

## СТРУКТУРА РЕЗКО АСИММЕТРИЧНОГО p-n-ПЕРЕХОДА С УЧЕТОМ ЗАРЯДА ПОДВИЖНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

### Введение

Широкое применение наноструктур в современной полупроводниковой электронике и оптоэлектронике требует адекватного моделирования их основных характеристик. В то же время численный эксперимент с использованием программных пакетов SolidWorks, Comsol Multiphysics во многих случаях слишком сложен, требует значительных ресурсов и тщательной оценки применимости в каждом конкретном случае. На начальных стадиях разработки аналитические оценки зачастую достаточно точно описывают физику процессов и легко реализуемы.

При моделировании полупроводниковых структур и уточнении оценок тока рекомбинации возникает необходимость более точного (четкого, ясного и формального) определения области пространственного заряда (ОПЗ) или области преобладания заряда легирования (ОПЗЛ), в частности с помощью математического уравнения, использующего параметр степени обеднения. Это касается модели с учетом пространственного заряда подвижных носителей (МУПН). Подобные задачи возникают в приложениях моделирования силовых полупроводниковых переходов (ППП), солнечных элементов (СЭ) с концентраторами излучения (при высоких температурах и плотностях излучения), выполненных с учетом объемного заряда подвижных носителей.

Данная работа выполнена в контексте уточнения аналитической оценки тока рекомбинации в части обоснования границ применимости модели Шоттки и расширения области применения модели Шоттки при расчете токов рекомбинации в области пространственного заряда резко асимметричного полупроводникового перехода.

### Математическая модель

При учете подвижных носителей в ОПЗ она разделится на три части граничной степенью обеднения области пространственного заряда:

$$\delta(x) = \frac{\max(p(x), n(x))}{\max(N_d, N_a)} < \delta,$$

где  $n, p$  – концентрации электронов и дырок соответственно;  $N_d, N_a$  – концентрации легирующих примесей доноров и акцепторов соответственно,  $\delta$  – максимально допустимая степень обеднения ОПЗЛ.

Для выбранного ППП с низколегированной донорной областью ОПЗЛ – области преобладания заряда ионизированных доноров (ОПД) переход окружен с одной стороны областью с высокой концентрацией дырок, с другой стороны областью с высокой концентрацией электронов, границы которых определяются из операторных уравнений:

$$x_{ed} = KOR(n(x) = N_d \cdot \delta)_x;$$

$$x_{dp} = KOR(p(x) = N_a \cdot \delta)_x;$$

$$d_{id} = x_{ed} - x_{dp};$$

где  $x_{ed}$  – координата границы между ОПД и области с высокой концентрацией электронов;  $x_{dp}$  – координата границы между областью с высокой концентрацией дырок и ОПД;  $d_{id}$  – толщина области ОПЗЛ (области преобладания заряда доноров);  $KOR$  – оператор поиска корня уравнения вариацией одной переменной.

ОПД образуется при напряжениях ниже напряжения схлопывания ОПД

$$\lim_{p,n \rightarrow 0} U_{sh} = \phi_k, \quad \lim_{U \rightarrow U_{sh}} d_{id} = 0, \quad U_{sh} < \phi_k$$

где  $\phi_k$  – контактная разность потенциалов.

Первый предел фактически требует тождество МУПН модели Шоттки в приближении малости концентрации подвижных носителей. Второй предел есть математическое определение напряжения схлопывания. Третье неравенство ограничивает вариацию положительного напряжения схлопывания контактной разностью потенциалов, при этом тождество достигается только при абсолютном нуле температуры перехода.

Модель Шоттки [1 – 3] по сравнению с предложенной моделью имеет следующие недостатки:

- дает завышенное напряжение схлопывания области пространственного заряда (напряжение, при котором исчезает область пространственного заряда), приравнивая ее контактной разности потенциалов;
- отсутствует параметр, определяющий степень обеднения области пространственного заряда (насколько заряд основной легирующей примеси больше заряда подвижных носителей (электронов или дырок));
- не выявляет область инверсной проводимости в низколегированном полупроводнике вблизи металлургической границы контакта;
- дает нулевую напряженность электрического поля на границе раздела ОПЗ и квазинейтральной области, что не соответствует действительности; специальные доопределения к теории Шоттки не дают однозначного ответа на вопрос о напряженности электрического поля на границе ОПЗ и квазинейтральной области;
- предсказывает не соответствующую действительности, строго положительную динамику роста толщины ОПЗ при уменьшении концентрации легирования низколегированной области полупроводника (в контексте данной работы – донорной области), и стремлением толщины ОПЗ к бесконечности при приближении низколегированной области к собственно полупроводнику.

