

## ТЕОРИЯ АФН-ЭФФЕКТА С ДЕМБЕРОВСКИМ МЕХАНИЗМОМ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ

Г.А. Набиев

*Ферганский политехнический институт  
Узбекистан*

Поступила в редакцию 07.05.2008

В работе разработана теория АФН-эффекта (аномально-больших фотонапряжений) в полупроводниковых пленках с однородными микрообластями, связывающая величину и знак АФН с технологическими параметрами пленок и условиями освещения. Из полученного аналитического выражения вытекают, в частности, выражения для нормального, аномального дембер-эффектов, и при переходе в область сильного поглощения аномальный дембер-эффект переходит в нормальный. При этом должно выполняться не только условие сильного поверхностного поглощения и сильной генерации, но и условие  $\kappa D \gg S_{1,2}$  (где  $\kappa$  – коэффициент поглощения света,  $D$  – коэффициент диффузии,  $S_{1,2}$  – скорость поверхностной рекомбинации граней). Как пример, рассчитаны спектральные, люкс-вольтовые, угловые зависимости и зависимость АФН-эффекта от толщины. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что в пленках реализуется случай аномального дембер-эффекта и перехода аномального дембер-эффекта в нормальный.

На основе полученных результатов можно объяснить не только особенности АФН-эффекта, но и построить искусственные АФН-структуры.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в некоторых полупроводниковых пленках наблюдаются аномально-большие фотонапряжения (АФН), величина, а в некоторых случаях и знак которых зависят от угла падения света [1 – 4]. Первая модель, предложенная в [1 – 3] для объяснения этого эффекта, представляла АФН-пленку как батарею последовательно соединенных  $p$ - $n$ -переходов. Затем привлекалась  $p$ - $n$ - $p$ -переходная модель, считая возникновение фотонапряжения на элементарной ячейке или обусловленной различной степенью освещения  $p$ - $n$  и  $n$ - $p$ -переходов [4], или когда они различны по своим характеристикам [5]. В работе [6] АФН-пленка рассматривается, как супермногослойная структура со связанными  $p$ - $n$ -переходами и рассчитаны вольт-амперные характеристики. На примере простейшей модели проанализированы [7] фотовольтаические свойства периодической  $p$ - $n$ - $p$ -структуры с асимметричными по значениям токов насыщения  $p$ - $n$ - и  $n$ - $p$ -переходами. Показано, что фотонапряжение в таких структурах может достигнуть нескольких десятков вольт на 1 см структуры. В основу теории АФН-эффекта в поликристаллических полупроводниках [8]

положено предположение о фотовольтаическом эффекте на границах зерен. В [9] рассмотрены стационарное и нестационарное фотонапряжения, возникающие в многослойной структуре с  $p$ - $n$ -переходами при неоднородной засветке.

Основываясь на  $p$ - $n$ -переходной модели, нельзя объяснить инверсию знака фотонапряжения, так как знак фотонапряжения на  $p$ - $n$ -переходе не зависит от направления освещения.

Из полученных результатов в [7] не следует наблюдающаяся в эксперименте спектральная и угловая инверсии знака АФН при любом угле освещения пленки, и их объяснение требует привлечения объемно-градиентной (поперечной) фотоЭДС [7].

Последняя, однако, как справедливо отмечено в [10], также не дает инверсии АФН, поскольку, как было отмечено в самой работе [7], она пренебрежимо мала по сравнению с фотоЭДС в  $p$ - $n$ - $p$ -ячейке и не может стать преобладающей в той части спектра, где происходит инверсия знака АФН.

Демберовская (фотодиффузионная) модель была предложена Швабе [11, 12] в связи с обнаружением инверсии знака фотонапря-

жения при изменении угла падения света от 0 до 180° на АФН-пленку PbS. В дальнейшем эта модель была развита в работе [4], а угловые исследования, дополненные спектральными [4], доведены до метода определения механизмов АФН-эффекта.

Несмотря на это, нет теории АФН-эффекта с демберовским механизмом, которая, в частности, аналитически обосновала бы метод угловых диаграмм и связала бы АФН с технологическими параметрами (числом микроэлектродов (микрофотоэлементов), толщиной пленки, углом осаждения пленки, скоростями поверхностной рекомбинации граней и т.д.) и условиями освещения (угол освещения пленки, коэффициент поглощения, интенсивность света и т.д.). Данная работа посвящена решению этих задач.

### МОДЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Следует отметить, что в общем случае на генерируемое фотонапряжение дают вклад всевозможные виды фотонапряжений. Но, по видимому, в одних пленках основным является один вид фотонапряжения, в других – другой.

