

**Илюхин Александр Алексеевич** – Таганрогский государственный педагогический институт имени А.П. Чехова; e-mail: aleilyukhin@yandex.ru; 347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: 89043465321; кафедра математического анализа; зав. кафедрой, д.ф.-м.н.; профессор.

**Попов Алексей Константинович** – e-mail: ASDAlexey@yandex.ru; тел.: 89526058875; кафедра математического анализа; аспирант.

**Pyukhin Alexander Alexeyevich** – Anton Chekhov Taganrog State Pedagogical Institute; e-mail: aleilyukhin@yandex.ru; 48, Initiative street, Taganrog, 347936, Russia; phone: +79043465321; department of mathematical analysis; head of the department, dr. of phys.-math. sc.; professor.

**Popov Alexey Konstantinovich** – e-mail: ASDAlexey@yandex.ru; phone: +79526058875; department of mathematical analysis; postgraduate studies.

УДК 681.586.72:543.27.08

**С.А. Богданов**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТОВ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ**

*Предложена математическая модель и проведено моделирование влияния многозарядных примесных центров на вольт-амперные характеристики контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки. Разработанная математическая модель учитывает квантово-механические эффекты при переносе носителей заряда в контактах металл-полупроводник с барьером Шоттки и позволяет прогнозировать их вольт-амперные характеристики. Результаты моделирования хорошо согласуются с известными из литературы экспериментальными данными. Разработанная математическая модель может быть использована в системах автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем.*

*Диод Шоттки; потенциал; уравнение Пуассона; вольт-амперная характеристика.*

**S.A. Bogdanov**

**THE SIMULATION OF MULTIPLE-CHARGE CENTERS INFLUENCE ON VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF METAL-SEMICONDUCTOR JUNCTIONS WITH SCHOTTKY BARRIER**

*The mathematical model and the simulation of the multiple-charge centers influence on metal-semiconductor junctions with Schottky barrier volt-ampere characteristics are made in this work. The developed mathematical model takes into account quantum mechanical effects during the charge carriers transfer in metal-semiconductor junctions with Schottky barrier and allows forecasting their volt-ampere characteristics. The simulation results meet the experimental data from famous literary sources. The developed mathematical model can be used in computer aided design of integrated circuits elements.*

*Schottky diode; potential; Poisson equation; volt-ampere characteristic.*

Необходимость моделирования технологических процессов и приборов обусловлена сложностью протекающих физических процессов, их многомерностью, нестационарным и неравновесным характером. Кроме того, с переходом к нанометрическим размерам резко усилилась взаимосвязь между электрофизическими характеристиками элементов твердотельной электроники и технологическими режимами их производства. Очевидно, что математическое моделирование элементов и технологических процессов сверх- и ультрабольших интегральных схем становится той областью, где достижения фундаментальных наук дают непосредственный экономический эффект.

Характеристики областей пространственного заряда (ОПЗ) в структурах твердотельной электроники, сформированных на основе полупроводника с глубокими энергетическими уровнями (ГУ), могут иметь существенные особенности, обусловленные перераспределениями носителей заряда. Это требует учета влияния ГУ при моделировании электрофизических характеристик структур твердотельной электроники, изготовленных на основе такого материала.

Целью работы является разработка математической модели и моделирование влияния многозарядных примесных центров на вольт-амперные характеристики контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки.

В зависимости от характера прохождения носителей заряда через ОПЗ полупроводника существующие теории выпрямления разделяются на диодные и диффузионные [1]. В диодных теориях предполагается, что носители заряда проходят через ОПЗ полупроводника практически без столкновений, т.е. длина свободного пробега электронов намного больше ширины ОПЗ полупроводника. В диффузионных теориях предполагается, что длина свободного пробега электрона намного меньше ширины ОПЗ полупроводника и прохождение носителя заряда через ОПЗ определяется его взаимодействием с решеткой. В первом случае для нахождения тока без участия поверхностных электронных состояний в контакте необходимо вычислить разность термоэмиссионных токов, протекающих из металла в полупроводник и из полупроводника в металл, во втором случае следует решать диффузионно-дрейфовое уравнение для ОПЗ полупроводника.

В работе [1], в предположениях диодной, а также диффузионной теорий при пренебрежении силами изображения и туннельным эффектом через ОПЗ полупроводника, а также без учета тока через поверхностные энергетические состояния, получено уравнение ВАХ контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки, при наличии диэлектрического зазора:

$$I = I_S \left( \exp\left(\frac{qU_2}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{qU_1}{kT}\right) \right), \quad (1)$$

где ток  $I_S = A_R T^2 D^* S \exp\left(-\frac{q\phi_{bm}}{kT}\right)$ , в котором  $A_R$  – постоянная Ричардсона;

$S$  – площадь контакта;  $D^*$  – эффективный коэффициент прозрачности диэлектрического зазора, величина которого зависит от применяемой теории выпрямления;  $U_1, U_2$  – величины падений напряжения в диэлектрическом зазоре и ОПЗ полупроводника соответственно, причем приложенное к диоду напряжение  $U = U_1 + U_2$ ,  $\phi_{bm}$  – высота потенциального барьера со стороны полупроводника, остальные обозначения общеприняты.

