

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА a-Si:H/c-Si СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Галат А.Б.

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

*пр. Ленина 14, Харьков - 61009, Украина*

*тел.: +38 (057) 7021362, e-mail: [mepu@kture.kharkov.ua](mailto:mepu@kture.kharkov.ua)*

The given work is devoted to investigation and research of analytical model of a-Si:H/c-Si heterojunction, used in solar cells. The model based on diffusion electron/hole motion mechanism. The analytical expressions of voltage-current characteristics are presented. Computer simulations have been carried out in order to attempt the optimal configuration of layer structure. The influence of doping concentrations level of both a-Si:H and c-Si layer on the current density is also calculated.

## 1 Введение

Математическое моделирование является необходимым этапом проектирования и разработки электронных устройств, что позволяет получить оптимальную конструкцию прибора и прогнозировать его дальнейшую модернизацию.

Производство солнечных элементов, модулей, электростанций переживает период стремительного наращивания объемов выпуска и расширения направлений использования изделий. В этих условиях на первый план выходит повышение эффективности солнечных фотопреобразователей, снижение удельного расхода материалов и, в конечном итоге, уменьшение стоимости единицы произведенной электроэнергии. Экспериментальные исследования в этой области должны основываться на предварительных численных или аналитических расчетах на базе адекватных математических моделей.

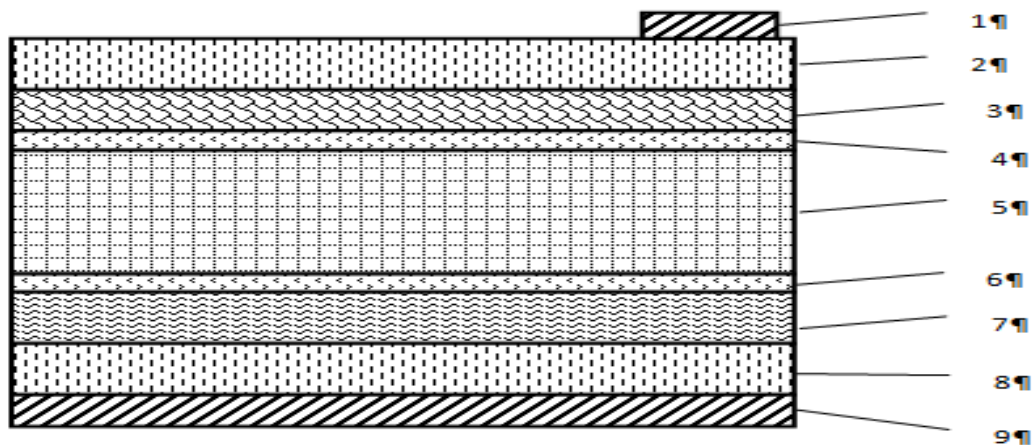
В настоящее время в массовом производстве солнечных элементов используют гетеропереходы на основе кристаллического кремния (c-Si) и гидrogenизированного аморфного кремния (a-Si:H), теллурида кадмия (CdTe), диселенида индия (CuInSe<sub>2</sub> — CIS), диселенида галлия (CuGaSe<sub>2</sub> — CGS), а также твердых растворов CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> — CIGS и др. Это позволяет подтвердить актуальность разработки эффективных численных и аналитических моделей солнечных фотопреобразователей, использующих гетеропереходы. Предлагаемая математическая модель разработана для перехода (p)-a-Si:H/(n)-c-Si, однако может быть использована и для других конфигураций и материалов гетероструктуры.

## 2 Анализ конфигурации фотопреобразователя и выбор математической модели

Для моделирования выбран фотопреобразователь, изготовленный на основе нескольких слоев и переходов между ними (рисунок 1). Приведенная структура используется в солнечном фотопреобразователе, разработанном фирмой SANYO [1]. Структура, приведенная на рисунке 1, имеет несколько гетеропереходов, однако основным функциональным элементом является переход (p) a-Si:H - (i) a-Si:H - (n) c-Si (резкий анизотипный гетеропереход), моделирование которого будет рассмотрено ниже.

Первые изотипные и анизотипные гетеропереходы были изготовлены Андерсоном в 1960 году. Он также впервые предложил подробную модель структуры энергетических зон вблизи границы раздела двух полупроводников различных типов[2].

Позже несколько моделей гетеропереходов были предложены разными учеными, но в отличие от модели Шокли для обычного гетероперехода ни одна из них не может с достаточной степенью достоверности объяснить все физические явления, которые имеют место в реальном контакте двух различных полупроводников.