Подобно *p-n*-переходной модели, демберовская модель является двухслойной системой (рис. 1). Одним из компонентов этой системы должен быть слой полупроводника, являющийся фотоактивным. Вторым компонентом является слой диэлектрика, который препятствует обмену и выравниванию концентраций между фотоактивными областями. Как правило, эта область является не фотоактивной. Роль таких прослоек играют окисные слои, воздушные зазоры между дендри-

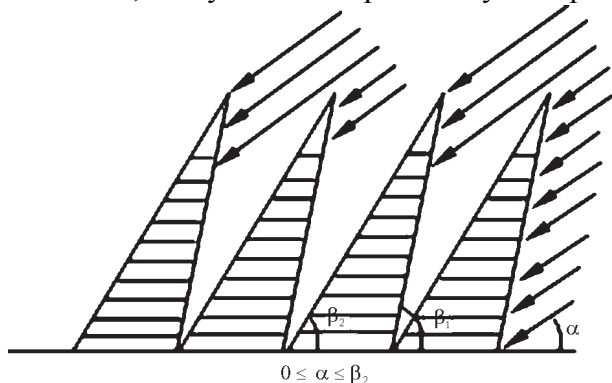


Рис. 1. Фрагмент многослойной структуры с однородными микрообластями.

тами и т.д., образующиеся в процессе получения пленок. Таким образом, вся пленка является неоднородной, а базисный микрофотоэлемент – однородным.

Демберовская модель применяется для объяснения АФН-эффекта и в пленках Si и Ge, склонных к окислению. АФН в этих пленках появляется только после их выдержки на воздухе или термообработки [4, 13]. В зависимостях  $V_{\text{АФН}}$  от угла падения света в пределах 0 ÷ 180° наблюдается инверсия знака [4]. О демберовской модели свидетельствуют и спектральные исследования [14]. При этом существенный АФН в этих пленках наблюдается при толщинах 2 мкм. Эта величина намного больше длины экранирования, и это дает возможность считать, что в этих пленках демберовское фотонапряжение является основным.

Развиваемая здесь теория АФН-эффекта является теорией дембер-эффекта в полупроводниковых многослойных структурах и основывается на системе уравнений непрерывности с соответствующими граничными условиями. Количество уравнений непрерывности определяется количеством слоев  $N$ , которое равно  $10^4 \div 10^5$  на 1 см. При таком количестве уравнений они не имеют решения даже для одномерного случая. Поэтому, предположим, что пленка состоит из батареи эффективных микрофотоэлементов, которые обладают одинаковыми свойствами. Это дает возможность перейти от системы из  $N$  уравнений непрерывности к одному и, в соответствующих выражениях, перейти от суммирования фотонапряжений по всем элементам к произведению генерируемого фотонапряжения эффективным микрофотоэлементом на их число.

Область изменения  $\alpha$  разделена на три части в соответствии с углами наклона к подложке и условиями освещения микрофотоэлементов (рис. 1).

Электродвижущую силу эффекта Дембера находим из выражения:

$$V = \int_0^d E dx = \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \ln \frac{(b+1)\Delta n_0 + bn_0 + p_0}{(b+1)\Delta n_e + bn_0 + p_0}, \quad (1)$$

решая уравнение непрерывности

$$D \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} + \frac{\Delta p}{\tau} + g(x) = 0, \quad (2)$$

где  $g(x) = g_0 \exp(-\kappa x)$  (3) с граничными условиями

$$D \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=0} = S_1 \Delta p(0); \quad (4)$$

$$D \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=d} = -S_2 \Delta p(d); \quad (5)$$

где и далее  $\Delta p$ ,  $\tau$ ,  $L$ ,  $D$  – концентрация, время жизни, длина и коэффициент биполярной диффузии неравновесных носителей заряда;  $n_0$ ,  $p_0$  – концентрации равновесных носителей;  $S_1$ ,  $S_2$  – скорости поверхностной рекомбинации правой и левой граней;  $d$  – толщина микрофотоэлемента;  $b$  – отношение подвижностей;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\kappa$  – коэффициент поглощения;  $T$  – температура;  $e$  – заряд электрона;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – углы наклона сторон микрофотоэлемента;  $g_0$  – скорость генерации неравновесных носителей в единице объема;  $g_1$ ,  $g_2$  – скорость генерации неравновесных носителей при освещении правой и левой граней;  $g_3$ ,  $g_4$  – скорость генерации в промежуточной области [15, 16].