При толщине диэлектрического зазора, равной нулю, когда  $U_1 \rightarrow 0$ ,  $U_2 \rightarrow U$ ,  $D^* \rightarrow 1$  выражение (1) сводится к известному частному виду для тесного контакта:

$$I = I_S \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right). \quad (2)$$

Приведенные уравнения не позволяют учитывать квантово-механические эффекты, возникающие при переносе носителей заряда сквозь ОПЗ в контактах металл-полупроводник с барьером Шоттки. В связи с этим в работах [2, 3] предложено выражение для плотности тока через диод, учитывающее квантово-механические эффекты:

$$J = \frac{4\pi q m^* kT}{h^3} \int_0^{\infty} D(E) \cdot \ln \left( \frac{1 + \exp\left(\frac{E_c - E_f - E}{kT}\right)}{1 + \exp\left(\frac{E_c - E_f - E + qU}{kT}\right)} \right) dE, \quad (3)$$

где  $m^*$  – эффективная масса электронов в зоне проводимости;  $h$  – постоянная Планка;  $D(E)$  – коэффициент прозрачности потенциального барьера  $\varphi(x)$  в ОПЗ контакта металл-полупроводник, зависящий от энергии электронов  $E$ .

Моделирование распределения потенциала  $\varphi(x)$  в контактах металл-полупроводник с барьером Шоттки с учетом неоднородного распределения электрически активных примесей в объеме полупроводника, краевых эффектов, глубоких энергетических уровней, обусловленных одно- и многозарядными примесными центрами, может быть осуществлено на основе решения уравнения Пуассона [4–6].

Зависимость коэффициента прозрачности  $D(E)$  потенциального барьера в ОПЗ контакта металл-полупроводник от энергии электронов  $E$  в первом приближении, может быть рассчитана с помощью стационарного уравнения Шредингера

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m^*}{h^2} (E - q\varphi(x))\psi = 0 \quad (4)$$

с граничными условиями

$$\psi(0_-) = \psi(0_+) \text{ и } \left. \frac{d\psi}{dx} \right|_{x=0_-} = \left. \frac{d\psi}{dx} \right|_{x=0_+},$$

где  $\psi$  – волновая функция. Решив (4) для  $\varphi(x)$ , соответствующего напряжению смещения  $U$ , приложенного к контакту металл-полупроводник, можно определить  $D(E)$  в виде отношения квадрата амплитуды волновой функции электрона, прошедшего потенциальный барьер  $\max\{\psi(x), x \rightarrow \infty\}$ , к квадрату амплитуды волновой функции электрона, налетающего на потенциальный барьер  $\max\{\psi(x), x \rightarrow -\infty\}$ :

$$D(E) = \left( \frac{\max\{\psi(x), x \rightarrow \infty\}}{\max\{\psi(x), x \rightarrow -\infty\}} \right)^2. \quad (5)$$

Рассмотрим трехзарядную акцепторную примесь в кремнии. Такие примесные центры могут находиться в четырех состояниях: нейтральном, однократно, двукратно и трехкратно отрицательно заряженном. При этом значения концентраций центров разной зарядовости, соответственно, определяются выражениями [6]:

$$\begin{aligned} N_0 &= N(1-f_1) \left( 1 - \frac{f_1 f_2}{1-f_2+f_1 f_2} \right) \left( 1 - \frac{f_1 f_2 f_3}{(1-f_2)(1-f_3)+f_1 f_2} \right), \\ N_1 &= N \cdot f_1 \left( 1 - \frac{f_1 f_2}{1-f_2+f_1 f_2} \right) \left( 1 - \frac{f_1 f_2 f_3}{(1-f_2)(1-f_3)+f_1 f_2} \right), \\ N_2 &= \frac{N \cdot f_1 f_2}{1-f_2+f_1 f_2} \left( 1 - \frac{f_1 f_2 f_3}{(1-f_2)(1-f_3)+f_1 f_2} \right), \\ N_3 &= \frac{N \cdot f_1 f_2 f_3}{(1-f_2)(1-f_3)+f_1 f_2}, \end{aligned}$$

