

## К теории эффекта аномального фотонапряжения в многослойных структурах с $p-n$ -переходами

© В.Н. Агарев, Н.А. Степанова

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603600 Нижний Новгород, Россия

(Получена 19 июля 1999 г. Принята к печати 21 октября 1999 г.)

Рассмотрено стационарное и нестационарное фотонапряжение, возникающее в многослойной структуре с  $p-n$ -переходами при неоднородной засветке, для произвольного соотношения длины диффузионного смещения  $L$  и размеров  $p$ - и  $n$ -областей  $d$ . Показано, что при  $d \ll L$  из-за взаимного влияния соседних  $p-n$ -переходов фотонапряжение существенно меньше (в  $d^2/12L^2$  раз), чем при обратном смещении. Релаксация фотонапряжения определяется перезарядкой барьерных емкостей  $p-n$ -переходов и на несколько порядков превышает время жизни неравновесных носителей заряда в  $p$ - и  $n$ -областях. Полученные результаты применимы к объяснению особенностей эффекта аномального фотонапряжения в поликристаллических пленках.

Эффект аномального фотонапряжения (АФН) наблюдался в поликристаллических пленках на основе различных материалов [1–4]. Этот эффект обусловлен существованием в пленке большого числа кристаллитов с  $p-n$ -переходами [1]. При освещении пленки под углом из-за неоднородного рельефа поверхности соседние  $p-n$ -переходы освещены неравномерно, поэтому на пленке возникает фотонапряжение, равное сумме разностей фотонапряжений на соседних  $p-n$ -переходах. Удобной моделью поликристаллической пленки является многослойная структура с  $p-n$ -переходами. В последнее время в связи с развитием технологии  $\delta$ -легирования появляется дополнительный интерес к искусственно созданным многослойным структурам с заданными свойствами [5].

Максимальное фотонапряжение в многослойной структуре может достигать значений порядка  $mkT/e$  ( $2m$  — число  $p-n$ -переходов). Однако реальные значения фотонапряжения, наблюдаемые экспериментально, на порядок меньше [2,4]. Для объяснения этого факта авторы [1] сделали предположение о существовании в толще пленки проводящего шунта. Время релаксации фотонапряжения много больше времени жизни неравновесных носителей заряда, что объясняется авторами [2] наличием уровней прилипания. Влияние барьерных емкостей и монтажной емкости соединений на время релаксации фотонапряжения было рассмотрено феноменологически в работах [3,4]. В этих работах рассмотрена многослойная структура, состоящая из несвязанных  $p-n$ -переходов, и показано, что время релаксации фотонапряжения определяется наибольшим из двух времен:  $\tau_1$  — время релаксации фототока и  $\tau_2$  — время перезаряда барьерных емкостей.

Поскольку кристаллиты имеют размеры порядка  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  см, то вопрос о соотношении размера кристаллита  $d$  и длины диффузионного смещения  $L$  не является бесспорным. Авторы [1] предполагали всегда, что  $d \gg L$ . Очевидно, что при обратном соотношении,

$d \leq L$ , влияние соседних  $p-n$ -переходов может уменьшить значение фотонапряжения.

Переходные процессы в многослойной структуре со связанными  $p-n$ -переходами (при  $d \leq L$ ) подробно изучены в работах [6–8], где показано, что влияние перезарядки барьерных емкостей приводит к значительному увеличению времени релаксации неравновесной проводимости и фотопроводимости.

В нашей работе исследована монослойная структура с неоднородно освещенными  $p-n$ -переходами при произвольном соотношении  $d/L$ . Рассмотрим одномерную однородную многослойную структуру с  $p-n$ -переходами, такую, что толщины  $p$ - и  $n$ -областей одинаковы,  $d_n = d_p = d$ , и одинаковы параметры носителей заряда в этих областях:  $\tau_n = \tau_p = \tau$  — время жизни неравновесных носителей заряда,  $D_n = D_p = D$  — коэффициент диффузии,  $L_n = L_p = L$  — длина диффузионного смещения,  $P_n = N_p$  — равновесная концентрация дырок в  $n$ -областях и электронов в  $p$ -областях,  $2m$  — число  $p-n$ -переходов. Будем считать, что скорость объемной генерации носителей заряда светом в  $p$ - и  $n$ -областях линейно уменьшается от значения  $g$  вблизи  $p-n$ -переходов до значения  $\alpha g$  (где  $\alpha < 1$ ) вблизи  $p-n$ -переходов. Уравнение непрерывности и граничные условия для концентрации неравновесных носителей заряда в  $n$ -области между  $j$ -м и  $(j+1)$ -м  $p-n$ -переходами имеют вид

