

Влияние электрического поля контакта с барьером Шоттки на перераспределение примесных атомов в полупроводнике

С.А. Богданов, А.Г. Захаров, И.В. Писаренко

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

Миниатюризация активных элементов современных интегральных схем (ИС) неразрывно связана с совершенствованием технологических операций их формирования. При переходе к топологическим размерам элементов ИС порядка десятков нанометров возникают задачи целенаправленного формирования воспроизводимых профилей распределения легирующих примесей, с целью совершенствования и разработки новой элементной базы твердотельной электроники на основе наноразмерных гетероструктур [1].

Развитие методов исследования структур твердотельной электроники, разработка и изготовление контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки для терагерцовых применений – стимулируют исследователей к изучению и оптимизации свойств контактов металл-полупроводник малых размеров. Электрофизические свойства и характеристики контактов металл-полупроводник, такие как высота барьера Шоттки и контактная разность потенциалов, распределение потенциала в приповерхностной области полупроводника, напряжение пробоя и емкость, а также последовательное и дифференциальное сопротивление диода, частота отсечки и интенсивность отказов во многом определяются свойствами границы раздела металл-полупроводник, наличием в полупроводнике дефектов кристаллического строения [2].

В приближении полного обеднения в работе [3] проведены расчеты распределения потенциала в полупроводнике вокруг сферических и цилиндрических наноконтактов. Показано, что наноконтакты имеют слабую

зависимость емкости от напряжения, большее, чем в плоском случае, снижение высоты барьера Шоттки за счет сил изображений, а также малую инерционность отклика до частот терагерцового диапазона. В работе [4] рассмотрено влияние краевых эффектов, связанных в основном с конечными размерами металлического электрода, на распределение потенциала в контакте металл-полупроводник. Предложенная авторами методика определения электростатического потенциала в полупроводниковом материале контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки, основана на численном решении уравнения Пуассона в трехмерной системе координат. Приведенная в [5] модель процесса деградации контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки, основанная на совместном решении уравнений Пуассона и диффузии позволяет оценить время наработки на отказ при постепенном отказе диодов Шоттки.

В настоящее время существует ряд контролируемых методов изменения концентрации легирующих примесей в приповерхностной области полупроводника [6]: эпитаксиальное выращивание, диффузия, разделение примесей на границе полупроводник – внешняя фаза за счет геттерирования внешней фазой (испарения, термического окисления), ионная имплантация и др.

Целью настоящей работы является моделирование процесса перераспределения атомов электрически активных примесей в электрическом поле области пространственного заряда диода Шоттки, а также исследование возможности целенаправленного изменения их концентрации в приповерхностной наноразмерной области полупроводника.

Рассмотрим контакт металл-кремний n-типа проводимости. Как и в [5] будем считать, что на границах раздела полупроводник-среда отсутствуют зарядовые состояния, свойства полупроводника изотропны, между полупроводником и металлическим электродом отсутствует слой диэлектрика, а также не будем учитывать влияние электрических сил изображения на распределение потенциала в области пространственного

заряда полупроводника. Тогда процесс перераспределения атомов однозарядных электрически активных примесей в электрическом поле области пространственного заряда (ОПЗ) контакта металл-полупроводник можно описать с помощью системы уравнений – уравнений диффузии в электрическом поле [7-9] и уравнения Пуассона:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_d}{\partial t} = D_d \left[\frac{\partial^2 N_d}{\partial x^2} + \frac{q}{kT} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(N_d \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right) \right], \\ \frac{\partial N_a}{\partial t} = D_a \left[\frac{\partial^2 N_a}{\partial x^2} - \frac{q}{kT} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(N_a \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right) \right], \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon_0} (p - n + N_d - N_a), \end{cases} \quad (1)$$

где N_d , N_a – концентрации ионизированных атомов донорной и акцепторной примесей соответственно; D_d , D_a – их коэффициенты диффузии; q – элементарный заряд; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана; φ – распределение потенциала в ОПЗ контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки; ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника; n , p – концентрации свободных носителей заряда электронов и дырок соответственно.

