

06;07;12

## Скорость полевой генерации в электролюминесцентных планарных порошковых структурах

© Б.Н. Денисов, Е.М. Бибанина

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,  
430000 Саранск, Россия  
e-mail: boris117@mail.ru

(Поступило в Редакцию 18 января 2007 г.)

Исследована энергия вспышки электролюминофоров при возбуждении униполярными импульсами напряжения с линейным фронтом. На основе проведенных экспериментов получено выражение для скорости генерации свободных носителей в планарном электролюминесцентном конденсаторе с поляризационным механизмом свечения.

PACS: 78.60.Fi

Планарные электролюминесцентные конденсаторы (ЭЛК) обладают широким спектром свойств [1–3]. Они могут использоваться как источники света, ячейки оптической памяти. Такие устройства являются удобным инструментом для исследования явлений электролюминесценции порошковых люминофоров [2].

Эффективность процесса излучения электролюминесцентных устройств определяется скоростью генерации ( $G$ ) свободных носителей полем. Данные о функциональной связи скорости генерации с полем и со скоростью изменения напряжения в литературе отсутствуют [4–6]. С этой целью нами были проведены исследования зависимости энергии вспышки излучения от времени зарядки ЭЛК.

Для экспериментов нами использовались щелевые планарные структуры, представляющие собой систему параллельных проводящих дорожек из алюминия на подложке из ситалла, полученных методом фотолитографии. Расстояние между контактами составляло  $40 \mu\text{m}$  при размерах зерен люминофора  $5\text{--}10 \mu\text{m}$ . Ширина проводящих дорожек была равна  $16.7 \mu\text{m}$ . Люминофор (ЭЛ-515, ЭЛ-525) наносился поверх структуры в виде спиртовой суспензии без связующего из расчета  $3\text{--}5 \text{ mg/cm}^2$  [2]. В качестве диэлектрика выступал слой окиси алюминия, образующийся на поверхности контактов за счет окисления на воздухе. Емкость структур без люминофора составляла  $C = 50.23 \text{ pF}$ , с люминофором —  $\sim 200 \text{ pF}$ . Время зарядки структур при подаче напряжения выше порогового равно  $RC \sim 10^{-7} \text{ s}$ ,  $R = 10^3 \Omega$  — сопротивление, включенное последовательно с ЭЛК. Время зарядки изменялось за счет подключения конденсатора параллельно ЭЛК, при этом длительность фронта подаваемого импульса напряжения была одинаковой. В ходе эксперимента соблюдались следующие условия: время нарастания ( $t_n$ ) импульса напряжения меньше времени жизни свободных носителей ( $\tau$ ) и времени зарядки ЭЛК ( $\tau_e$ ), но больше времени дрейфа ( $t_d$ ) свободных носителей к границам зерен кристаллов люминофора.

Проведенные эксперименты показали, что энергия излучения за период не зависит от времени нарастания напряжения на структуре (времени зарядки емкости ЭЛК), а определяется только максимальным значением амплитуды напряжения. На рис. 1 приведены осциллограммы свечения люминофора ЭЛ-515 при различной длительности нарастания напряжения на ЭЛК. На ЭЛК подавались униполярные импульсы напряжения  $U_0 = 299 \text{ V}$  с периодом  $T = 5.7 \cdot 10^{-3} \text{ s}$  и длительностью импульса  $T_1 = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ . Из осциллограмм видно, что мгновенное значение интенсивности вспышки включения резко изменяется при варьировании длительности

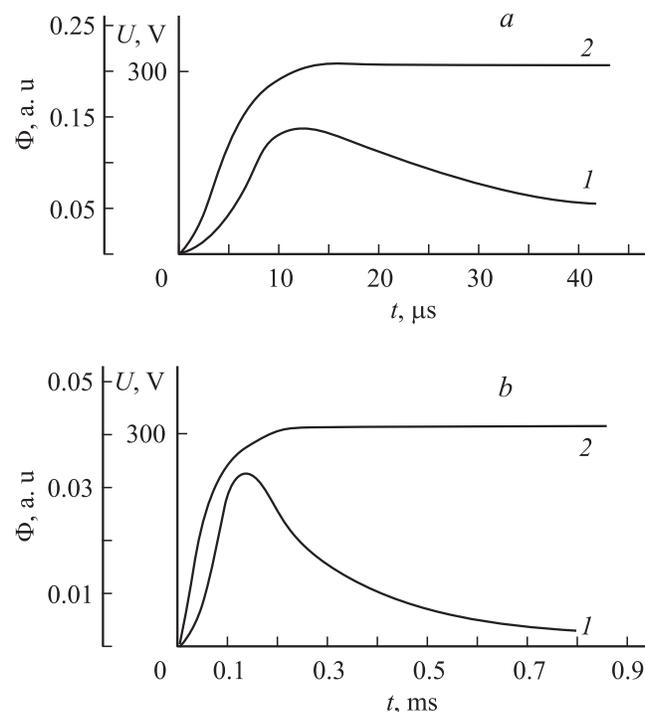


Рис. 1. Осциллограммы свечения (1) люминофора ЭЛ-515 при различной длительности зарядки ЭЛК (2): а —  $W_1 = 23$ ,  $\tau_e = 10$ ; б —  $W_2 = 22 \text{ a.u.}$ ,  $\tau_e = 0.15 \text{ ms}$ .