1 – фронтальный контакт, 2 – ИТО, 3 - слой (p) a-Si: H, 4 – слой (i) a-Si:H, 5 – слой (n) c-Si, 6 – слой (i) a -Si: H, 7 – слой (n) a-Si: H, 8 – ИТО, 9 – тыльный контакт

Рисунок 1 – Структура солнечного фотопреобразователя

Наиболее важные из этих моделей рассмотрены в монографии Шармы и Пурохит[3]. Для описания основных характеристик и структуры энергетических зон резких анизотипных гетеропереходов авторы рассматривают следующие физические модели:

- Диффузионная модель Андерсона;
- Эмиссионная модель Перлмана и Фойхт;
- Эмиссионно-рекомбинационная модель Долего;
- Туннельная модель Редайкера, Стопека и Уорда;
- Туннельно-рекомбинационная модель Райбен и Фойхт.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные позже благодаря достижениям в технологии формирования высококачественных многослойных полупроводниковых структур, а также в технологиях измерения их характеристик и параметров, позволили более тщательно подойти к моделированию указанных гетеропереходов. Анализ вышеприведенных моделей токопереноса позволяет сделать следующие выводы:

- Ни одна из вышеприведенных моделей самостоятельно не может адекватно описать механизм токопереноса на всем интервале изменения внешнего напряжения на гетеропереходе;
- Тип используемой модели для конкретной структуры гетероперехода необходимо выбирать учитывая экспериментальные исследования, поскольку вид вольтамперной характеристики (ВАХ) гетероперехода существенно зависит от использованных материалов, качества контакта, режима работы (в частности размера внешнего напряжения);

–Для большинства исследуемых гетеропереходов структура энергетических зон и ВАХ удовлетворительно описываются модифицированной моделью Андерсона.

На основании изложенного для моделирования основного функционального гетероперехода структуры (рисунок 1, слои 3,4,5, на первом этапе слой (i) не учитываем) была выбрана модифицированная модель Андерсона [3]. Параметры, принадлежащие слою (n) c-Si, будем обозначать индексом 1, параметры, которые относятся к слою (p) a-Si: H, - индексом 2.

Основные параметры моделируемого гетероперехода, характеристики материалов взяты из работ, посвященным экспериментальным исследованиям аналогичной структуры[1,4,5].

С целью конкретизации варианта модели были выполнены расчеты работы выхода  $W_{e1}$  (материала 1) и  $W_{e2}$  (материала 2), контактной разности потенциалов  $\Delta\phi$ , высоты «пика»  $\Delta W_v$  ( $W_{e1} = 4,24$  эВ,  $W_{e2} = 5,613$  эВ,  $\Delta\phi = 1,373$  эВ,  $\Delta W_v = 0,45$  эВ).

Оценка размера изгиба профиля энергетических зон с стороны слоя 1 вблизи гетероперехода  $\Delta W_{D1}$ , учитывая типичное соотношение уровней легирования Nd1/Na2 (значительно – на 3 порядка – меньше степень легирования слоя 1), дает значение, которое примерно равно 1,3 эВ. Согласно полученным значениям  $W_{e1}$ ,  $W_{e2}$ ,  $\Delta\phi$  и выполнения следующих условий:  $\chi_1 > \chi_2$ ,  $W_{e1} < W_{e2}$ ,  $\chi_1 + W_{g1} < \chi_2 + W_{g2}$ ,  $\Delta W_{D1} > \Delta W_v$ , делаем выбор варианта III типа профиля гетероперехода согласно таблице 2.1. [3]

Равновесный профиль энергетических зон моделируемого гетероперехода приведен на рис.2.

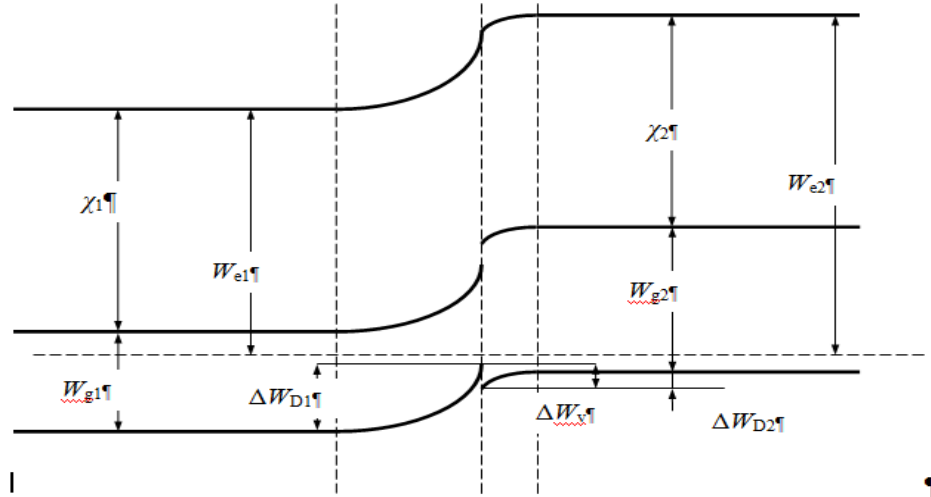


Рисунок 2 – Равновесный профиль энергетических зон гетероперехода

Плотность тока указанного гетероперехода  $J$  имеет две составляющие

$$J = J_V + J_\Phi, \quad (1)$$

где  $J_V$  – ток гетероперехода за счет внешнего напряжения;

$J_\Phi$  – фототок.