$$g_1 = g_0 \frac{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sin^2 \beta_2} \frac{\sin^2 \alpha}{\sin(\beta_1 - \alpha)}; \quad (6)$$

$$g_2 = g_0 \frac{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sin^2 \beta_1} \frac{\sin^2 \alpha}{\sin(\alpha - \beta_2)}; \quad (7)$$

$$g_3 = g_0 \sin(\beta_1 - \alpha); \quad (8)$$

$$g_4 = g_0 \sin(\alpha - \beta_2); \quad (9)$$

Учитывая условие локальной электронейтральности ( $\Delta n = \Delta p$ ), и считая, что отсутствуют примесные уровни для концентрации неравновесных носителей заряда в однородном базисном микрофотоэлементе, получим

$$\begin{aligned} \Delta n(x) = & \frac{g(0)\tau}{\kappa^2 L^2 - 1} \left\{ 2 \left[ 2 \left( S_1 S_2 + \frac{D}{\tau} \right) \text{sh} \left( \frac{d}{L} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + 2(S_1 + S_2) \frac{D}{L} \text{ch} \left( \frac{d}{L} \right) \right]^{-1} \left[ (S_1 + \kappa D) \left( \frac{D}{L} + S_2 \right) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \exp \left( \frac{d-x}{L} \right) + (S_2 - \kappa D) \left( \frac{D}{L} - S_1 \right) \exp \left( -\kappa d - \frac{x}{L} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + (S_1 - \kappa D) \left( \frac{D}{L} - S_2 \right) \exp \left( -\frac{d-x}{L} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + (S_2 - \kappa D) \left( \frac{D}{L} + S_1 \right) \exp \left( -\kappa d + \frac{x}{L} \right) \right] - \exp(-\kappa x) \right\}, \quad (10) \end{aligned}$$

где  $g_0$  – скорость генерации в  $x = 0$ .

Для аномального фотонапряжения при любых интенсивностях света и любого спектрального состава в области углов освещения  $0 \leq \alpha \leq \beta_2$  получаем

$$V = (N-1)V_1 + V_3, \quad (11)$$

$$\text{где } V_i = \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \ln \frac{W}{R}, \quad (i = 1, 2, 3, 4), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{где } W = & \left[ \left( S_1 S_2 + \frac{D}{\tau} \right) \text{sh} \frac{d}{L} + (S_1 + S_2) \frac{D}{L} \text{ch} \frac{d}{L} \right] \times \\ & \times \left[ (bn_0 + p_0)(\kappa^2 L^2 - 1) - (b-1)g_i \tau \right] + g_i \tau (b+1) \times \\ & \times \left[ (S_1 + \kappa D) \left( \frac{D}{L} \text{ch} \frac{d}{L} + S_2 \text{sh} \frac{d}{L} \right) + (S_2 - \kappa D) \frac{D}{L} \exp(-\kappa d) \right]; \\ R = & \left[ \left( S_1 S_2 + \frac{D}{\tau} \right) \text{sh} \frac{d}{L} + (S_1 + S_2) \frac{D}{L} \text{ch} \frac{d}{L} \right] \times \\ & \times \left[ (bn_0 + p_0)(\kappa^2 L^2 - 1) - (b-1)g_i \tau \exp(-\kappa d) \right] + \\ & + g_i \tau (b+1) \left[ (S_1 + \kappa D) \frac{D}{L} + (S_2 - \kappa D) \times \right. \\ & \left. \times \left( \frac{D}{L} \text{ch} \frac{d}{L} + S_1 \text{sh} \frac{d}{L} \right) \exp(-\kappa d) \right]. \end{aligned}$$

Затем наступает промежуточная область  $\beta_2 \leq \alpha \leq \beta_1$ . Здесь

$$V = N(V_3 - V_4). \quad (13)$$

При освещении в пределах  $\beta_1 \leq \alpha \leq \pi$

$$V = -(N-1)V_2 + V_4. \quad (14)$$

Так как  $N = 10^4 \div 10^5$  на единицу длины (см) при  $\alpha > 0$ , в выражениях (11), (14), АФН-эффект определяется первыми слагаемыми. При  $\alpha = 0$  фотонапряжение представляется вторым слагаемым.

Предположение об однородности объема микрокристалликов дает возможность рассмотрения только дембер-эффекта. Что касается выполнения, широко используемого [17, 18, 7, 19] условия  $\Delta n = \Delta p$ , следует заметить, что для, например, кремния при толщине пленок 2 мкм, при низких освещенностях света ( $\Delta n - \Delta p = 10^8 \text{ см}^{-3}$ ), и при концентрации неравновесных носителей заряда  $\Delta n - \Delta p = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , намного больше темновых, эта поправка, вычисленная из уравнения Пуассона к величине АФН, не превышает 0,01%.

