

06;07;12

Формирование вольт-яркостной характеристики тонкопленочных электролюминесцентных излучателей на основе сульфида цинка

© Н.Т. Гурин, А.В. Шляпин, О.Ю. Сабитов

Ульяновский государственный университет
E-mail: soy@sv.uven.ru

Поступило в Редакцию 28 июня 2001 г.

На основе исследования кинетики мгновенной яркости и тока, протекающего через слой люминофора в активном режиме, во взаимосвязи с кинетикой среднего поля в слое люминофора, полевыми, зарядовыми зависимостями мгновенной яркости, вольт-амперными характеристиками проанализирован процесс формирования вольт-яркостной характеристики тонкопленочных электролюминесцентных излучателей. В качестве причин появления участка насыщения на вольт-яркостной характеристике предполагаются уменьшение эффективной толщины слоя люминофора и изменение механизма рассеяния носителей заряда.

Основной особенностью тонкопленочных электролюминесцентных излучателей (ТП ЭЛИ) на основе ZnS:Mn является наличие участка насыщения на вольт-яркостных характеристиках (ВЯХ), отражающих зависимость средней (кажущейся) яркости свечения от амплитуды знакопеременного напряжения возбуждения. В качестве объяснения такого поведения ВЯХ предполагается: выход на насыщение зависимости от напряжения возбуждения напряжения на той области структуры, где происходит возбуждение электролюминесценции; истощение источника электронов, попадающих в область сильного поля в люминофоре; увеличение доли неизлучательных переходов в электролюминофоре с возможным одновременным уменьшением квантового выхода и светоотдачи [1].

Целью работы является изучение причины насыщения яркости свечения ТП ЭЛИ при увеличении напряжения возбуждения на основе исследования кинетики мгновенной яркости L и тока I_p , протекающего через слой люминофора в активном режиме, во взаимосвязи с кинетикой сред-

него поля в слое люминофора F_p , полевыми, зарядовыми зависимостями мгновенной яркости, вольт-амперными и другими характеристиками.

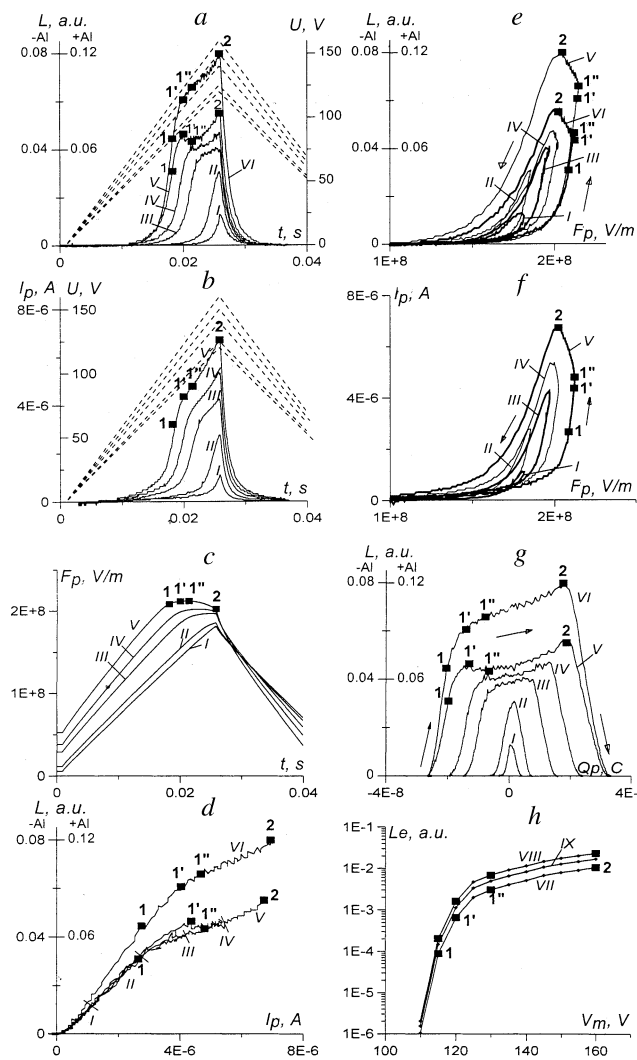
Для решения данной задачи были выполнены экспериментальные исследования ТП ЭЛИ со структурой МДПДМ (металл–диэлектрик–полупроводник–диэлектрик–металл), где M — нижний прозрачный электрод на основе SnO_2 толщиной $0.2 \mu\text{m}$, нанесенный на стеклянную подложку, и верхний непрозрачный тонкопленочный электрод на основе Al толщиной $0.15 \mu\text{m}$ диаметром 1.5mm : П — электролюминесцентный слой ZnS:Mn (0.5% mas.) толщиной $0.48 \mu\text{m}$; Д — диэлектрический слой $\text{ZrO}_2 \times \text{Y}_2\text{O}_3$ (13% mas.) толщиной $0.17 \mu\text{m}$. Слой люминофора наносили вакуум-термическим испарением в квазизамкнутом объеме при температуре подложки 250°C с последующим отжигом при температуре 250°C в течение часа, непрозрачный электрод — вакуумтермическим испарением, диэлектрические слои получали электронно-лучевым испарением. Исследованы зависимости мгновенной яркости свечения L и тока через ТП ЭЛИ I_e от времени t при возбуждении ТП ЭЛИ знакопеременным напряжением треугольной формы $V(t)$, подаваемым с генератора Г6-34 с дополнительным усилителем — формирователем и внешним генератором запуска Г5-89. Максимальная амплитуда импульсов составляла $V_m = 160 \text{V}$ при коэффициенте нелинейности напряжения не более 2%. В режиме однократного запуска напряжение возбуждения представляло собой пачку импульсов из двух периодов напряжения треугольной формы, следующих с частотой $f = 10 \text{Hz}$ с подачей положительной и отрицательной полуволн напряжения в первом полупериоде на верхний электрод (варианты (+Al) и (-Al) соответственно). Время между однократными запусками составляло 1 с. Ток I_e измерялся с помощью включаемого последовательно с ТП ЭЛИ резистора сопротивлением $10 \text{k}\Omega$, падение напряжения на котором не превышало 1 V. Мгновенное значение яркости L измерялось с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-84-3. Зависимости $V(t)$, $I_e(t)$, $L(t)$ фиксировались с помощью двухканального запоминающего осциллографа С9-16, связанного через интерфейс с персональным компьютером, которые обеспечивали для каждого канала измерение и запоминание 2048 точек выбранного периода дискретизации и 256 уровней квантования амплитуды. Математическая и графическая обработка производилась с помощью прикладных программных пакетов Maple V Release4 Version 4.00b и GRAPHER Version 1.06. 2-D Graphing System. Зависимости $F_p(t)$, а также тока $I_p(t)$ и заряда $Q_p(t)$, протекающих через слой люминофора в режиме свечения ТП ЭЛИ, определялись по