Модель ППП основывается на решении фундаментальной системы уравнений (ФСУ) ППП, при следующих обозначениях и граничных условиях [2]:

$$\begin{cases} E'_x = q_\varepsilon \cdot (p + N_d - n - N_a) \\ \phi_t \cdot n'_x + n \cdot E = 0 \\ \phi_t \cdot p'_x - p \cdot E = 0 \end{cases}$$

$$q_\varepsilon = \frac{q_e}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \quad \phi_t = \frac{k_b \cdot T}{q_e} \quad n_n = N_d \quad p_n = \frac{n_i^2}{N_d} \cdot \exp\left(\frac{U}{\phi_t}\right) \quad u = \frac{U}{\phi_t}$$

Решение ФСУ ППП произведено в параметрах:

$$f = \frac{\Delta\phi}{\phi_t} \text{ – параметр потенциала электрического поля;}$$

$$a = \frac{E}{\phi_t} \text{ – параметр напряженности электрического поля;}$$

$$a = -\sqrt{2 \cdot \frac{q_\varepsilon}{\phi_t} \cdot (p_n \cdot (e^{-f} - 1) - N_d + n_n \cdot (e^f - 1))}$$

Значение параметра потенциала на металлургической границе в приближении резко асимметричного перехода с низколегированной донорной областью

$$f_m = -\frac{\phi_{pm}}{\phi_t}, \quad f_m = -\frac{E_g}{q_e \cdot \phi_t} + \ln\left(\frac{N_v}{p}\right) + \ln\left(\frac{N_c}{n}\right).$$

Граница между областью, обогащенной и обедненной электронами

$$n = N_d \cdot \delta, \quad f_{ed} = \ln(\delta).$$

Граница между областью, обогащенной дырками и обедненной

$$p = N_d \delta, \quad f_{dp} = -2 \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) - \ln(\delta) + u.$$

Параметр потенциала при равенстве концентраций электронов и дырок

$$n = p, \quad f_{np} = \ln\left(\frac{n_i}{N_d}\right) + \frac{u}{2}.$$

Параметр потенциала, меньше которого справедливо линейное разложение статистики

$$PRI(e^x) = 1 + x, \quad f_{ls} = -1.$$

Параметр напряжения схлопывания обедненной области

$$f_{ed} = f_{dp}, \quad u_{sh} = 2 \cdot \left(\ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) + \ln(\delta)\right).$$

Разность координат произвольно выбранных потенциалов выражается через интеграл

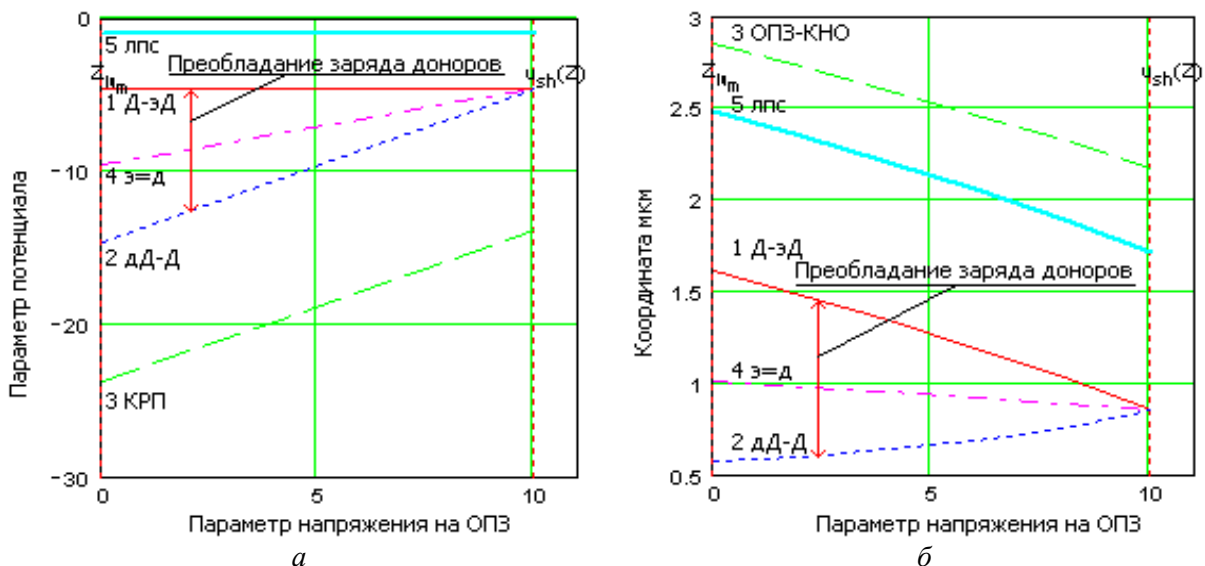
$$x_f - x_s = -\int_{f_s}^{f_f} \frac{1}{a(f)} df.$$