### ФИЗИЧЕСКАЯ ДИСКУССИЯ

С помощью выражений (11) – (14) могут быть объяснены основные особенности АФН-эф-

фекта в пленках, где реализуется демберовская модель. Как пример рассмотрим спектральную, люкс-вольтовую характеристику (ЛВХ), угловую зависимость и зависимость АФН от толщины пленки.

На рис. 2 приведена спектральная зависимость АФН-эффекта, рассчитанная из выражения (12) в пленках с параметрами:

а)  $S_1 = S_2 = 10^5$  см/с;  $d/L = 1$ ;  $d = 5 \cdot 10^{-5}$  см;  $D = 5$  см<sup>2</sup>/с;  $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$  с;  $n = 10^{17}$  см<sup>-3</sup>;  $b = 2$ ;  $g_0 = 10^{20}$  пар/см<sup>3</sup>с;

б)  $S_1 = 10^6$  см/с;  $S_2 = 10^4$  см/с;  $d/L = 0,5$ ;  $d = 5 \cdot 10^{-6}$  см;  $D = 5$  см<sup>2</sup>/с;  $\tau = 2 \cdot 10^{-13}$  с;  $n_0 = 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $b = 2$ ;  $g_0 = 10^{20}$  пар/см<sup>3</sup>с;

в)  $S_1 = 6 \cdot 10^5$  см/с;  $S_2 = 3 \cdot 10^5$  см/с;  $d/L = 1$ ;  $d = 5 \cdot 10^{-6}$  см;  $D = 5$  см<sup>2</sup>/с;  $\tau = 10^{-11}$  с;  $n_0 = 10^{17}$  см<sup>-3</sup>;  $b = 2$ ;  $g_0 = 10^{20}$  пар/см<sup>3</sup>с.

Видна (с) инверсия знака фотонапряжения, наблюдающаяся в эксперименте [4].

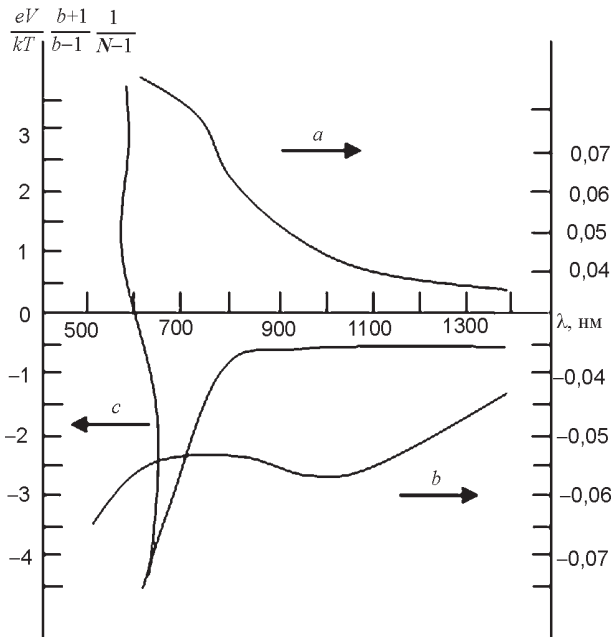


Рис. 2. Спектральная зависимость АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с однородными микрообластями.

На рис. 3 приведена ЛВХ АФН-эффекта в пленках с параметрами  $S_1 = S_2 = 10^5$  см/с,  $d/L = 1$ ,  $d = 5 \cdot 10^{-6}$  см,  $D = 5$  см<sup>2</sup>/с,  $\tau = 10^{-11}$  с,  $n_0 = 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $b = 2$  при освещении монохроматическим светом. Такие ЛВХ являются типичными для большинства полупроводниковых пленок с АФН-эффектом [4].

В случае, когда концентрация избыточных носителей заряда намного меньше концентрации равновесных и при  $kd \ll 1$ ,  $kL \ll 1$ , вышеприведенные выражения упрощаются для соответствующих областей изменения уг-

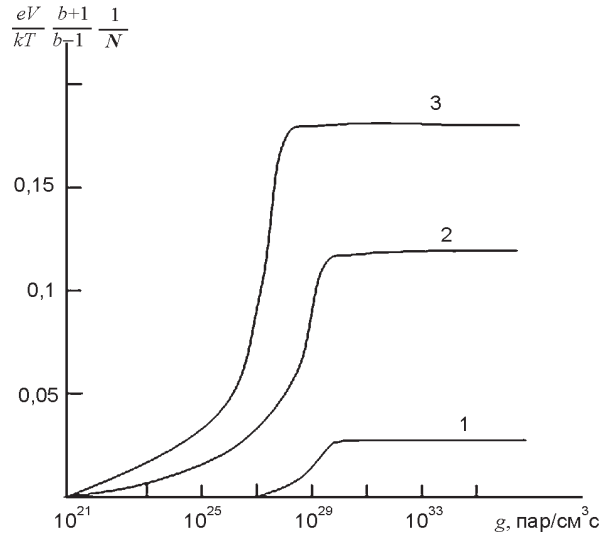


Рис. 3. Люкс-вольтовая характеристика нормального дембер-эффекта при различных толщинах ( $d/L = 0,1$  (1); 1 (2); 10 (3)) для  $\kappa = 10^4$  см<sup>-1</sup>.