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{L^2} - \frac{g}{D} \left[ 1 - \frac{(1-\alpha)x}{d} \right], \quad (1)$$

$$\Delta p(0) = P_j = P_n \left[ \exp\left(\frac{eV_j}{kT}\right) - 1 \right],$$

$$\Delta p(d) = P_{j+1} = P_n \left[ \exp\left(\frac{eV_{j+1}}{kT}\right) - 1 \right].$$

Решая уравнение (1), находим токи  $j$ -го и  $(j+1)$ -го  $p-n$ -переходов, откуда в режиме холостого хода находим

полное фотонапряжение на многослойной структуре:

$$V_{ph} = m(V_j - V_{j+1}) = \frac{mkT}{e} \times \ln \left\{ \left[ 1 + \frac{g\tau}{P_n} \left[ 1 - (1 - \alpha) \frac{L}{d} \left( \text{ctg} \frac{d}{L} - \text{cosech} \frac{d}{L} \right) \right] \right] \right. \\ \left. \left/ \left[ 1 + \frac{g\tau}{P_n} \left[ \alpha + (1 - \alpha) \frac{L}{d} \left( \text{cth} \frac{d}{L} - \text{cosech} \frac{d}{L} \right) \right] \right] \right\}. \quad (2)$$

При малых уровнях засветки, когда  $g\tau \ll P_n$ , фотонапряжение на структуре будет

$$V_{ph} = \frac{mkT}{e} \frac{g\tau}{P_n} (1 - \alpha) \left[ 1 - 2 \frac{L}{d} \left( \text{cth} \frac{d}{L} - \text{cosech} \frac{d}{L} \right) \right], \quad (3)$$

откуда при  $d \gg L$  имеем

$$V_{ph} = \frac{mkT}{e} \frac{g\tau(1 - \alpha)}{P_n}. \quad (4)$$

При обратном соотношении,  $d \ll L$ ,

$$V_{ph} = \frac{mkT}{e} \frac{g\tau(1 - \alpha)}{P_n} \left( \frac{1}{12} \frac{d^2}{L^2} \right). \quad (5)$$

Таким образом, из (4) и (5) видно, что влияние соседних  $p-n$ -переходов при малых размерах кристаллитов по сравнению с диффузионной длиной ( $d \ll L$ ) приводит к значительному уменьшению фотонапряжения. При небольших размерах кристаллитов ( $d \leq L$ ) изменение заряда на барьерных емкостях  $p-n$ -переходов (при изменении напряжения на них) значительно превышает изменение заряда неравновесных электронов и дырок в  $p$ - и  $n$ -областях [6].

Рассмотрим релаксацию заряда на барьерных емкостях  $p-n$ -переходов после выключения засветки. Напряжения на  $p-n$ -переходах в процессе релаксации будут определяться зарядами барьерных емкостей:

$$Q_j(t) = \frac{Q_0}{2} \sqrt{1 - \frac{V_j(t)}{\varphi}}, \\ Q_{j+1}(t) = \frac{Q_0}{2} \sqrt{1 - \frac{V_{j+1}(t)}{\varphi}}, \quad (6)$$

где  $\varphi$  — контактная разность потенциалов,  $Q_0 = eNW$  — равновесный заряд на барьерных емкостях,  $N$  — концентрация основных носителей заряда,  $W$  — толщина слоя объемного заряда  $p-n$ -перехода. Изменение заряда на барьерных емкостях происходит под действием токов  $p-n$ -переходов:

$$\frac{dQ_j}{dt} = I_j, \quad \frac{dQ_{j+1}}{dt} = -I_{j+1}. \quad (7)$$

Поскольку изменение диффузионных токов  $p-n$ -переходов при изменении граничных концентраций происходит за время порядка  $d^2/2D$ , которое много меньше

времени релаксации фотонапряжения [6], можно считать токи  $p-n$ -переходов в процессе релаксации квазиравновесными:

$$I_j(t) = -\frac{eD}{L} \left( P_{j+1} \text{cosech} \frac{d}{L} - P_j \text{cth} \frac{d}{L} \right), \\ I_{j+1}(t) = -\frac{eD}{L} \left( P_{j+1} \text{cth} \frac{d}{L} - P_j \text{cosech} \frac{d}{L} \right), \quad (8) \\ P_j(t) = \Delta p(0) = P_n \left[ \exp \left( \frac{eV_j(t)}{kT} \right) - 1 \right], \\ P_{j+1}(t) = \Delta p(d) = P_n \left[ \exp \left( \frac{eV_{j+1}(t)}{kT} \right) - 1 \right].$$