нарастания напряжения. А энергия излучения ЭЛК за период при изменении длительности нарастания напряжения на два порядка практически остается постоянной,  $W_1 \approx W_2$  (см. рис. 1). Наблюдаемые изменения энергии излучения за период не превышали 5%, что соответствует ошибке измерения. Этот эксперимент позволяет сделать вывод о функциональной зависимости полевой скорости генерации от напряжения.

Для того чтобы энергия излучения за период следования импульса не зависела от длительности нарастания напряжения на ЭЛК, должна выполняться следующая зависимость между скоростью генерации и скоростью изменения напряжения:

$$G = kf(U - U_p) \frac{dU}{dt}, \quad (1)$$

где  $k = \text{const}$ ,  $f(U - U_p)$  — непрерывная функция, пропорциональная вероятности ионизации полем,  $U$  — внешнее напряжение,  $U_p$  — пороговое напряжение, соответствующее началу процесса ионизации. Величина  $U_p$  является постоянной для данного типа люминофора. Покажем, что в этом случае энергия излучения не будет зависеть от длительности фронта зарядки ЭЛК, а будет определяться только значением порогового напряжения и максимальным значением напряжения в импульсе. Согласно [4,6],

$$W = \gamma h\nu N^*, \quad (2)$$

где

$$N^* = \int_{t_p}^{t_i} G(t) dt, \quad (3)$$

$W$  — энергия, излученная за время  $t = t_i - t_p$ ;  $N^*$  — число ионизованных центров свечения;  $t_p$  — время достижения напряжения, равного пороговому;  $t_i$  — время окончания процесса ионизации (численно равно времени окончания нарастания напряжения);  $\gamma$  — квантовый выход;  $\nu$  — частота света;  $h$  — постоянная Планка.

Используя соотношения (1) и (3), получим выражение для энергии излучения

$$\begin{aligned} W &= \gamma h\nu \int_{t_p}^{t_i} G(t) dt = \gamma h\nu k \int_{U_p}^{U_0} f(U - U_p) dU \\ &= \gamma h\nu k [F(U_0 - U_p) - F(0)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $F(0) = 0$ , так как  $f(0) = 0$ ,  $F(U_0 - U_p)$  — число ионизованных центров свечения к моменту полной экранировки поля. Из соотношения (4) следует, что энергия излучения ЭЛК определяется только числом ионизованных центров свечения. Полученное выражение (4) позволяет определить функциональную зависимость скорости генерации.

Известно, что при линейном нарастании приложенного напряжения поля ( $dU/dt = \alpha = \text{const}$ ) возникает квазистационарный режим экранирования, при котором

$\sqrt{W} \sim GT$  ( $T$  — длительность нарастания импульса напряжения  $U_0 = \alpha T$ ,  $T < \tau$ ). При этом предполагается, что  $G = \text{const}$  [4]. Из (3) и (4) следует, что режим  $\sqrt{W} \sim T$  при линейном нарастании приложенного напряжения возникает, если

$$G = k(U - U_p) \frac{dU}{dt}. \quad (5)$$

При условии  $U_0 \gg U_p$  из (2) получаем

$$W = \frac{\gamma h\nu k U_0^2}{2} = \frac{\gamma h\nu k \alpha^2 T^2}{2}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что  $\sqrt{W} \sim T$ . Следовательно, при линейном нарастании напряжения, согласно (5), скорость полевой генерации  $G$  является линейной функцией напряжения и скорости изменения напряжения. Выражение (5) может использоваться для описания процесса скорости генерации при питании ЭЛК прямоугольными импульсами напряжения, передний (задний) фронт которых является линейной функцией времени и удовлетворяет указанным выше условиям. Полученное выражение для скорости генерации позволяет получить математическую модель вспышки свечения и выяснить причины различия энергии вспышек включения и выключения.

