

06;07

## Определение параметров активаторов в люминофорах тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов

© М.К. Самохвалов, Р.Р. Давыдов

Ульяновский государственный технический университет  
E-mail: sam@ulstu.ru

Поступило в Редакцию 8 июля 2002 г.

Проведен анализ метода определения концентрации и сечения прямого ударного возбуждения активаторных центров в слое люминофора тонкопленочного электролюминесцентного конденсатора с помощью измерений вольт-яркостных характеристик и зависимостей яркости от частоты переменного напряжения. Обсуждается методическая погрешность определения параметров при возбуждении электролюминесценции симметричным знакопеременным пилообразным напряжением. Определены значения параметров для люминесцентных пленок  $ZnS:Mn$ ,  $ZnS:TbF_3$  и  $ZnS:SmF_3$ .

Для исследования процессов электролюминесценции в тонких пленках и производства электролюминесцентных индикаторных элементов и устройств необходима разработка методов контроля параметров люминесцентных слоев в тонкопленочных структурах. Основными функциональными характеристиками тонкопленочных электролюминесцентных источников излучения переменного тока являются вольт-яркостные характеристики и зависимости яркости от частоты переменного напряжения.

На основе моделей туннельной эмиссии электронов из ловушек границы раздела люминофор–диэлектрик и прямого ударного возбуждения активаторов в слое люминофора [1] нами получена зависимость яркости свечения  $B$  от амплитуды  $V_A$  и частоты  $f$  переменного напряжения [2]:

$$B = \left[ \frac{W}{B_0} + \frac{\pi}{\eta_0 k f (V - V_T)} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $B_0$  и  $\eta_0$  — максимальная яркость и светоотдача;  $k = 4CC_D C_L^{-1} V_T$ ;  $C$ ,  $C_D$  и  $C_L$  — емкости структуры, диэлектриков и люминофора

соответственно;  $V_T$  — пороговое напряжение электролюминесцентного конденсатора;  $W$  — коэффициент, учитывающий особенности возбуждения электролюминесценции.

Таким образом, с помощью графиков зависимости  $1/B$  от  $1/f$  или от  $1/(V-V_T)$  определяются значения максимальной яркости и светоотдачи, которые характеризуются свойствами материалов и конструктивными параметрами и не зависят от режимов возбуждения [3].

Величина коэффициента  $W$  обуславливается особенностями возбуждения электролюминесценции, а именно взаимодействием ускоренных электронов с возбужденными активаторными центрами [2]:

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

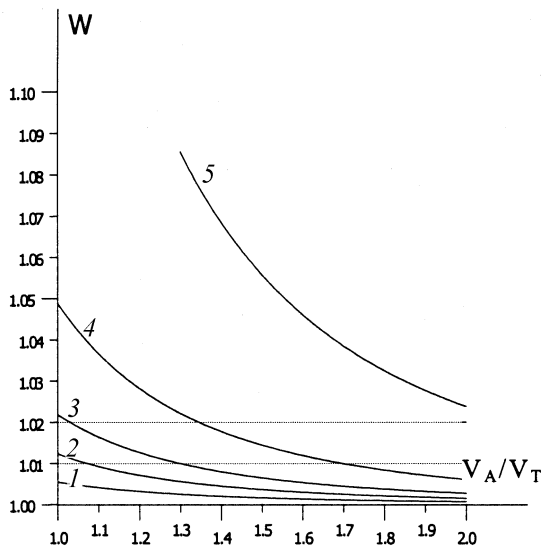
где  $j(t)$  — активный ток в люминофоре,  $Q_T$  — заряд, переносимый через люминофор за период  $T$  изменения напряжения. Величина  $W$  может быть определена численными методами для достаточно высоких частот  $W \approx 1$  [2–4]. Для количественной оценки этого приближения, характеризующей методическую погрешность измерений, нами проведен аналитический расчет коэффициента  $W$  при возбуждении электролюминесценции симметричным знакопеременным пилообразным напряжением. В этом случае режим квазистационарного самоэкранирования люминофора при возникновении свечения характеризуется постоянным уровнем активного тока в люминофоре, определяемого скоростью развертки напряжения:  $j_D = C_D dV/dt$  [4]. Тогда с учетом закона Тальбота

$$W = \frac{T}{2\Delta t_B} \left( \frac{B_C \Delta t_C}{B_B \Delta t_B} + 1 \right)^{-1},$$

где  $B_B$  и  $B_C$  — средние значения яркости для отрезков времени нарастания  $\Delta t_B$  и спада  $\Delta t_C$  яркости соответственно. Однако точное экспериментальное определение этих параметров весьма затруднительно. С учетом линейной зависимости напряжения от времени и линейного нарастания и экспоненциального спада данное выражение преобразовано в следующее:

$$W = \left[ 1 + \frac{V_T}{V} \left( 4f\tau \frac{V}{V_T} \operatorname{th} \left( \frac{1}{4f\tau} \frac{V_T}{V} \right) - 1 \right) \right]^{-1},$$

где  $\tau$  — постоянная времени релаксации активаторного центра. На рис. 1 представлены рассчитанные графики зависимости коэффици-