где  $f_1, f_2, f_3$  – вероятности заполнения электронами энергетических уровней  $E_{t1}, E_{t2}$  и  $E_{t3}$  соответственно. В первом приближении вероятность  $f_i$  заполнения электронами  $i$ -го энергетического уровня  $E_{ti}$  можно оценить выражением

$$f_i = f(E_{ti}, \varphi) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_c - E_{ti} - E_f - q\varphi}{kT}\right)}.$$

Проведем моделирование вольт-амперной характеристики контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки. Распределение потенциала  $\varphi(x)$  в кремнии, легированном фосфором с концентрацией  $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , при наличии в нем трехзарядной акцепторной примеси с концентрацией  $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и энергетическими положениями ГУ  $E_{t1} = E_c - 0,2 \text{ эВ}$ ,  $E_{t2} = E_c - 0,3 \text{ эВ}$ ,  $E_{t3} = E_c + 0,4 \text{ эВ}$ , определим, решив уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p - n + N_d - N_1 - 2N_2 - 3N_3), \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $p, n$  – концентрации свободных дырок и электронов соответственно. В качестве граничных условий примем  $\varphi(0) = -0,32 \text{ В}$ ,  $\varphi(W) = 0$ , где  $W$  – ширина ОПЗ. Концентрации свободных носителей зарядов, а также ионизированных атомов мелкой донорной примеси в невырожденном полупроводнике можно определить, используя известную методику [7].

Определив из (6)  $\varphi(x)$ , используя соотношения (4), (5) и (3), получим вольт-амперную характеристику контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки, изображенную на рис. 1 (кривая 1). Кривая 2 на рис. 1 соответствует вольт-амперной характеристике контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки, рассчитанной для случая без ГУ и многозарядной примеси в полупроводнике. Как видно из рисунка, ГУ приводят к уменьшению тока через контакт металл-полупроводник, как за счет снижения концентрации носителей заряда, так и за счет увеличения ширины ОПЗ.

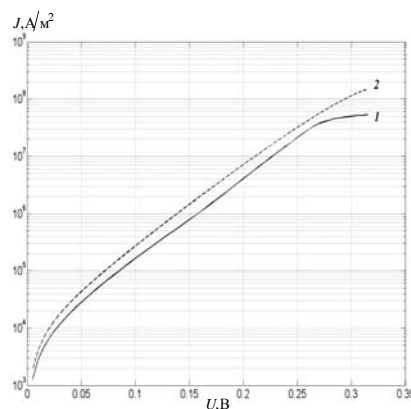


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет прогнозировать вольт-амперные характеристики контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки, с учетом многозарядных примесных центров, формирующих в запрещенной зоне полупроводника глубокие энергетические уровни. Результаты моделирования хорошо согласуются с известными из литературы экспериментальными данными. Разработанная математическая модель может быть использована в системах автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский И.А.* Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. – М.: Советское радио, 1974. – 248 с.
2. *Король А.Н., Носенко И.В.* Резко нелинейная вольт-амперная характеристика структуры с квантовой ямой, встроенной в обедненный слой барьера Шоттки // Физика и техника полупроводников. – 2010. – № 4. – С. 497–500.
3. *Ремнев М.А., Катеев И.Ю., Елесин В.Ф.* Влияние спейсерных слоев на вольт-амперные характеристики резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. – 2010. – № 8. – С. 1068–1073.
4. *Богданов С.А., Захаров А.Г., Котов В.Н.* Моделирование распределения потенциала в барьерах Шоттки транзистора с металлической базой // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 4. – С. 45–47.
5. *Богданов С.А., Захаров А.Г., Лытюк А.А.* Моделирование распределения потенциала в барьерах Шоттки с учетом краевых эффектов // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 5. – С. 12–15.
6. *Богданов С.А., Захаров А.Г., Писаренко И.В.* Влияние многозарядных примесных центров на распределение потенциала в приповерхностной области полупроводника [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1530> (доступ свободный) – Загл. с экрана.
7. *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 656 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

**Богданов Сергей Александрович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: bogdanov\_sa@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371663; кафедра физики; к.т.н.; доцент.

**Bogdanov Sergey Aleksandrovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: bogdanov\_sa@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.315.2/075.8

**М.Н. Дубяго**

#### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ С МНОЖЕСТВОМ ВКЛЮЧЕНИЙ**

*Рассмотрены вопросы создания системы прогнозирования остаточного ресурса изоляции силовых кабельных линий. Особое внимание уделено анализу неразрушающих методов испытаний изоляции и определения остаточного ресурса кабельных изделий в условиях эксплуатации. Показано, что применяемые ранее методы диагностики ненадежны, так как неизвестны точные соотношения между результатами испытаний и основными процессами в электрической изоляции кабелей. Целью данной работы является повышение эффективности методов диагностики изоляции, не сокращающих срока ее службы.*

*Диагностика изоляции; неразрушающий метод; частичные разряды.*