### Численный эксперимент

Моделирование производилось при следующих параметрах модели:  $N_a = 10^{16}$  1/см<sup>3</sup> – легирование акцепторной области;  $N_d = 10^{15}$  1/см<sup>3</sup> – уровень легирования донорной области;  $u_m = 0$  – параметр напряжения, приложенного к полупроводниковому переходу;  $\delta = 1\%$  – граничная степень обеднения ОПД.

Зависимость потенциального профиля от приложенного к переходу напряжения (рис. 1, а) является линейной, что дает возможность аналитически определить напряжение схлопывания. Зависимость показывает, что перепад потенциалов областей, обогащенных подвижными носителями не зависит от приложенного напряжения.

Зависимость координатного профиля от приложенного напряжения (рис. 1, б) показывает, что с ростом приложенного прямого напряжения уменьшается область преобладающего заряда ионизированных доноров и увеличивается толщина области, обогащенной дырками, это и приводит к схлопыванию ОПЗЛ.



1 – граница раздела областей (ГРО) ОПЗЛ и ОПЗ с высокой концентрацией электронов, 2 – ГРО ОПЗ с высокой концентрацией дырок и ОПЗЛ, 3 – контактная разность потенциалов ( $a$ ) или толщина ОПЗ в приближении модели Шоттки ( $b$ ), 4 – граница инверсии типа проводимости, 5 – граница возможности линейного разложения статистики носителей

Рис. 1. Результаты моделирования:  $a$  – зависимость потенциального профиля от приложенного напряжения,  $b$  – зависимость координатного профиля от приложенного напряжения

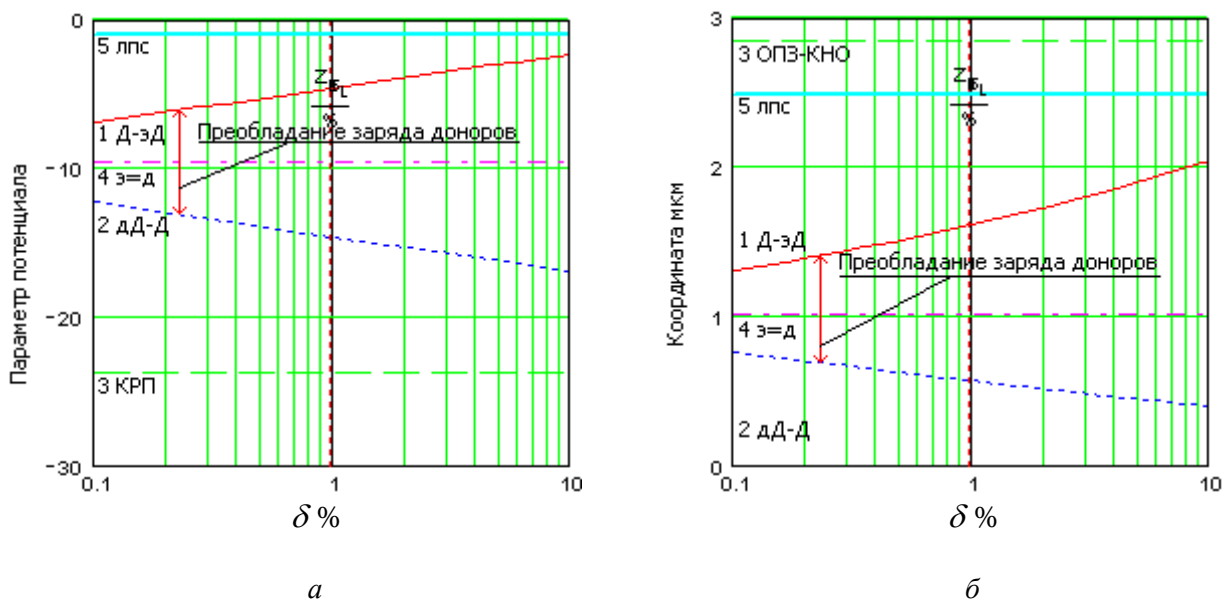


Рис. 2. Результаты моделирования:  $a$  – зависимость потенциального профиля от степени обеднения области ионизированных доноров, %,  $b$  – зависимость координатного профиля от степени обеднения области ионизированных доноров, %, обозначения аналогичны рис. 1

