

УДК 621.382.22

А.Г. Захаров, С.А. Богданов, А.А. Лытюк

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В БАРЬЕРАХ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ
СОЕДИНЕНИЯ $Si_{1-x}Ge_x$**

В работе приводятся результаты моделирования распределения потенциала в области пространственного заряда полупроводника наноконтакта металл- $Si_{1-x}Ge_x$. Моделирование проводилось с учетом особенностей распределения электрически активных примесей в полупроводнике. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и производстве высокоскоростной элементной базы на основе нанометрических гетероструктур и сенсоров физических величин с улучшенными значениями отдельных параметров.

Полупроводниковое соединение $Si_{1-x}Ge_x$; уравнение Пуассона; планарный контакт; краевые эффекты; цилиндрический контакт; сферический контакт; ионная имплантация; распределение примеси; закон Гаусса.

A.G. Zakharov, S.A. Bogdanov, A.A. Lytyuk

**POTENTIAL DISTRIBUTION IN SHOTTKY BARRIERS ON BASIS
OF $Si_{1-x}Ge_x$**

Simulation of potential distribution in semiconductor space-charge region of metal- $Si_{1-x}Ge_x$ nanocontact is presented. Characteristics of electrically active impurities distribution in semiconductor are taken into account in simulation. Results of work could be used in designing and manufacturing of very high speed electronics based on nanometrical heterostructures and sensors with improved values of certain parameters.

Semiconductor compound $Si_{1-x}Ge_x$; Poisson equation; planar contact; edge effects; cylindrical contact; spherical contact; ion implantation; Gauss principal; impurity distribution.

Совершенствование технологии формирования тонких пленок, отличающихся высокой повторяемостью электрофизических свойств, позволяет сосредоточить внимание на исследовании гетероструктур, способных стать основой для создания новых элементов твердотельной электроники. При этом особый интерес вызывают контакты металл-полупроводник, в которых используются многокомпонентные полупроводниковые материалы, обладающие некоторыми особенностями электрофизических свойств. К числу таких полупроводников можно отнести соединение $Si_{1-x}Ge_x$, основными отличиями которого являются возможность существенного варьирования величины запрещенной зоны путем изменения состава соединения, а также относительно высокая подвижность дырок в $Si_{1-x}Ge_x$ p-типа проводимости по сравнению с подвижностью дырок в кремнии. Кроме того, следует отметить совместимость технологии изготовления интегральных микросхем на его основе с кремниевой КМОП-технологией.

Целью настоящей работы является моделирование распределения потенциала в области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника наноконтакта металл- $Si_{1-x}Ge_x$ с учетом особенностей распределения электрически активных примесей.

Моделирование распределения потенциала φ проводилось на основе уравнения Пуассона:

$$\operatorname{div} (\varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{grad} (\varphi)) = -\rho (\varphi), \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ε_0 – электрическая постоянная;

$\rho(\varphi)$ – объемная плотность зарядов в ОПЗ.

При моделировании использовались следующие приближения:

- ◆ отсутствие промежуточного диэлектрического слоя между металлом и полупроводником, а также изотропность относительной диэлектрической проницаемости полупроводника;
- ◆ отсутствие зарядовых состояний на границе раздела металл-полупроводник;
- ◆ отсутствие ионизированных глубоких уровней в ОПЗ полупроводника.

Решение (1) осуществлялось численно, методом конечных разностей [1], по методике, изложенной в [2]. Для оценки адекватности используемого численного метода проверка разностной схемы предварительно осуществлялась на известном аналитическом решении (1) [3]. При этом рассматривался невырожденный полупроводник с одним типом однозарядной легирующей примеси, распределенной равномерно.