Запишем дифференциальные уравнения для скорости изменения концентрации носителей в зоне проводимости

$$\frac{dN}{dt} = G - \frac{N}{t_d} - \beta N^2 \quad (7)$$

и скорости изменения концентрации носителей в области объемного заряда в виде [4]

$$\frac{dn}{dt} = \frac{N}{t_d}. \quad (8)$$

Здесь  $N$  — концентрация свободных носителей в зоне проводимости объема кристалла,  $n$  — концентрация носителей в области объемного заряда,  $N/t_d$  — скорость выноса свободных носителей в область объемного заряда,  $\beta N^2$  — скорость рекомбинации носителей на центры свечения,  $t_d$  — время дрейфа свободных носителей в область объемного заряда,  $\beta$  — коэффициент рекомбинации.

При записи соотношения (7) полагалось, что генерация полем в области объемного заряда отсутствует, так как все поле приложено к объему кристалла вследствие повышенной концентрации носителей в области объемного заряда. Время дрейфа свободных носителей к границе кристаллов при значении поля, равном пороговому ( $U_p \sim 20$  В), в наших структурах равно  $\sim 10^{-10}$  с. Длительность процесса возбуждения в люминофорах на основе сульфида цинка (ZnS) составляет  $\sim 10^{-9}$  с [5]. Следовательно, длительность процесса ионизации будет определяться длительностью режима экранирования и не будет превышать времени зарядки конденсатора  $RC \sim 3 \cdot 10^{-6}$  с, если фронт импульса меньше  $RC$ . Время жизни неравновесных носителей в ZnS составляет

$\tau \sim 10^{-4}$  s, поэтому кинетика процессов изменения концентрации свободных носителей в зоне проводимости и в области пространственного заряда за счет полевой генерации может быть рассмотрена без учета явления рекомбинации носителей на центры свечения. Дифференциальное выражение для скорости изменения числа ионизированных центров свечения будет иметь вид

$$\frac{dN^*}{dt} = G. \quad (9)$$

Согласно проведенным экспериментам, энергия вспышки включения равна энергии вспышки выключения, если длительность импульса  $T_1$  и паузы между импульсами  $T_2$  больше времени жизни свободных носителей ( $T_1, T_2 \gg \tau$ ) и  $t_i \ll \tau$ , следовательно,  $N = n$ . Тогда закон сохранения заряда можно представить в виде

$$N^* = N + n = 2N = 2n. \quad (10)$$

Следовательно,

$$\frac{dN^*}{dt} = 2 \frac{dn}{dt} = 2 \left( G - \frac{N}{t_d} \right) = 2 \frac{dn}{dt} = 2 \frac{N}{t_d} = G. \quad (11)$$

Из соотношения (11) следует, что при равенстве энергии вспышки включения и выключения скорость генерации носителей полем в два раза выше скорости выноса носителей на границы кристаллов. При этом выполняются следующие соотношения:

$$G - \frac{N}{t_d} = \frac{dn}{dt} = \frac{N}{t_d} = \frac{G}{2}, \quad (12)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{N}{t_d} = \frac{G}{2}. \quad (13)$$

Из уравнения (11) следуют возможные причины различия энергии вспышек включения и выключения. Если  $N/t_d > G/2$ , то энергия вспышки включения меньше энергии вспышки выключения. При условии  $N/t_d < G/2$  энергия вспышки включения будет больше энергии вспышки выключения. Дифференциальное уравнение процесса изменения концентрации свободных носителей в зоне проводимости (7) с учетом выражения (12) примет вид

$$\frac{dN}{dt} = G - \frac{N}{t_d} - \Psi(N) = \frac{G}{2} - \Psi(N). \quad (14)$$

Из соотношений (5) и (14) с учетом переходных процессов в цепи, содержащей активное сопротивление  $R$  и емкость  $C$  ЭЛК, получим:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{k U_0^2}{2 RC} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right] \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) - \Psi(N). \quad (15)$$

Уравнение (15) не решается в аналитическом виде, но позволяет сделать ряд выводов о механизме процесса разгорания свечения. Процесс разгорания свечения при

импульсе включения имеет максимум, положение которого можно определить из выражения (15), учитывая, что  $\Phi = \Psi(N)$  — интенсивность свечения люминофора в единицах „квант в секунду“.

Полагая в максимуме  $dN/dt = 0$ ,  $t = t_{\max}$  и пренебрегая в уравнении (15) слагаемым  $\exp(-2t/RC)$ , получим выражение для положения максимума вспышки включения

$$t_{\max} = RC \ln \frac{k U_0^2}{2 \Phi_{\max} RC}. \quad (16)$$

Из соотношения (16) можно получить зависимость сдвига максимума вспышки включения от напряжения:

$$t_{\max 1} - t_{\max 2} = RC \ln \frac{U_{01}^2 \Phi_2}{U_{02}^2 \Phi_1}, \quad (17)$$

где  $t_{\max 1}$ ,  $t_{\max 2}$  — положение максимума вспышки включения при напряжении  $U_{01}$  и  $U_{02}$  соответственно. Уравнение (17) верно для любого механизма рекомбинации, если длительность фронта импульса напряжения меньше  $RC$  ЭЛК.