Зависимость потенциального профиля от степени обеднения области ионизированных доноров (рис. 2,  $a$ ) показывает зависимость потенциалов границ областей обогащенных подвижными носителями от степени обеднения области ионизированных доноров (ОПЗЛ), которые увеличиваются строго за счет уменьшения перепада потенциалов на области преобладания заряда ионизированных доноров. В традиционной практике применяется 10 %-ная степень обеднения ОПЗЛ. Зависимость координатного профиля от степени обеднения ОПЗЛ (рис. 2,  $b$ ) имеет вид, аналогичный зависимости (рис. 2,  $a$ ). Изменение размера ОПЗЛ от степени обеднения и ее рост происходит только за счет изменения размера областей с высокими концентрациями подвижных носителей.

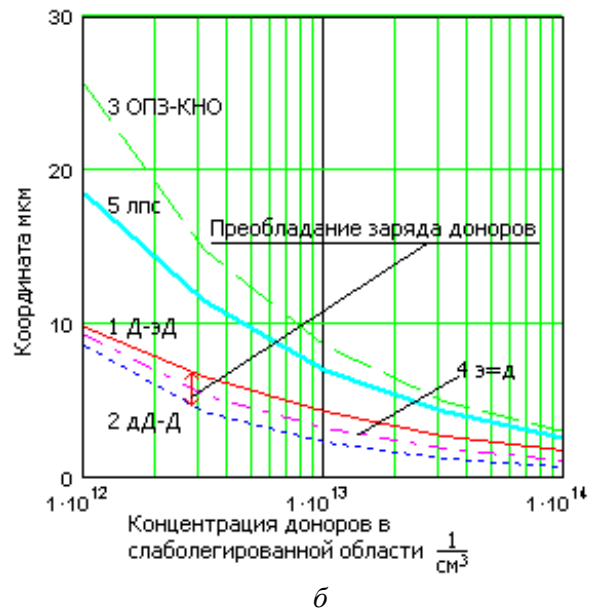
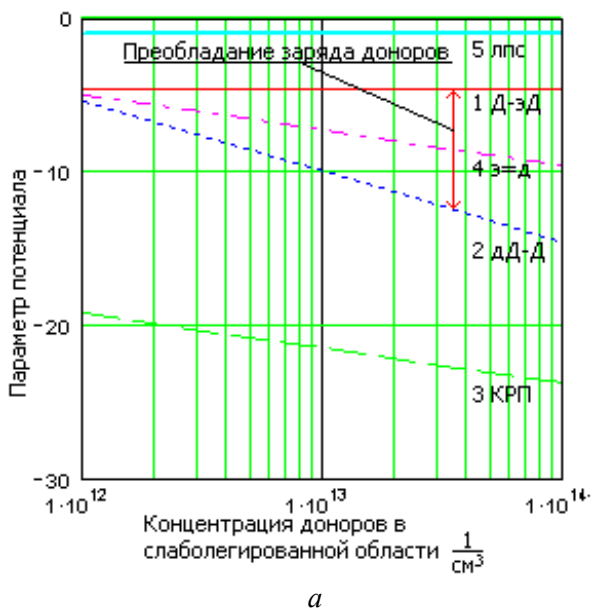


Рис. 3. Результаты моделирования: *a* – зависимость потенциального профиля от концентрации доноров, *б* – зависимость координатного профиля от концентрации доноров, обозначения аналогичны рис. 1

