

УДК 621.314; 621.391

<sup>1</sup>А. И. Шевченко <sup>1,2</sup>А. С. Мазинов, <sup>3</sup>Л. Д. Писаренко

<sup>1</sup> Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, Украина  
e-mail: mas@crimea.edu

<sup>2</sup> Крымский научный центр Национальной академии наук Украины и МОН Украины,  
г. Симферополь, АР Крым

<sup>3</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
г. Киев, Украина

## ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРОНТАЛЬНЫХ P-N ПЕРЕХОДОВ

*Проведены экспериментальные и теоретические исследования фотоэлектрических элементов на основе монокристаллического кремния. Рассмотрены основные теоретические аппроксимации для описания фронтального близко залегающего p-n перехода. Предложен численно-аналитический подход к описанию диффузионной модели барьера оптоэлектронного прибора. Из сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей показаны возможные технологические особенности, изменяющие токовые характеристики прибора.*

**Ключевые слова:** фотогальванический прибор, p-n переход, численно-аналитический расчёт, вольтамперные характеристики

*Проведено експериментальні та теоретичні дослідження фотоелектричних елементів на основі монокристалічного кремнію. Розглянуто основні теоретичні апроксимації для опису фронтального близько залягає р-п переходу. Запропоновано чисельно-аналітичний підхід до опису дифузійної моделі бар'єру оптоелектронного приладу. З порівняння експериментальних і теоретичних залежностей показані можливі технологічні особливості, що змінюють струмові характеристики приладу.*

**Ключові слова:** фотогальванічний прилад, p-n перехід, чисельно-аналітичний розрахунок, вольтамперні характеристики.

### Введение

Мегаваттные установочные мощности фотоэлектрических станций требуют синхронной работы миллионов кремниевых элементов. Стабильность рабочих напряжений и токов каждого элемента выявляется их вольтамперными характеристиками, для описания которых требуются специфические модели фронтальных близко залегающих p-n переходов [1, 2, 3].

### Постановка задачи и цель исследования

Точное описание построения силового оптоэлектронного прибора требует детальных расчетов области объемного заряда (ООЗ), размеры которой хоть и составляют микронные длины, но всё же имеют нанометрический градиент распределения встроенного заряда [9]. Подробное описание построения внутреннего электрического барьера позволяет получить оптимальные характеристики генерируемых структур [6, 8], т. е. добиться увеличения фотогенерируемого тока с фотогальванических элементов при увеличении разности потенциалов. Для решения данной задачи необходимо проанализировать существующие модельные подходы к описанию потенциального барьера биполярного полупроводника.

Для экспериментальной части исследования необходимо определить методы получения фотоэлектрических структур, которые бы удовлетворяли двум основным требованиям. Первое, простота технологической цепочки, дающая низкую себестоимость фотогенерируемого ватта электрической энергии. Второе, заключается в высоком потенциальном барьере, который позволяет обеспечивать эффективное разделение фотогенерируемых пар носителей заряда.

### Построение потенциального барьера и его аппроксимации

Ставка мировой фотогальванической индустрии на кристаллический кремний оставляет температурную диффузию как основной процесс создания разделительного барьера. Снижение температуры диффузии, диктуемое экономическими ограничениями массового производства

солнечных элементов. Это, в свою очередь, накладывает дополнительные трудности на расчет профиля легируемой примеси, а значит и на распределения заряда на границе раздела n- и p- областей [7].

Аналитическое описание реального потенциального барьера выстроенного на основе низкотемпературной диффузии в равномерно легированный кристалл достаточно сложно и требует специализированных расчетов [4]. В качестве отправной экспериментальной точки были взяты фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на базе монокристаллического кремния фронтальной n-областью легированной фосфором  $10^{21} \text{ см}^{-3}$  и базой с равномерным распределением бора на уровне  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Простейшим модельным представлением встроеного атомного заряда, для выбранного ФЭПа, является ступенчатая аппроксимация. В случае резкого перехода оптимальной является ступенчатая аппроксимация [6] с квадратичной зависимостью ООЗ:

$$d_0^2 = \frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0}{e} \varphi_k \frac{n_n + p_p}{n_n p_p}.$$

Однако диффузионный профиль выстроенный посредством тепловой загонки примеси является эрфикс функцией от экспоненциальной зависимости коэффициента диффузии и имеет сложную геометрию (рис.1) [7].