При малых уровнях освещения, когда  $V_j, V_{j+1} < kT/e$ , система (6)–(8) имеет аналитическое решение

$$V_j(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left[ V_j(0) + V_{j+1}(0) \text{cosech} \frac{d}{L} \right] \exp \left[ \left( -\text{cth} \frac{d}{L} + 1 \right) \frac{t}{\tau_0} \right] \right. \\ \left. + \left[ V_j(0) - V_{j+1}(0) \text{cosech} \frac{d}{L} \right] \exp \left[ \left( -\text{ctg} \frac{d}{L} - 1 \right) \frac{t}{\tau_0} \right] \right\}, \\ V_{j+1}(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left[ V_j(0) \text{sh} \frac{d}{L} + V_{j+1}(0) \right] \exp \left[ \left( -\text{cth} \frac{d}{L} + 1 \right) \frac{t}{\tau_0} \right] \right. \\ \left. + \left[ V_{j+1}(0) - V_j(0) \text{sh} \frac{d}{L} \right] \exp \left[ \left( -\text{ctg} \frac{d}{L} - 1 \right) \frac{t}{\tau_0} \right] \right\},$$

где  $V_j(0)$  и  $V_{j+1}(0)$  даются решениями стационарного уравнения (1)

$$V_j(0) = \frac{kT}{e} \frac{g\tau}{P_n} \left[ (1 - \alpha) \frac{L}{d} \left( \text{cosech} \frac{d}{L} - \text{cth} \frac{d}{L} \right) + 1 \right], \\ V_{j+1}(0) = \frac{kT}{e} \frac{g\tau}{P_n} \left[ (1 - \alpha) \frac{L}{d} \left( \text{cth} \frac{d}{L} - \text{cosech} \frac{d}{L} \right) + \alpha \right].$$

Время релаксации  $\tau_0$  определяется перезарядкой барьерных емкостей:

$$\tau_0 = \frac{1}{4} \frac{N}{P_n} \frac{W}{L} \frac{kT}{e\varphi} \tau.$$

При  $kT/e\varphi \approx 10^{-2}$ ,  $W/L \approx 10^{-1}$ ,  $N/P_n \approx 10^{16}/10^4$  получим  $\tau_0 \approx 10^{10} \tau$ , т.е. характерное время релаксации фотонапряжения  $\tau_0$  на много порядков превышает время жизни неравновесных носителей заряда.

При  $d \ll L$  время релаксации фотонапряжения  $\tau_{ph} \approx \tau_0 d/L$  уменьшается при уменьшении  $d/L$ , но все же остается много большим  $\tau$ .

Таким образом, модель многослойной структуры с малыми размерами  $p$ - и  $n$ -областей ( $d \leq L$  или  $d \ll L$ ) удачно объясняет как величину стационарного фотонапряжения, так и большое время релаксации фотонапряжения без привлечения дополнительных предположений о наличии проводящих шунтов и уровней прилипания.

## Список литературы

- [1] Э.И. Адирович, Э.М. Маслов, Ю.М. Юабов. ФТП, **5**(7), 1415 (1971).
- [2] Э.И. Адирович. ФТП, **4**(4), 745 (1970).
- [3] Э.И. Адирович, Э.М. Маслов, Ю.М. Юабов. ДАН, **188**, 1254 (1969).
- [4] И.А. Карпович, М.В. Шилова. Изв. вузов. Физика, **4**, 128 (1969).
- [5] В.В. Осипов, А.Ю. Селяков, М. Foysel. ФТП, **32**(2), 221 (1998).
- [6] В.И. Стафеев. ФТП, **6**, 2134 (1972).
- [7] В.Н. Агарев, В.И. Стафеев. Радиотехника и электроника, **22**(1), 169 (1977).
- [8] В.Н. Агарев, В.И. Стафеев. Радиотехника и электроника, **22**(11), 2335 (1977).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## **On the theory of an anomalous photo-voltage effect in many-layer structures with $p-n$ junctions**

V.N. Agarev, N.A. Stepanova

Nizhny Novgorod State University,  
603600 Nizhny Novgorod, Russia