ла освещения. Более наглядную интерпретацию имеет случай, когда  $S_1 = S_2 = S$ . Для этого случая (11) – (14) записываются соответственно в виде:

$$V = \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \frac{1}{N-1} 2kL \times \frac{D \left(1 - \text{ch} \frac{d}{L}\right) - SL \text{sh} \frac{d}{L}}{\left(S^2 + \frac{D}{\tau}\right) \text{sh} \frac{d}{L} + 2S \frac{D}{L} \text{ch} \frac{d}{L}} G_n; \quad (15)$$

$$G_n = \begin{cases} (N-1)g_1 + g_3 & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \beta_2, \\ 2N(g_3 - g_4) & \text{при } \beta_2 \leq \alpha \leq \beta_1, \\ -(N-1)g_2 + g_4 & \text{при } \beta_1 \leq \alpha \leq \pi. \end{cases} \quad (16)$$

Из этих выражений следует, что аномальное фотонапряжение имеет инверсию знака в пределах  $0 \div 180^\circ$ , т.е. в данном случае наблюдается нормальный дембер-эффект.

На рис. 4(а) приведена угловая зависимость АФН-эффекта для случая  $\beta_1 = 60^\circ$ ,  $\beta_2 = 30^\circ$ .

Из выражений (11) – (14) при  $S_1 > S_2 \gg \kappa D$  и освещении слабопоглощаемым светом низкой интенсивности, получаем

$$V = \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \frac{L}{n_0} \frac{S_1 \left(1 - \text{ch} \frac{d}{L}\right)}{\left(S_1 S_2 + \frac{D}{\tau}\right) \text{sh} \frac{d}{L} + S_1 \frac{D}{L} \text{ch} \frac{d}{L}} G_a, \quad (17)$$

при  $\beta_2 \leq \alpha \leq \beta_1$

$$G_a = \begin{cases} (N-1)g_1 + g_3 & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \beta_2, \\ 2N(g_3 - g_4) & \text{при } \beta_2 \leq \alpha \leq \beta_1, \\ -(N-1)g_2 - g_4 & \text{при } \beta_1 \leq \alpha \leq \pi. \end{cases} \quad (18)$$

Отсюда следует, что в угловой зависимости не наблюдается инверсия знака аномального фотонапряжения, т.е. в этих условиях наблюдается аномальный дембер-эффект.

На рис. 4(b) приведена угловая зависимость АФН-эффекта для структуры с  $\beta_1=60^\circ$ ,  $\beta_2=30^\circ$ .

В случае, когда  $kd \gg 1$ ,  $\kappa L \gg 1$ ,  $\kappa D \gg S$  и  $S_1 > S_2$  из (11) – (14), рассматривая для простоты случай, когда избыточная концентрация носителей заряда меньше равновесной, получаем, соответственно,

$$V = \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \frac{1}{n_0 L} \frac{D}{\left(S_1 S_2 + \frac{D}{\tau}\right) \operatorname{sh} \frac{d}{L} + S_1 \frac{D}{L} \operatorname{ch} \frac{d}{L}} G_p; \quad (19)$$

$$G_p = \begin{cases} \left(\operatorname{ch} \frac{d}{L} + S_2 \frac{L}{D} \operatorname{sh} \frac{d}{L} - 1\right) \times \\ \times [(N-1)g_1 + g_3], & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \beta_2, \\ \left(\operatorname{ch} \frac{d}{L} + S_2 \frac{L}{D} - 1\right) N g_3 - \\ - \left(\operatorname{ch} \frac{d}{L} + S_1 \frac{L}{D} \operatorname{sh} \frac{d}{L} - 1\right) N g_4, & \text{при } \beta_2 \leq \alpha \leq \beta_1, \\ \left(1 - \operatorname{ch} \frac{d}{L} - S_2 \frac{L}{D} \operatorname{sh} \frac{d}{L}\right) \times \\ \times [(N-1)g_2 + g_4], & \text{при } \beta_1 \leq \alpha \leq \pi. \end{cases} \quad (20)$$

На рис. 4(c) приведена угловая зависимость АФН-эффекта для значений  $d/L = 10$ ,  $S_2 L/D = 0,1$ ;  $S_1 L/D = 1$ ,  $\beta_1 = 60^\circ$ ,  $\beta_2 = 30^\circ$ .