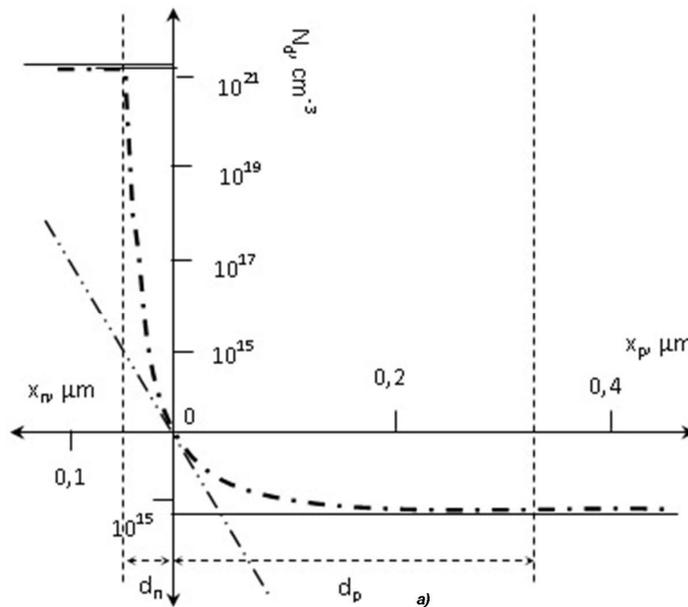


Рис. 1.

Более близким профилем можно считать прямую зависимость в случае симметричного распределения примеси. Это дает возможность использования линейной функции распределения ООЗ [6], в которой связь потенциала  $\varphi_k$  с длиной зарядовой области  $d_0$  выражается кубической зависимостью:

$$d_0^3 = \frac{12\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - U)}{q|a|}.$$

Однако для выше приведенных модельных представлений высота потенциального барьера и следовательно, напряжения холостого хода фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) определяется разностями термодинамических работ выхода двух материалов. Энергетические величины работ выхода электронов для p- и n- типов определяются максимумами концентраций соответствующих носителей зарядов:

$$e\varphi_k = kT \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2},$$

которые зависят от объемной концентрации примеси  $n_n = N_d$  и  $p_p = N_a$ :

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2}$$

Это допущение дает дополнительные ошибки вследствие того, что концентрации доноров в ООЗ не всегда достигают максимума (рис. 1).

Для увеличения точности расчета при анализе построения р-п перехода предлагается использовать численно аналитический подход, который с одной стороны достаточно точен, но достаточно индивидуален, что требует расчета для каждого прибора. Рассчитанный для фронтального р-п перехода, профиль концентрации легирующих атомов (рис. 1) с дальнейшим его пересчетом в некомпенсированный заряд при условии:

$$Q_n^+ = e(N_d - N_a) \quad \text{и} \quad Q_p^- = e(N_a - N_d).$$

Предлагаемый подход позволяет интегрированием по двум областям получить истинное распределение потенциала в ООЗ:

$$\varphi_k = \int_{-d_n}^{d_p} \frac{1}{\varepsilon_r \varepsilon_0} (Q_n^+ + Q_p^-) dx = \int_{-d_n}^0 Q_n^+ \frac{1}{\varepsilon_r \varepsilon_0} dx + \int_0^{d_p} \frac{1}{\varepsilon_r \varepsilon_0} Q_p^- dx$$

Дальнейший анализ построения потенциального барьера заключается в расчёте графиков напряжённости и потенциала [5]. Для сравнительных экспериментальных образцов результаты численного интегрирования заряда и поля в ООЗ начинаются на глубине 170 нм, а заканчиваются на глубине 550 нм. Граница полупроводников разного типа проводимости залегает на 220 нм, при толщине ООЗ равной 380 нм. Сравнительный анализ упрощённых моделей и данного численного расчёта потенциала и полей показал отличия, которые заключаются в величине поля и его протяжённости.

#### Модельные подходы токовых зависимостей.

Отсутствие четкой взаимосвязи между параметрами технологического процесса и вольтамперными характеристиками готового элемента в первую очередь обусловлена большим количеством переменных и их вероятностным распределением.

В общем, случаи зависимости токов перехода от увеличения прямого напряжения, практически во всех модельных представлениях, достаточно точно описываются экспоненциальными зависимостями. С точки зрения экспериментальных характеристик важным фактором является детерминирование предэкспоненциальной и экспоненциальной констант, которые определяются внешними условиями, физическими параметрами исходных материалов и технологическими условиями получения:

$$I = a e^{bU},$$

где  $a$  – коэффициент, определяемый внутренней структурой и физикой построения потенциального барьера атомарной матрицы перехода. Он определяет начальный рост тока и представляет собой обратный ток насыщения р-п перехода. Экспериментальный рост прямого тока  $b$  в твердотельной теории полупроводниковых приборов объясняются распределением энергий носителей по Ферми – Дирака (Максвелла-Больцмана) [6].