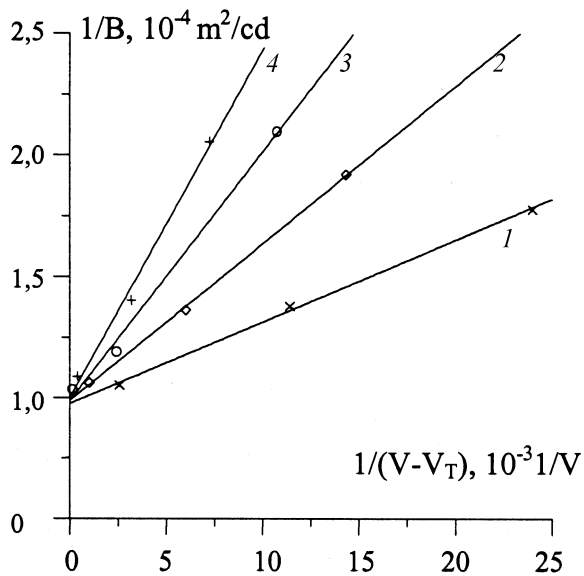


**Рис. 1.** Зависимость параметра  $W$  от отношения амплитудного и порогового напряжений для структуры с цинксulfидным люминофором, легированным марганцем, для частот: 1 — 1.5 kHz, 2 — 1 kHz, 3 — 750 Hz, 4 — 500 Hz, 5 — 250 Hz.

ента  $W$  от амплитуды переменного напряжения различной частоты для люминесцентных слоев сульфида цинка, легированного марганцем ( $\tau = 1.3$  ms [5]). Как видно на рисунке, величина коэффициента  $W$  уменьшается с ростом частоты и для  $f \geq 1.2$  kHz методическая погрешность уменьшается до 1% и менее при всех значениях амплитуды напряжения. Для люминесцентных слоев  $\text{ZnS:TbF}_3$  ( $\tau = 0.64$  ms) и  $\text{ZnS:SmF}_3$  ( $\tau = 0.27$  ms) [5] соответствующие значения минимальной частоты составляют 2 и 5 kHz.

Дополнительными источниками методической погрешности могут быть утечки в диэлектрике в сильных электрических полях и непостоянный уровень активного тока при возбуждении электролюминесценции в электрическом поле чуть больше порогового.

Экспериментальные исследования электролюминесцентных структур проводились для систем металл–диэлектрик–люминофор–диэлектрик–прозрачный электрод, изготовленных методом вакуумного напы-



**Рис. 2.** Зависимость яркости от разности амплитудного и порогового напряжений в обратных координатах для структуры с цинксульфидным люминофором, легированным марганцем, для частот: 1 — 1.5 kHz, 2 — 1 kHz, 3 — 750 Hz, 4 — 500 Hz.

ления на стеклянную подложку. В качестве люминофора использовались пленки сульфида цинка, легированного марганцем (0.5 at.%), фторидом тербия (5 at.%) или фторидом самария (3 at.%) толщиной 1.0–1.5  $\mu\text{m}$ , в качестве диэлектрических слоев — твердые растворы оксидов циркония и иттрия толщиной 0.2–0.3  $\mu\text{m}$  [5]. Проведены измерения вольт-яркостных характеристик и частотной зависимости яркости при возбуждении электролюминесценции симметричным знакопеременным пилообразным напряжением. Типичные экспериментальные зависимости яркости от амплитуды приложенного напряжения в координатах  $1/B$  от  $1/(V - V_T)$  представлены на рис. 2. Полученные экспериментальные точки в данных координатах хорошо аппроксимируются прямыми линиями, сходящимися при пересечении с осью ординат, что позволило установить значения  $B_0$  и  $\eta_0$ . Следует отметить, что точность измерений обуславливалась погрешностью определения

Люминофор	Максимальная яркость $B_0, \text{cd/m}^2$	Максимальная светоотдача $\eta_0, \text{lm/Wt}$	Концентрация центров свечения $N, \text{cm}^{-3}$	Сечение возбуждения центров свечения $\sigma, \text{cm}^2$
ZnS:Mn	10246	7.6	$3.3 \cdot 10^{18}$	$1.4 \cdot 10^{-16}$
ZnS:TbF <sub>3</sub>	6718	1.4	$5.6 \cdot 10^{17}$	$1.0 \cdot 10^{-16}$
ZnS:SmF <sub>3</sub>	825	0.3	$3.6 \cdot 10^{15}$	$5.4 \cdot 10^{-16}$

яркости источника излучения, для используемого нами фотометра ФПЧ инструментальная погрешность достигала 10%.

С помощью определенных таким образом значений максимальной яркости и светоотдачи вычислялись величины концентрации  $N$  и сечения ударного возбуждения  $\sigma$  активаторных центров свечения в люминесцентных пленках [3]. В таблице представлены результаты экспериментальных исследований тонкопленочных электролюминесцентных структур.

Полученные значения соответствуют результатам других исследователей [1], а также экспериментальным данным, определенным для аналогичных структур другими методами [5].

Результаты исследований могут быть использованы при исследовании электролюминесценции в тонких пленках и для контроля параметров электролюминофоров и тонкопленочных индикаторов устройств.

Исследования проведены в рамках проекта Б-0107 ФЦП „Интеграция“.

## Список литературы

- [1] Георгобидани А.Н., Питинис П.А. Туннельные явления в люминесценции полупроводников. М.: Мир, 1994. 224 с.
- [2] Самохвалов М.К. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 10. С. 139–144.
- [3] Самохвалов М.К., Давыдов Р.Р., Хадиуллин Э.И. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 8. С. 74–80.
- [4] Самохвалов М.К. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 6. С. 67–71.
- [5] Бригаднов И.Ю., Самохвалов М.К. // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 1998. № 3. С. 64–68.