Концентрации свободных носителей зарядов, а также ионизированных атомов однозарядных донорной и акцепторной примесей определяются известным образом [10, 11]. При наличии в полупроводнике многозарядных примесных центров, формирующих в запрещенной зоне полупроводника несколько глубоких энергетических уровней (ГУ), для определения их степени ионизации следует использовать методику, рассмотренную в [2], определив положение уровня Ферми в объеме полупроводника из условия электронейтральности

$$n - p = -N_a + N_d. \quad (2)$$

При моделировании в широком диапазоне температур необходимо учитывать температурные зависимости коэффициентов диффузии примесей

$D(T)$ и ширины запрещенной зоны полупроводника $E_g(T)$, которая для кремния описывается следующей эмпирической зависимостью [10]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (3)$$

где: $\alpha = 4,73 \cdot 10^{-4}$ эВ·К⁻¹, $\beta = 636$ К – коэффициенты; $E_g(0) = 1,17$ эВ – ширина запрещенной зоны при 0 К.

Моделирование перераспределения атомов электрически активных примесей в электрическом поле области пространственного заряда контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки проведем для случая электродиффузии атомов фосфора в кремнии. Будем считать, что распределение фосфора в кремнии описывается функцией Гаусса [12], которой часто аппроксимируют распределение примеси при ионной имплантации:

$$N_d(x) = N_0 + \frac{Q}{q \cdot \Delta R_p \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - R_p)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2}\right), \quad (4)$$

где: Q – доза легирования; R_p – средний проективный пробег ионов; ΔR_p – стандартное отклонение; N_0 – первоначальная концентрация примеси.

Примем $Q = 2,5 \cdot 10^{-6}$ мкКл/см², $R_p = 100$ нм, $\Delta R_p = 30$ нм, $N_0 = 10^{13}$ см⁻³.

Концентрационные профили распределения фосфора в кремнии приведены на рис. 1., на рис. 2 они же в приповерхностной наноразмерной области полупроводника. На рисунках: кривая 1 – исходное распределение атомов фосфора, рассчитанное по (6); кривая 2 – распределение атомов фосфора, полученное на основе решения (1), для температуры полупроводника $T = 1073$ К, времени диффузии 15 минут при величине потенциала на поверхности полупроводника $\varphi_s = -0,1$ В; кривая 3 – распределение атомов фосфора, полученное на основе решения (1), для температуры полупроводника $T = 1073$ К, времени диффузии 30 минут при величине потенциала на поверхности полупроводника $\varphi_s = -0,1$ В; кривая 4 –