методике, изложенной в [2] при значениях емкости диэлектрических слоев $C_i = 730$ pF, слоя люминофора $C_p = 275$ pF, определенных с помощью измерителя иммитанса E7-14 и геометрических размеров ТП ЭЛИ. Средняя яркость определялась по закону Тальботта для пульсирующего источника излучения

$$L_e = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} L(t) dt, \quad (1)$$

где $T = 1/f$ — период напряжения возбуждения.

Полученные данные позволяют детально рассмотреть процесс формирования ВЯХ и определить причины насыщения средней яркости свечения L_e при увеличении амплитуды напряжения возбуждения V_m . Приведенные на рисунке семейства различных зависимостей, характеризующих изменение кинетики электролюминесценции при увеличении амплитуды напряжения возбуждения V_m , показывают, что один "быстрый" участок нарастания зависимости $L(t)$ [2,3] с верхней граничной точкой I наблюдается в диапазоне значений $V_m = (120-125)$ V (см. рисунок, *a*), при которых зависимости $I_p(t)$ и $Q_p(t)$ также имеют только один участок нарастания (см. рисунок, *b, g*), который, как и зависимость $L(t)$, описывается экспонентой с той же постоянной времени; зависимость $L(I_p)$ (см. рисунок, *d*) близка к линейной. При этом характер изменения среднего поля в слое люминофора $F_p(t)$ (см. рисунок, *c*) слабо отличается от закона изменения напряжения возбуждения $V(t) = V_m t / t_m$. Этому участку соответствуют слабый гистерезис ВАХ слоя люминофора $I_p(F_p)$ (см. рисунок, *e*) и область резкого роста средней яркости L_e на ВЯХ в зависимости, близкой к $\lg L_e \sim V_m$ (см. рисунок, *h*). При увеличении V_m на 5–10 V появляется второй "медленный" участок нарастания на зависимости $I_p(t)$, где скорость нарастания тока меняет знак, и на зависимостях $L(t)$, $L(I_p)$, $L(Q_p)$; зависимость $F_p(t)$ сильнее отклоняется от линейной; на ВАХ $I_p(F_p)$ увеличивается гистерезис, что обусловлено перезарядкой глубоких донорных и акцепторных центров и соответствующим изменением полей объемных зарядов этих центров в прианодной и прикатодной областях слоя люминофора [2,4], а на ВЯХ формируется переход к участку насыщения. При последующем увеличении V_m на зависимостях $L(t)$ и $I_p(t)$ полностью проявляются вторые "медленные" участки роста; зависимость $F_p(t)$ существенно отклоняется от линейной, ВАХ на данной частоте f характеризуется



Формирование ВЯХ. Зависимости: *a* — $L(t)$, *b* — $I_p(t)$, *c* — $F_p(t)$, *d* — $L(I_p)$, *e* — $L(F_p)$, *f* — $I_p(F_p)$, *g* — $L(Q_p)$, *h* — $L_e(V_m)$; I — $V_m = 120$ V, вариант (-Al); II — 125 V (-Al); III — 140 V (-Al); IV — 150 V (-Al); V — 125 V (-Al); VI — 160 V, вариант (+Al); VII — $L_e(V_m)$, (-Al); VIII — $L_e(V_m)$, (+Al); IX — ВЯХ за период $V(t)$.