Объектами моделирования распределения потенциала являлись контакты Ni-Si_{0,7}Ge_{0,3} n-типа проводимости и Al-Si_{0,8}Ge_{0,2} p-типа проводимости, величины высот барьеров Шоттки которых равны соответственно 0,671 эВ и 0,575 эВ [4,5]. В качестве донорной примеси рассматривался фосфор, акцепторной – бор, при этом величины их концентраций считались недостаточными для вырождения. Распределение потенциала рассчитывалось относительно дна зоны проводимости для контакта n-типа и потолка валентной зоны для контакта p-типа. Результаты моделирования планарного контакта Ni-Si_{0,7}Ge_{0,3} представлены на рис. 1 (кривая 1).

Реальные контакты, как правило, имеют отличную от нуля кривизну границы раздела, что приводит к возникновению краевых эффектов, особенно заметных в случае малых размеров контакта. Возникающее при этом распределение потенциала в ОПЗ полупроводника может иметь существенные отличия от соответствующего распределения для планарного контакта.

Моделирование влияния краевых эффектов на распределение потенциала в ОПЗ, в первом приближении, проводилось для следующих конфигураций контактов [6]: металлические сфера и бесконечный цилиндр, помещенные в полупроводник. При решении (1) в каждом случае выбиралась соответствующая система координат.

Результаты моделирования распределения потенциала в ОПЗ полупроводника контактов Ni-Si_{0,7}Ge_{0,3} различной конфигурации при $N_d = const$ представлены на рис. 1. Видно, что влияние краевых эффектов может приводить к существенному уменьшению ширины ОПЗ в полупроводнике, и, таким образом, влиять на явления переноса носителей заряда в структуре металл-Si_{1-x}Ge_x, а также емкостные свойства контакта.

Для получения тонких легированных слоев широко используется метод ионного легирования, позволяющий вводить в полупроводник ионы различных химических элементов и получать требуемые величины и заданные распределения концентрации [7]. Профиль внедренных ионов по глубине полупроводника может быть приблизительно оценен с помощью функции распределения Гаусса [8]:

$$N(x) = \frac{Q}{\Delta R_p \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - R_p)^2}{2 \Delta R_p^2}\right), \quad (2)$$

где x – глубина от поверхности мишени;

Q – количество легирующих ионов на единицу площади;

R_p – средняя величина проекции пробега ионов;

ΔR_p – среднее нормальное отклонение проекции пробега.

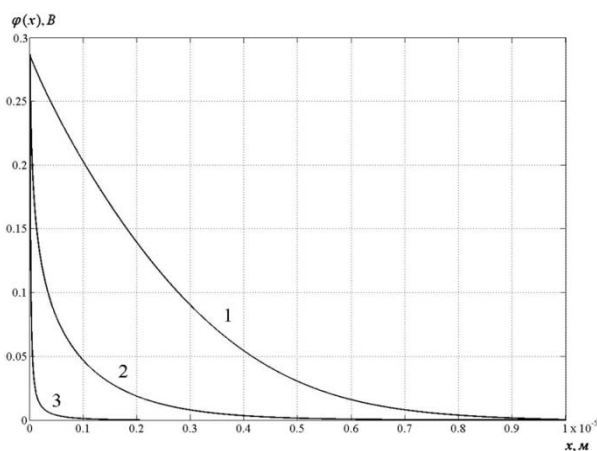


Рис. 1. Распределения потенциала в ОПЗ контактов $Ni-Si_{0.7}Ge_{0.3}$ различной конфигурации при концентрации легирующей примеси $N_d = 10^{13} \text{ см}^{-3}$: 1 – планарный контакт; 2 – цилиндрический контакт; 3 – сферический контакт)

Будем считать, что ионы имплантируют в однородно легированный полупроводник ($N_0 = 10^{13} \text{ см}^{-3}$), профиль распределения внедренных атомов изменяется незначительно после термообработки, эффект каналирования отсутствует. Литературные данные свидетельствуют об уменьшении длины пробега ионов легирующей примеси в полупроводниковом соединении $Si_{1-x}Ge_x$ по сравнению с кремнием [9] до 25 %, что учитывалось при моделировании.