Из полученного результата видно, в частности, что аномальный дембер-эффект переходит в нормальный, что согласуется с ранее

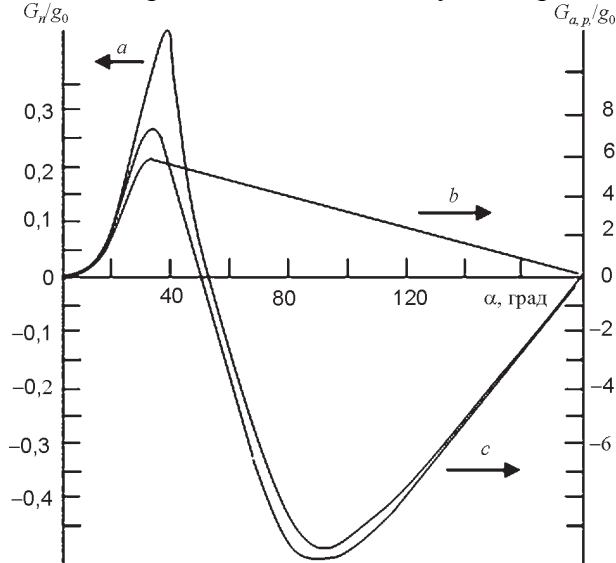


Рис. 4. Угловая зависимость нормального (a), аномального дембер-эффекта (b) и переход от аномального дембер-эффекта к нормальному (c).

высказанным в [4]. Соотношение  $\kappa D \gg S$  вместе с условиями  $kd \gg 1$ ,  $\kappa L \gg 1$ , которые ранее, в [4], считались достаточными, являются критерием перехода аномального дембер-эффекта в нормальный.

На рис. 5, 6, 7 приведены рассчитанные зависимости АФН-эффекта от толщины для нормального, аномального и при переходе от аномального к нормальному дембер-эффектам.

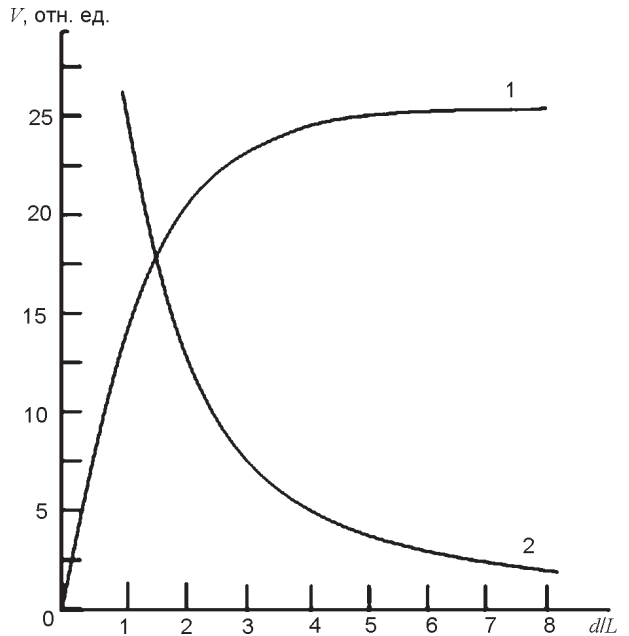


Рис. 5. 1 – зависимость нормального дембер-эффекта от толщины пленки,  $g_1 = 10^{28}$  пар/см<sup>3</sup>·с; 2 – зависимость АФН от толщины, отнесенная к длине пленки.

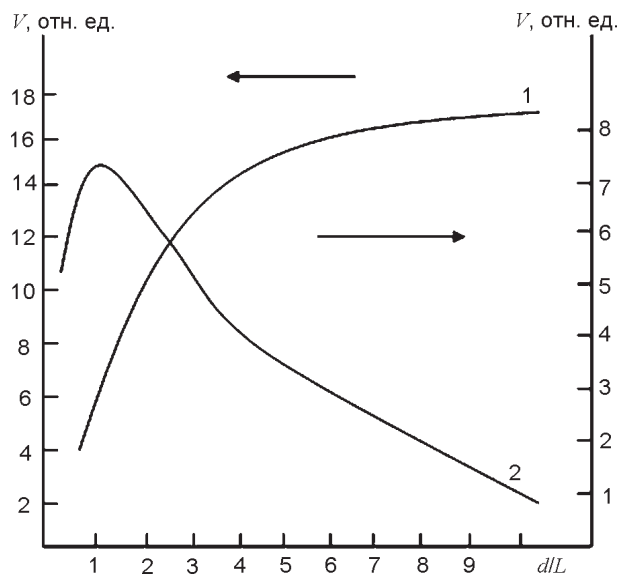


Рис. 6. 1 – зависимость аномального дембер-эффекта от толщины пленки; 2 – зависимость АФН от толщины, отнесенная к длине пленки.