появлением S -участка и значительным гистерезисом; зависимость $L_e(t)$ выходит на насыщение (см. рисунок, h ; кривая VIII). При этом точка I' соответствует началу существенного ослабления зависимостей $L(t)$, $I_p(t)$, $F_p(t)$ при $V_m = 160$ В, точка I'' — началу образования S -участка на ВАХ, точка 2 — значению $V(t_m) = V_m$ (см. рисунок, f). Вариант (+Al) по сравнению с вариантом (-Al) характеризуется большими значениями L и несколько иной формой зависимости $L(t)$ (см. рисунок, a) при близкой зависимости $I_p(t)$, что соответствует [2,3]. Соответственно зависимости $L(I_p)$, $L(Q_p)$, $L(F_p)$ (см. рисунок, d, e, g) и ВЯХ (см. рисунок, h ; кривая VIII) для этого варианта расположены выше. Полная ВЯХ за период напряжения возбуждения $V(t)$ получается усреднением соответствующих ВЯХ вариантов (+Al), (-Al) и занимает промежуточное положение (см. рисунок, h ; кривая IX).

Следует отметить, что форма зависимости $L(I_p)$ в области между точками 1 и 2 существенно зависит от частоты напряжения возбуждения и вариантов (+Al), (-Al) — с увеличением частоты в этой области возможно появление как сублинейных, так и сверхлинейных участков. Это обусловлено изменением соотношения между скоростями изменения яркости $L(t)$ и тока $I_p(t)$ в данной области и связано с изменением ВАХ слоя люминофора.

Вид зависимостей $L(t)$, $I_p(t)$, $L(F_p)$, $I_p(F_p)$, $L(Q_p)$, $L(I_p)$ свидетельствует о том, что основной причиной появления участка насыщения на ВЯХ является изменение характера переноса носителей заряда через слой люминофора, обусловленное изменением распределения электрического поля в этом слое, что приводит к уменьшению темпа роста (или даже к снижению) яркости L при увеличении тока I_p или заряда Q_p (см. рисунок, d, g). Это, с одной стороны, указывает на уменьшение числа центров свечения, возбуждаемых одним электроном, прошедшим через слой люминофора, $N_1(t)$ [1], так как зависимость $L(t)$ связана с $N_1(t)$ и концентрацией возбужденных центров свечения $N^*(t)$ формулой [1,3]:

$$L(t) = \frac{AN_1(t)N^*(t)P_r}{\tau^*}, \quad (2)$$

где A — постоянная, τ^* — время жизни центра свечения в возбужденном состоянии, P_r — вероятность излучательной релаксации центра свечения,

$$N_1(t) = d_p(t)\sigma N, \quad (3)$$

$d_p(t)$ — эффективная толщина слоя люминофора, в пределах которой происходит ударное возбуждение центров свечения; σ и N — сечение

ударного возбуждения и концентрация центров свечения соответственно.

При этом уменьшение $N_1(t)$ обусловлено, по-видимому, уменьшением $d_p(t)$, вызванным перезарядкой глубоких донорных центров, образованных вакансиями цинка V_{Zn} у анода, сопровождающейся уменьшением поля у анода, среднего поля F_p [2,5,6] и появлением S -образного участка на ВАХ (см. рисунок, f). В результате вблизи анода энергии свободных электронов может быть недостаточно для возбуждения центров свечения Mn^{2+} .

С другой стороны, концентрация возбужденных центров свечения $N^*(t)$ пропорциональна вероятности возбуждения центров свечения в единицу времени $\alpha(t)$, которая в общем случае определяется выражением

$$\alpha(t) = \sigma n(t)v(t), \quad (4)$$

$n(t)$ и $v(t)$ — концентрация и скорость свободных электронов, ускоренных до энергии возбуждения центров свечения. В области зависимостей (см. рисунок) между точками 1 и 2 происходят процессы ионизации глубоких центров, что приводит к рассеянию энергии носителей заряда на указанных центрах, т. е. к уменьшению значений $n(t)$ и $v(t)$, а следовательно, и $\alpha(t)$.

В целом причинами появления участка насыщения на ВАХ ТП ЭЛИ следует, по-видимому, считать оба приведенных выше механизма, поскольку они взаимосвязаны.

Список литературы

- [1] *Электролюминесцентные источники света* / Под ред. И.К. Верещагина. М.: Энергоатомиздат, 1990. 168 с.
- [2] *Гурин Н.Т., Сабитов О.Ю., Шляпин А.В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 8. С. 48–58.
- [3] *Гурин Н.Т., Сабитов О.Ю., Шляпин А.В., Юденков А.В.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 4. С. 12–18.
- [4] *Гурин Н.Т., Сабитов О.Ю., Шляпин А.В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 3. С. 72–75.
- [5] *Douglas A.A., Wager J.F., Morton D.C. et al.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 1. P. 296–299.
- [6] *Abu-Dayah A., Wager J.F., Kobayashi* // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. N 9. P. 5575–5581.