Для выбранных экспериментальных образцов были рассмотрены наиболее применяемые теории. Общий вид вольтамперных зависимостей (ВАХ) идеального диода (рис. 2 кривая 1), с учетом обратных токов  $I_0$  определялся как [6].

Учет процессов рекомбинации и рассеивания носителей заряда для процессов протекания прямых токов, в справочной литературе, учитывается введением в экспоненциальную зависимость дополнительной величины – коэффициента неидеальности  $m$ . Потеря мощности элемента определяется коэффициентом неидеальности, который уменьшает токи по сравнению с идеализированной структурой (рис. 2 кривая 3), то есть он характеризует дефекты, контактные соединения, и другие процессы, мешающие быстрому перемещению зарядов:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{eU}{m k T}} - 1 \right)$$

Неоднозначным вопросом с точки зрения физического моделирования остается определение предэкспоненциальной константы  $I_0$ , которая была определена как обратный ток насыщения р-п перехода и находится пределом тока при стремлении обратного напряжения к минус бесконечности.

Однако, значение  $I_0$  эмпирически и в большинстве случаев определяется токами уже готового прибора, тем самым не давая глубокой связи между физической моделью и рабочими характеристиками прибора. В этом случае,  $I_0$  определяется диффузионными или дрейфовыми

механизмами перемещения зарядов в ООЗ, распределение заряда в которой определялось выше. Зависимость тока от градиента концентрации определялась как:

$$I_0 = eS \left( \frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right)$$

и дает наиболее заниженное значение прямых токов (рис. 2 кривая 2).

$$I = I_0 (e^{\frac{eU}{kT}} - 1)$$

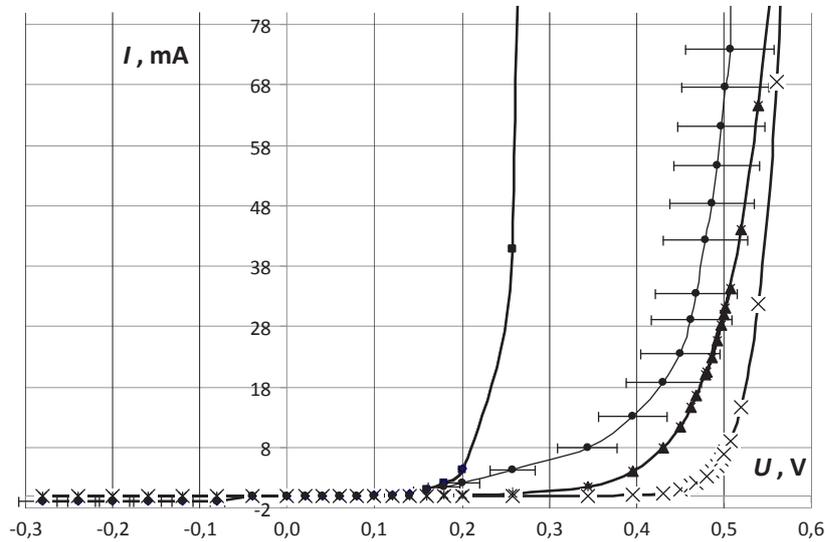


Рис. 2.

- 1- ■ – идеализированная характеристика; 2-● – среднестатистическая экспериментальная характеристика и доверительный интервал; 3-▲ – модельное представление с учетом неидеальности элемента; 4-X – модельное представление по дрейфовой теории.

Сравнение трех модельных представлений и экспериментальных характеристик промышленного образца площадью 125x125 мм<sup>2</sup>, показало, что наиболее приближенным к рабочим характеристикам является представление учитывающее неидеальность фотоэлектрического элемента, посредством введения постоянного коэффициента в экспоненциальную зависимость.

#### Выводы

Таким образом, основные сложности определения параметров области объемного заряда промышленных фотоэлементов и, как следствие, глубины залегания p-n перехода, заключаются в несимметричности потенциального барьера фронтального близко залегающего p-n перехода. Для решения данной задачи нами были проанализированы возможные методики построения потенциального барьера. Предложено для расчета распределения встроенного заряда выявить аналитическую часть, которую далее необходимо решать численным методом последовательного интегрирования.