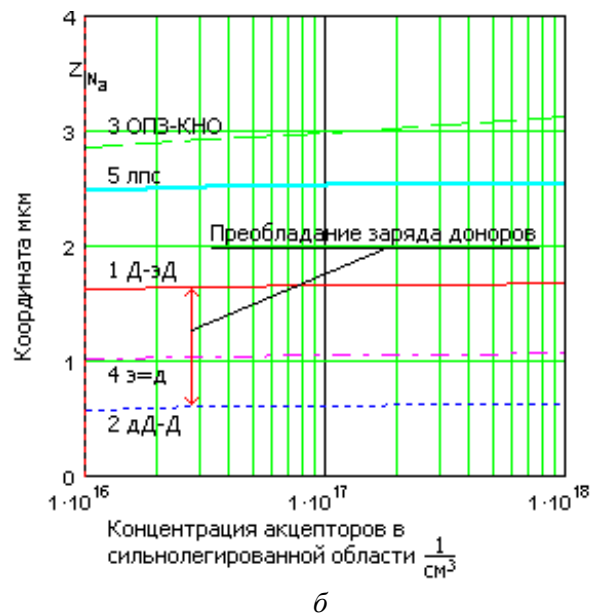
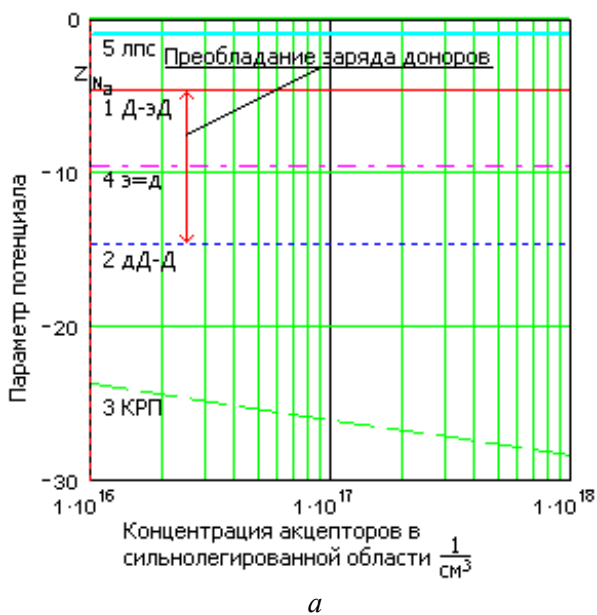


Рис. 4. Результаты моделирования: *a* – зависимость потенциального профиля от концентрации акцепторов сопряженной области, *б* – зависимость координатного профиля от концентрации акцепторов сопряженной области, обозначения аналогичны рис. 1

Зависимость толщины областей от уровня легирования донорами слаболегированной области (рис. 3, *б*), показывает, что с увеличением уровня легирования донорной области толщина ОПЗЛ сначала увеличивается, а затем уменьшается.

Зависимость потенциального профиля от концентрации акцепторов (рис. 4, *a*) показывает, что от концентрации акцепторов зависит только контактная разность потенциалов, а характеристики обедненной области не подвержены влиянию концентрации акцепторов высоколегированной области.

Зависимость координатного профиля от концентрации акцепторов высоколегированной области (рис. 4, *б*) демонстрирует незначительное изменение от концентрации акцепторов.

## **Выводы**

Для резко асимметричного ППП с базовой, низколегированной донорной областью, в приближении малых токов предложена методика точного (формального) определения области преобладания заряда легирующей примеси (ОПЗЛ). Модель полупроводникового перехода, построенная на предложенном способе определения ОПЗЛ, хорошо детализирует структуру ПП перехода и предсказывает эффекты, возникающие в низколегированной базе ППП.

На основе предложенной модели можно сделать выводы, отличные от модели Шоттки, но адекватно описывающие действительность:

- явное выделение подобластей ППП и расчет их размеров (в потенциальном и координатном представлении);

- выявлен максимум в зависимости толщины обедненной области ОПЗЛ от уровня легирования базовой области, что находится в противоречии с моделью Шоттки, однако в полном согласии с действительной;

- точное определение напряжения исчезновения обедненной области ППП через характеристику напряжения схлопывания. Показана его независимость от уровня легирования сильно легированной области, несовпадение с контактной разностью потенциалов, как в модели Шоттки;

Результаты данной работы могут быть использованы в следующих направлениях:

- улучшение аналитической оценки тока рекомбинации в области пространственного заряда;

- определение предельных значений напряжений, прикладываемых к ППП;

- улучшение расчетных формул емкостных характеристик ППП;

- методическое основание для углубленного изложения структуры ППП.

### **Список литературы:**

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников. Москва : Энергия, 1978. 416 с.
2. Киреев П. С. Физика полупроводников. Москва : Высш. шк., 1975. 586 с.
3. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1 ; пер. с англ. Москва : Мир, 1984. 456с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 07.03.2018*