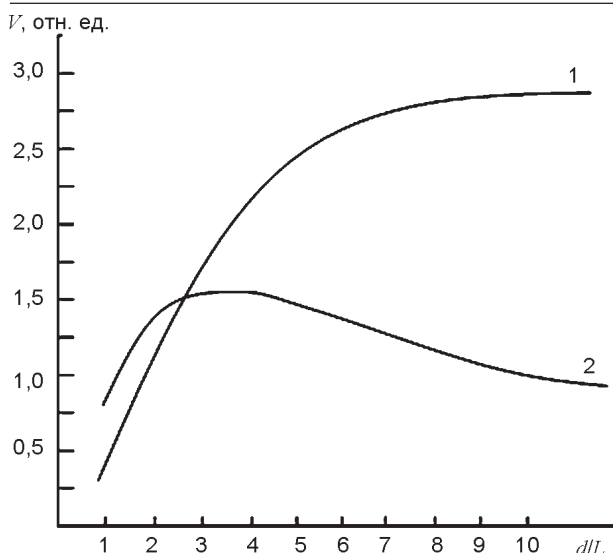


Рис. 7. 1 – зависимость АФН-эффекта от толщины пленки при переходе от аномального дембер-эффекта к нормальному ( $g_1 = 10^{24}$  пар/см<sup>3</sup>·с); 2 – зависимость АФН от толщины, отнесенная к длине пленки.

В экспериментах зависимость  $V_{\text{АФН}}$  от толщины пленок имеет колоколообразный вид с максимумом. Поэтому можно заключить, что в пленках, не имеющих инверсию знака фотонапряжения, реализуется аномальный дембер-эффект, а в пленках, имеющих инверсию, случай перехода аномального дембер-эффекта в нормальный.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получено аналитическое выражение для аномального фотонапряжения, связывающее величину и знак АФН с параметрами пленки и условиями освещения.

2. В рассмотренной модели многослойной структуры с однородными эффективными микрофотоэлементами могут быть реализованы условия, при которых возникают аномально-большие фотонапряжения. Численный расчет с параметрами пленок, которые взяты непосредственно из экспериментальных данных для кремния [4] показало, что АФН в среднем может достигать значений 1 кВ.

3. В спектральной зависимости в зависимости от параметров пленки, может как отсутствовать, так и наблюдаться инверсия знака фотонапряжения.

4. Из общего аналитического выражения в частном случае получается нормальный, аномальный дембер-эффекты.

5. Показано, что аномальный дембер-эффект может перейти в нормальный. При этом должны выполняться не только условия  $kd \gg 1$ ,  $\kappa L \gg 1$ , но и  $\kappa D \gg S_{1,2}$ .

6. Построенные характеристики на основе полученных выражений наблюдались в признанных экспериментах [1 – 5, 11 – 13].

7. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей  $V_{\text{АФН}}$  от толщины пленок показывает, что на практике реализуется случай аномального дембер-эффекта и перехода аномального дембер-эффекта в нормальный.

8. Используя полученные результаты, можно объяснить не только особенности АФН-эффекта в ряде полупроводниковых пленок, но и построить искусственные АФН-структуры [20].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Starkiewich I., Sosnowski L., Simpson O. Occurrence of condom photovoltaic barriers in photoconductive layers//Nature. – 1946. – Vol. 158. – P. 26.
2. Pensak L. High voltage photovoltaic effect// Phys. Rev. – 1958. – Vol. 109, № 2. – P. 601.
3. Goldstein B. Properties of photovoltaic films of CdTe//Phys. Rev.– 1959. – Vol. 30. – P. 155-161.
4. Адирович Э.И. и др. Аномально большие фотоэлектрический и фотомангнитный эффекты в полупроводниковых пленках//Сб. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника. – Ташкент. Изд. ФАН. – 1972. – С. 143-229.
5. Арифов У.А., Абдуллаев Н., Арифджанова М.С. Исследование АФН-эффекта в пленках GaAs // ФТП. – 1976. – Т. 10, Вып. 1. – С. 25-30.
6. Стафеев В.И. Супермногослойные структуры с p-n-переходами//ФТП. – 1971. – Т. 5, № 3. – С. 408-416.
7. Гулый Е.Г., Жадько И.П., Романов В.А. Фотовольтаические свойства ассиметричной периодической p-n-p-структуры//ФТП. – 1982. – Т. 16, Вып. 2. – С. 331-336.
8. Доцанов К.М. Механизм АФН-эффекта в поликристаллических полупроводниках// ФТП. – 1990. – Т. 24, Вып. 7. – С. 1251-1258.
9. Агарев В.Н., Степанова Н.А. К теории эффекта аномального фотонапряжения в многослойных структурах с p-n-переходами//ФТП. – 2000. – Т. 34, № 4. – С. 452-455.

