $f = 1$ kHz, 3 — $f = 1.6$ kHz.

степени накапливаются в межкристаллитных границах и, возможно, в междоузлиях, не участвуя в образовании центров свечения [6]. Ранее оценка числа возбужденных центров свечения по величине яркости и времени релаксации составила значение, не превышающее 10% от общего числа введенных в пленку ионов Mn^{2+} [7].

Сечение ударного возбуждения является параметром, характеризующим вероятность взаимодействия ускоренного электрона с активаторным центром свечения, сопровождающегося передачей энергии и переходом активатора в возбужденное состояние [1,2]. Расчет значения данного параметра с помощью теоретических оценок затруднителен, поскольку требуется учет энергии электрона, заряда и положения активатора в кристаллической решетке, а также влияния окружающих ионов [3]. Однако экспериментальное определение сечения ударного возбуждения позволяет оценивать и сравнивать вероятностные

характеристики процессов возбуждения электролюминесценции в различных люминофорах. Полученная нами величина сечения ударного возбуждения соответствовала значениям, полученным другими авторами. В работе [8] приводится значение сечения ударного возбуждения $\sigma = (2-4) \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$, определяемое с помощью измерений волн яркости, когда скорость возбуждения активатора значительно превосходит скорость излучательной релаксации. В работе [9] приводится значение $\sigma = 4 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$, вычисляемое из определения эффективности возбуждения с применением подгоночных параметров, в частности средней длины свободного пробега электронов. Для более точного изучения данного физического параметра необходимы дополнительные исследования для различных образцов, режимов возбуждения электролюминесценции и способов определения сечения ударного возбуждения.

Таким образом, полученные на основе модели прямого ударного возбуждения центров свечения в люминофоре выражения для зависимости яркости излучения от амплитуды и частоты приложенного переменного напряжения позволили определить основные параметры тонкопленочных электролюминесцентных источников излучения и с помощью экспериментальных исследований вольт-яркостных характеристик рассчитать концентрацию и сечение ударного возбуждения марганцевых активаторных центров в пленках цинк-сульфидного люминофора.

Список литературы

- [1] *Mach R., Muller G.O.* // Phys. Stat. Sol. 1984. V. 81. N 2. P. 609–623.
- [2] *Самохвалов М.К.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 10. С. 139–144.
- [3] *Самохвалов М.К.* Тонкопленочные электролюминесцентные источники излучения. Ульяновск: Изд. УлГТУ, 1999. 117 с.
- [4] *Самохвалов М.К.* // Журн. прикл. спектроскопии. 1995. Т. 62. В. 3. С. 182–185.
- [5] *Самохвалов М.К.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 15. С. 78–82.
- [6] *Muller G.O., Mach R.* // J. of Luminescence. 1988. V. 40/41. P. 92–96.
- [7] *Власенко Н.А., Гурьянов С.Н.* // Изв. АН. Сер. физ. 1985. Т. 49. В. 10. С. 1909–1915.
- [8] *Гурин Н.Т., Сабитов О.Ю.* // Тр. Междунар. конф. "Центры с глубокими уровнями в полупроводниках и полупроводниковых структурах". Ульяновск: Изд. УлГУ, 1997. С. 122–123.
- [9] *Mach R.* // Polycryst. Semicond. 1985. V. 2. P. 186–208.