Наибольший интерес, с точки зрения моделирования влияния краевых эффектов представляет контакт сферической формы [6], поэтому численное моделирование в дальнейшем осуществлялось для данных конфигураций контактов на основе структур $Ni-Si_{0.7}Ge_{0.3}$ и $Al-Si_{0.8}Ge_{0.2}$. На рис. 2 представлены результаты моделирования распределений потенциала в ОПЗ сферического контакта $Al-Si_{0.8}Ge_{0.2}$ для случая распределения легирующей примеси по закону Гаусса при $Q = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и различных значениях средней величины проекции пробега ионов бора.

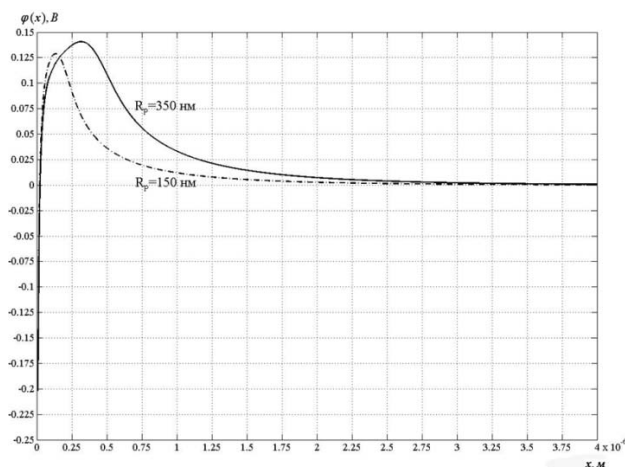


Рис. 2. Распределения потенциала в ОПЗ сферического контакта $Al-Si_{0.8}Ge_{0.2}$ (распределение примеси по закону Гаусса)

Сравнительный анализ результатов моделирования (см. рис.1 и рис. 2) указывает на существенное влияние неоднородного легирования полупроводника на форму распределения потенциала, которая, в свою очередь, может влиять как на емкостные свойства контактов металл– $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, так и на генерационно-рекомбинационные процессы, протекающие в ОПЗ полупроводника таких контактов.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и производстве быстродействующей элементной базы на основе нанометрических гетероструктур, а также сенсоров физических величин с улучшенными значениями отдельных параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Турчак Л.И., Плотников П.В. Основы численных методов: Учебное пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 304 с.
2. Захаров А.Г., Котов В.Н., Богданов С.А. Моделирование распределения потенциала в барьерах Шоттки транзистора с металлической базой // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 4.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн.1 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
4. Das R. et al. Studies on the electrical characteristics of Ni and NiPt-alloy silicided Schottky diodes // Proceedings of the XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science in New Delhi. October, 2005.
5. Jiang R.L. et al. Properties of Schottky contact of Al on SiGe alloys // Appl.Phys.Lett., vol.68, No.8, February, 1996.
6. Востоков Н.В., Шашкин В.И. Электрические свойства наноконтактов металл–полупроводник // Физика и техника полупроводников. – 2004. Т. 38. Вып. 9. – С. 1084-1088.
7. Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников (кремний и германий) / Пер. с англ./Под ред. Гусева В.М. – М.: Мир, 1973. – 296 с.
8. Пирс К. и др. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн.1.Пер. с англ. / Под ред. С.Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
9. Wittmann R., Hössinger A., Selbeherr S. Monte-Carlo simulation of ion implantation in silicon-germanium alloys / Proceedings ESS.1, 35, 2003.

Захаров Анатолий Григорьевич

Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: Zakharov@egf.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371663.

Богданов Сергей Александрович

E-mail: bogdanov_sa@mail.ru.

Лытук Александр Анатольевич

E-mail: realspolock@gmail.com.

Zakharov Anatoliy Grigorievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: Zakharov@egf.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371663.

Bogdanov Sergey Aleksandrovich

E-mail: bogdanov_sa@mail.ru.

Lytyuk Aleksandr Anatolievich

E-mail: realspolock@gmail.com.