10. Аронов Д.А., Юабов Ю.М. К теории АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с периодической *p-n-p*-...структурой//ФТП. – 1984. – Т. 18, № 7. – С. 1318-1321.
11. Schwabe G. Uber eine von der Lichtrichtung abhangiger Photo-EMK in polykristallinen PbS – schichten//Annalen der Physik. – 1956. – Т. 6, Вып. 17. – P. 249-262.
12. Schwabe G. Lichtungbhangiger Photoeffekt in PbS schichten//Z. fur Naturforschung. – 1955. – Vol. b. № 10a. – P. 78.
13. Абдуллаев Н., Аюханов А.Х., Арифов У.А. Влияние ионной бомбардировки на АФН-эффект в пленках Si и Ge//Изв. Ан РУз., сер. ф.-м.н. – 1973. – № 2. – С. 34-36.
14. Набиев Г.А. Спектры фотовольтаического эффекта в полупроводниковых пленках. – М.: Деп. в ВИНТИ 14.06.88 №4677-В88, 1988. – 22 с.
15. Хашимов Г.Х., Набиев Г.А. Угловая зависимость АФН-эффекта в полупроводниковых пленках//Известия АН РУз, сер. ф.-м.н. – 1988. – № 6. – С. 59-63.
16. Набиев Г.А. Угловая зависимость АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с *p-n*-переходами//УзФЖ. – 1996. – № 1. – С. 80-82.
17. Равич Ю.И. Фотоманнитный эффект в полупроводниках и его применение. – М.: Радио, 1967. – 96 с.
18. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. – М.: Радио, 1971. – 248 с.
19. Пожела Ю. и др. Варизонный детектор ионизирующего излучения//ФТП. – 2002. – Т. 36. – С. 124-128.
20. Кечиянц А.М. и др. Искусственные АФН-структуры//ФТП. – 1980. – Т. 14. – С. 984-986.

### ТЕОРИЯ АФН-ЕФЕКТУ З ДЕМБЕРОВСЬКИМ МЕХАНІЗМОМ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВКАХ

Г.А. Набієв

У роботі розроблена теорія АФН-ефекту (аномально великих фотонапруг) у напівпровідникових плівках з однорідними мікрообластями, що зв'язує величину й знак АФН із технологічними параметрами плівок і умовами освітлення. З отриманого аналітичного виразу впливають, зокрема вирази для нормального, аномального дембер-ефектів і при переході в область сильного поглинання аномальний дембер-ефект переходить у нормальний. При цьому повинна виконуватися не тільки умова сильного поверхневого поглинання й сильної генерації, але й умова  $\kappa D \gg S_{1,2}$  (де  $\kappa$  – коефіцієнт поглинання світла,  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $S_{1,2}$  – швидкість поверхневої рекомбінації граней). Як приклад, розраховані спектральні, люкс-вольтові, кутові залежності й залежність АФН-ефекту від товщини. Зіставлення розрахункових й експериментальних даних показує, що в плівках реалізується випадок аномального дембер-ефекту й переходу аномального дембер-ефекту в нормальний.

На основі отриманих результатів можна пояснити не тільки особливості АФН-ефекту, але й побудувати штучні АФН-структури.

### THE THEORY OF APV EFFECT WITH DEMBER MECHANISMS IN SEMICONDUCTOR FILMS

G.A. Nabiev

It was worked out the theory of APV effect (anomalous high photo voltage) in semiconductor films with homogeneous micro regions connecting AVP and sign with technological film parameters and lighting condition. As a result of given analytic expression are the ones for normal, anomalous dember-effect which at transition to strong absorption field transform from anomalies to normal. In His case it must be carried out strong surface absorption and high generation condition, and  $\kappa D \gg S_{1,2}$  condition ( $\kappa$  – light absorption coefficient,  $D$  – diffusion coefficient,  $S_{1,2}$  – edge surface recombination velocity). For example, luxe-voltaic, angular, thickened dependences of AVP effect. Comparing measured and experimental data it was shown that in films was realized the case of anomalous dember effect and transition anomalous dember effect info normal.

On the basis of given results it can be explained APV effect peculiarities and built artificial APV structures.