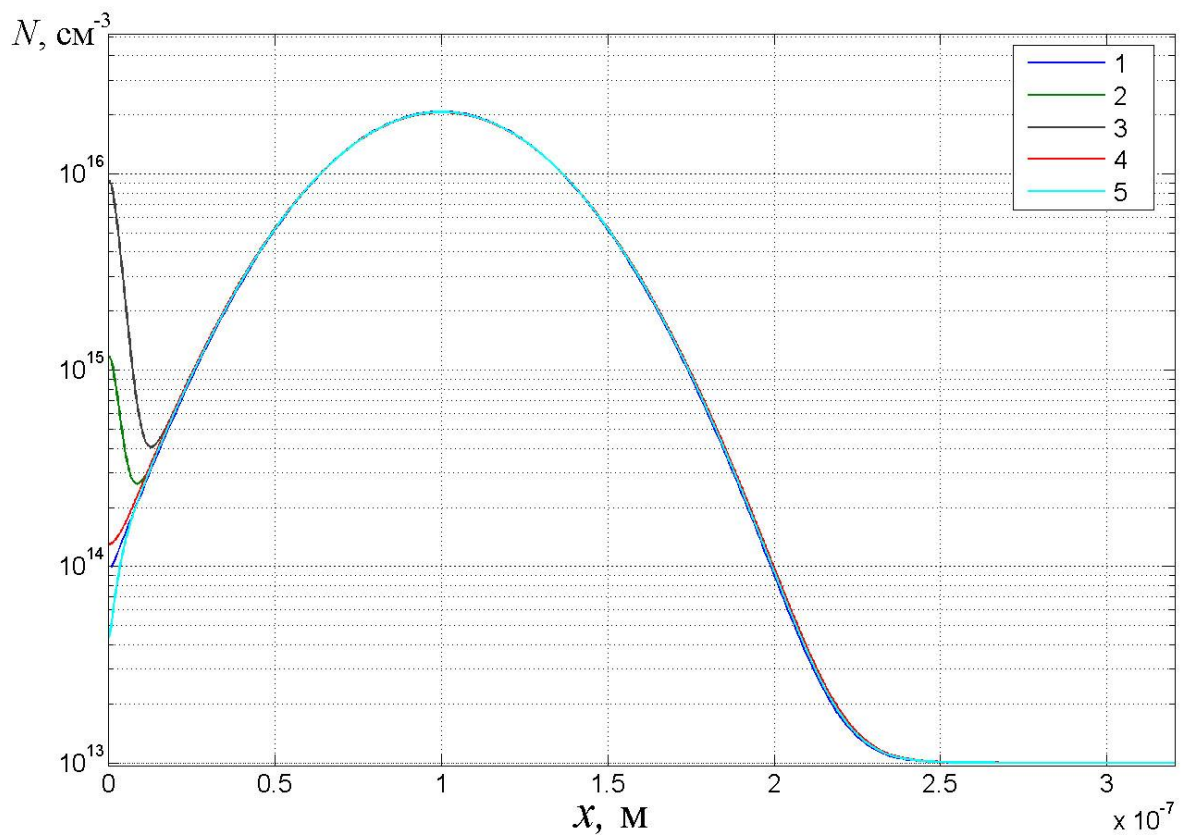


Рис. 1. Концентрационные профили распределения фосфора в кремнии

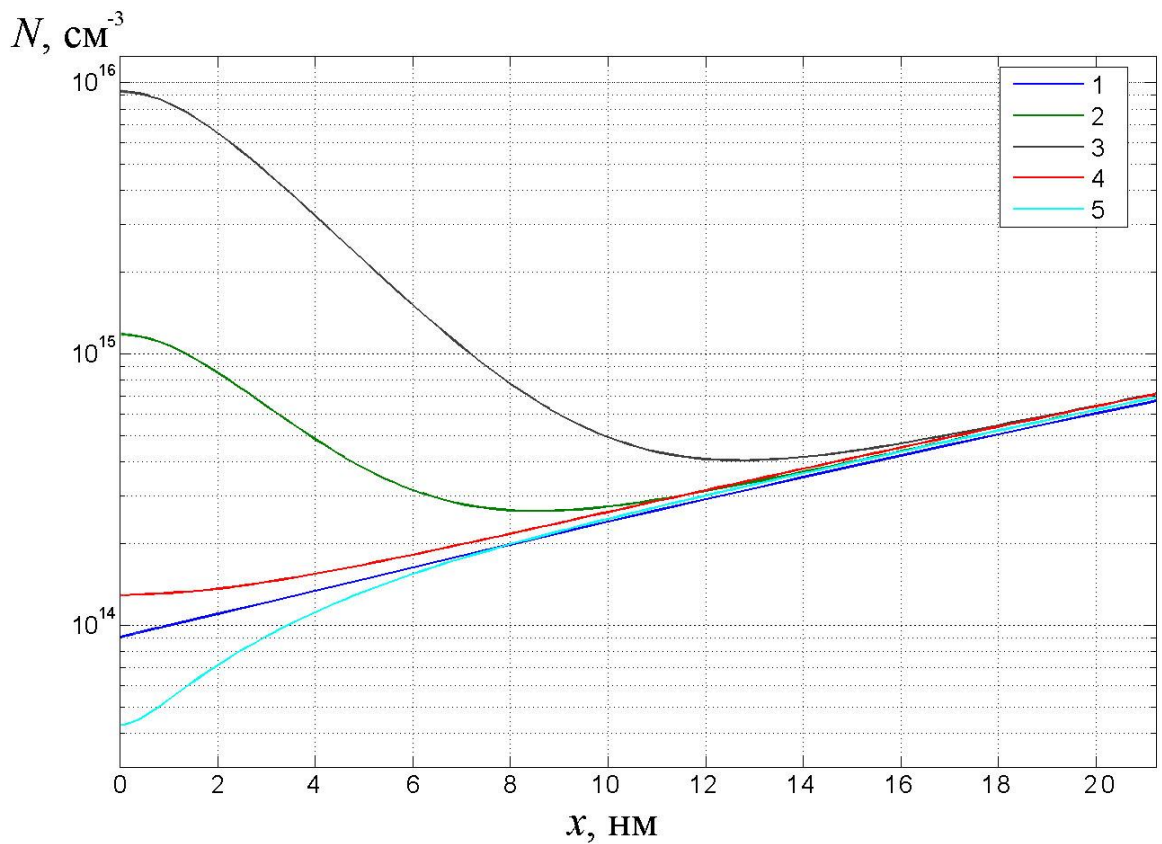


Рис. 2. Концентрационные профили распределения фосфора в кремнии в приповерхностной наноразмерной области полупроводника

распределение атомов фосфора в результате 30 минутной термической диффузии при температуре полупроводника $T = 1073$ К, без учета электрического поля ОПЗ диода Шоттки; кривая 5 – распределение атомов фосфора, полученное на основе решения (1), для температуры полупроводника $T = 1073$ К, времени диффузии 15 минут при величине потенциала на поверхности полупроводника $\varphi_S = 0,2$ В.

Анализ результатов моделирования указывает на возможность контролируемого перераспределения легирующих примесей на глубинах порядка десятков нанометров, обусловленного диффузией электрически активных атомов в электрическом поле ОПЗ диода Шоттки. Представляется целесообразным исследовать возможность формирования концентрационных профилей сложной формы в наноразмерном приконтактном слое, модулируя напряженность электрического поля у поверхности полупроводника по определенному закону.

Предложенная модель перераспределения атомов электрически активных примесей в ОПЗ полупроводника контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки может быть использована при проектировании элементов ИС с улучшенными значениями отдельных параметров, а также при разработке новой элементной базы твердотельной электроники на основе наноразмерных гетероструктур.

Литература:

1. Иващенко С.Н. Энергетическая структура и применение сверхрешеток [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2010, № 2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2010/189> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