Первая составляющая соотношения (1) согласно варианта расчета определяется уравнением

$$J_V = A_0 e^{-\frac{(\Delta W_D - \Delta W_V)}{kT}} \cdot \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $A_0 = qXN_{a2}(D_{p1}/\tau_{p1})^{1/2}$ ;

$\Delta W_D = \Delta W_{D1} + \Delta W_{D2}$ ;

$V$  – внешнее напряжение на гетеропереходе.

Вторая составляющая соотношения (1) обусловлена внешним излучением, и, учитывая направление облучения указанного гетероперехода, определяется следующим образом (неуказанные обозначения в формулах аналогичны приведенным в [3]).

$$J_\Phi = J_{\Phi 1} + J_{\Phi 2}, \quad (3)$$

$$J_{\Phi 1} = a_1 q \Phi_0 e^{-\alpha_1 d_1} \cdot (1 - e^{-\alpha_1 l_1} + \frac{\alpha_1 L_1}{1 - (\alpha_1 L_1)^2} \cdot A_1), \quad (4)$$

$$A_1 = ((\frac{C_1}{C_2} - \alpha_1 L_1) \cdot e^{-\alpha_1 l_1} + \frac{(\alpha_1 L_1 - \frac{S_1 L_1}{D_1})}{C_2} \cdot e^{-\alpha_1 d_1})$$

$$J_{\Phi 2} = a_2 q \Phi_0 e^{-\alpha_2 d_2} \cdot (e^{\alpha_2 l_1} - 1 + \frac{\alpha_2 L_2}{1 - (\alpha_2 L_2)^2} \cdot A_2), \quad (5)$$

$$A_2 = ((\frac{C_3}{C_4} + \alpha_2 L_2) \cdot e^{\alpha_2 l_2} - \frac{(\alpha_2 L_2 + \frac{S_2 L_2}{D_2})}{C_4} \cdot e^{\alpha_2 d_2})$$

$$\text{где } C_1 = sh \frac{d_1 - l_1}{L_1} + \frac{S_1 L_1}{D_1} ch \frac{d_1 - l_1}{L_1}, \quad C_2 = ch \frac{d_1 - l_1}{L_1} + \frac{S_1 L_1}{D_1} sh \frac{d_1 - l_1}{L_1};$$

$$C_3 = sh \frac{d_2 - l_2}{L_2} + \frac{S_2 L_2}{D_2} ch \frac{d_2 - l_2}{L_2}, \quad C_4 = ch \frac{d_2 - l_2}{L_2} + \frac{S_2 L_2}{D_2} sh \frac{d_2 - l_2}{L_2};$$

$$l_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0 (\Delta\varphi - V)}{qN_{a1}^2 (\frac{\varepsilon_1}{N_{a2}} + \frac{\varepsilon_2}{N_{d1}})}}, \quad l_2 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0 (\Delta\varphi - V)}{qN_{a2}^2 (\frac{\varepsilon_1}{N_{a2}} + \frac{\varepsilon_2}{N_{d1}})}}$$

### 3 Апробация модели и выводы

Приведенные формулы позволили рассчитать вольтамперную характеристику вышеприведенного гетероперехода при изменении толщины функциональных слоев, уровня их легирования и других электрофизических параметров материалов гетероструктуры. Сравнение полученных расчетов с данными [5] показало удовлетворительное совпадение результатов моделирования и эксперимента. Анализ результатов подтверждает работоспособность и адекватность модели.

1. Datta A., Chatterjee P. Computer Modeling of Heterojunction with Intrinsic Thin Layer “HIT” Solar Cells: Sensitivity Issues and Insights Gained . – Solar Cells – Thin-Film Technologies. Edited by Prof. Leonid A. Kosyachenko – InTech, 2011.- P.275-302.

2. Anderson R.L. Solid State Electron., -1962. –№5. – С.341.

3. Шарма Б.Л., Пурохит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы: Пер. с англ./ Под ред. Ю.В.Гуляева.– М.:Сов. Радио, 1979.– 232 с.

4. Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева – Т.3. – 3-е изд. перераб. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 728 с.

5. Николаев Ю.А. и др., Фотоэлектрические явления в солнечных элементах ZNO(ITO)/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al// Физика и техника полупроводников. – 2002. – Том 36. – Вып. 9. – С.1128-1132.