На рис. 2 и 3 приведены соответственно экспериментальные зависимости положения времени максимума вспышки свечения и интенсивности свечения от приложенного напряжения при неизменном  $RC$  для люминофора ЭЛ-525.

На рис. 4 приведена теоретическая зависимость сдвига максимума во времени от величины приложенного напряжения в координатах  $\Delta t = t_{\max 1} - t_{\max 2}$  и  $\ln F$

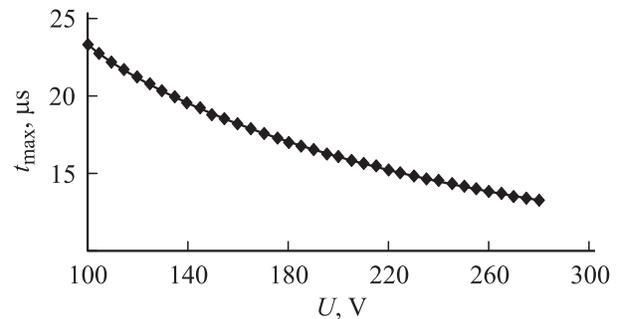


Рис. 2. Зависимость времени максимума вспышки свечения ЭЛК с люминофором ЭЛ-525 от напряжения.

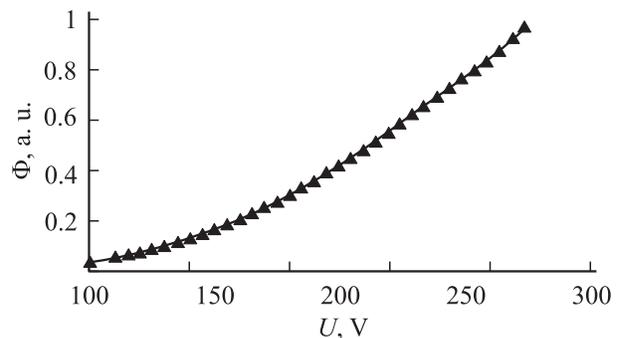
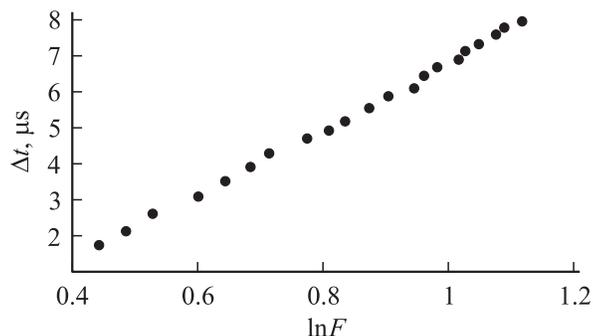


Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения в максимуме ЭЛК с люминофором ЭЛ-525 от напряжения.



**Рис. 4.** Теоретическая зависимость смещения времени положения максимума ( $\Delta t$ ) от величины приложенного напряжения для люминофора ЭЛ-525.

( $F = U_{01}^2 \Phi_n / U_{0n}^2 \Phi_1$ ), построенная на основе экспериментальных данных (рис. 2, 3). Эта зависимость, согласно полученному уравнению (17), должна быть линейной. Как видно из рис. 4, экспериментальные точки хорошо укладываются на прямую линию, следовательно, полученное выражение для скорости генерации позволяет вполне точно описывать процессы разгорания вспышки свечения электролюминофоров и особенности поведения развития вспышки свечения во времени.

## Список литературы

- [1] Денисов Б.Н., Горюнов В.А., Бибанина Е.М. и др. Электролюминесцентный источник света. Патент РФ 2175468, МПК-7 НО5 В33/26, F21K2/08. Оpubл. 27.10.2001. БИ. № 30.
- [2] Денисов Б.Н., Бибанина Е.М., Горюнов В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 11. С. 47–51.
- [3] Денисов Б.Н., Бибанина Е.М., Беглов В.И. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 4. С. 70–75.
- [4] Ковтонюк Н.Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник–диэлектрик. М.: Энергия, 1976. 184 с.
- [5] Самохвалов М.К. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 6. С. 1–4.
- [6] Думаревский Ю.Д., Ковтонюк Н.Ф., Савин А.И. Преобразование изображений в структурах полупроводник–диэлектрик. М.: Наука, 1987. 176 с.