2. 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. – Яз. рус.

3. Востоков Н.В., Шашкин В.И. Электрические свойства наноконтактов металл-полупроводник [Текст] // Физика и техника полупроводников. - 2004, том 38, № 9. – С. 1084 – 1089.

4. Богданов С.А., Захаров А.Г., Лытюк А.А. Моделирование распределения потенциала в барьерах Шоттки с учетом краевых эффектов [Текст] // Нано - и микросистемная техника. – 2011, № 5. - С. 12–15.

5. Богданов С.А., Захаров А.Г., Лытюк А.А. Диффузионная модель процесса деградации контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки [Текст] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012, № 1. – С. 53 – 58

6. Стриха В.И., Бузанева Е.В. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике [Текст] / М.: Радио и связь. – 1987. – 256 с.

7. Абдуллаев Г.Б., Джафаров Т.Д. Атомная диффузия в полупроводниковых структурах [Текст] / М.: Атомиздат, 1980. – 280 с.

8. Jansson F., Österbacka R., Nenashev A.V., Baranovskii S.D., Gebhard F. Effect of electric field on diffusion in disordered materials [Текст] // Annalen der Physik (Leipzig). –2009. Т. 18. № 12. – P. 856 – 862.

9. Lipovskii A.A., Omelchenko A.V., Petrov M.I. Modeling charge transfer dynamics and electric field distribution in glasses during poling and electrostimulated diffusion [Текст] // Technical Physics Letters. – 2010. Т. 36. № 11. – P. 1028 – 1031.

10. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов [Текст]/М.: Энергия, 1973. – 656 с.

11. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках [Текст] / М.: Мир. – 1977. – 562 с.

12. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов [Текст] / Под. ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 496 с.: ил.