Проведенный сравнительный анализ показал неоднозначность интерпретации ВАХ, имеющих разброс в зависимости от подхода описания обратных токов p-n перехода и учета процессов рекомбинации, рекомбинации и неидеальности контактной группы. Наибольшей точности в описании токовых зависимостей можно добиться посредством введения коэффициента неидеальности получаемого из линеаризации экспериментальных ВАХ.

#### Список литературы

1. Green M., Zhao J., Wang A. Wenham S. Very high efficiency silicon solar cells – science and technology // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES. – 1999. – VOL. 46, № 10, p.p. 1940–1947.
2. Hausmann S. The sun is rising in the East// Sun & wind energy. – 2010 – № 9. – С. 90–102.
3. Joun Iken Draw and saw – a system comparison // Sun & wind energy. – 2006 – № 2. – С. 106–112.
4. Redfield D. Revised model of asymmetric p-n junctions // Applied Physics Letters – 1979, . vol. 35, July 15 – P. 182–184.
5. Гуртов В. Твердотельная электроника. Петрозаводск.: ПетрГУ, 2004–312 с.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. Пер. с английского. М.: – Мир, –1984. –

456 с.

7. *Мазинов А., Писаренко Л., Шевченко А.* Девиация диффузионных констант и её влияние на профиль мелко залегающего р-п перехода. Технічна електродинаміка: тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2012. – Ч. 1. – С. 204–208.

8. *Мазинов А., Шевченко А., Быков М.* Асимметричность плотности распределения объемного некомпенсированного заряда на границе металлургического р-п перехода // Журнал Нано- та Електронної Фізики. – 2012 – Том 4 № 3, 03026(4с).

9. *Швец Е.Я., Головки Ю.В.* Зависимость коэффициента распределения примеси при кристаллизации кремния от степени легирования // Электроника и связь. – 2008. – №1–2 (42–43), С. 14–16.

## NUMERICAL AND ANALYTICAL APPROACH AND PERFORMANCE THE FRONTAL P-N JUNCTION

<sup>1</sup>A. I. Shevchenko, <sup>1,2</sup>A. S. Mazinov, <sup>3</sup>L. D. Pisarenko

<sup>1</sup>National Taurida V.I. Vernadsky University

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

<sup>3</sup>Crimean Scientific Centre of NAS and MES

e-mail: mas@crimea.edu

*Experimental studies and theory of galvanic photovoltaic elementary based on single-crystal silicon were made. The principal theoretical approximations to describe the frontal shallow p-n junction were considered. A numerical and analytical approach to the description of the diffusion model of the barrier of optoelectronic device was proposed. A comparisons of experimental and theoretical curves show the possible technological features that change the current characteristics of the device.*

**Key words:** *optoelectronic device, the diffusion model, numerical and analytical calculation, the solar cell.*

1. *Green M., Zhao J., Wang A. Wenham S.* Very high efficiency silicon solar cells – science and technology // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES. – 1999. – VOL. 46, № 10, p.p. 1940–1947. (En)

2. *Hausmann S.* The sun is rising in the East// Sun & wind energy. – 2010. – № 9. – С. 90–102. (En)

3. *Joun Iken* Draw and saw – a system comparison // Sun & wind energy. – 2006 – № 2 С. 106–112. (En)

4. *Redfield D.* Revised model of asymmetric p-n junctions // Applied Physics Letters – 1979, . vol. 35, July 15 – P. 182–184. (En)

5. *Gurtov B.* Solid-state electronics. Petrozavodsk.: Petrozavodsk GU, 2004 - 312 p.

6. *Zee S.* Physics of semiconductor devices. Book 1. Tran. English, Moscow:Mir, – 1984.– 456 p.

7. *Mazinov A. Pisarenko, L., Shevchenko A.* Deviation of the diffusion constants and its effect on the profile of finely-lying p-n junction // Tekhnicheskaiа elektrodinamika. – 2012. – special issue of "Power Electronics and Energy Efficiency"– Part 1- P. 204–208 (Rus.).

8. *Mazinov A., Shevchenko, A., Bykov M.* The asymmetry of the distribution density of the compensated volume charge at the metallurgical pn junction // Journal of Nano-and Electronic Physics – 2012 – Volume 4, № 3, 03026(4с).

9. *Shvets E., Golovko Y.* The dependence of the distribution of impurities in the crystallization of silicon on the dopant // Elektronika i Svyaz. – 2008. – № 1–2 (42–43), P. 14–16.