

УДК 621.382

Шифр специальности ВАК: 1.2.2

Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко

Численное решение уравнения Пуассона в кремниевой $n-i-p$ -наноструктуре с учетом поверхностных состояний

Актуальность. В последнее время достаточно широкое распространение получили $n-i-p$ -наноструктуры в составе современных электронных приборов. Поверхностные электронные состояния влияют на распределение носителей заряда в объеме кремниевой $n-i-p$ -наноструктуры с диффузионным распределением доноров и акцепторов, что изменяет свойства полупроводниковых приборов. Этот эффект изучен не полностью. **Цель исследования.** Анализ влияния плотности поверхностного заряда на распределения концентрации электронов, дырок и их дрейфовой скорости в $n-i-p$ -наноструктуре. **Методы.** Для моделирования изменения концентрации носителей заряда, зависящей от потенциала электрического поля, использован метод численного решения уравнения Пуассона с учетом поверхностных состояний. **Научная новизна.** Получены принципиально новые знания о влиянии поверхностных состояний на область пространственного заряда кремниевой $n-i-p$ -наноструктуры. **Результаты.** Показано, что поверхностные состояния создают область пространственного заряда, в которой уменьшаются разность электрического потенциала на границах структуры и концентрация основных носителей заряда. Поэтому электрическая проводимость поверхностной области оказывается меньше, чем в легированном слое. Дрейфовая скорость термолизованных носителей заряда меняет знак на противоположный в поверхностной области. Уменьшение плотности поверхностных состояний до 10^{16} м^{-2} практически устраняет эти эффекты. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы в полупроводниковой наноэлектронике для совершенствования известных и создания новых приборов.

Ключевые слова: $n-i-p$ -наноструктура, потенциал электрического поля, поверхностные состояния, электроны, дырки, кремний, дрейфовая скорость.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-93-98

Введение

В современной полупроводниковой наноэлектронике используются приборы $n-i-p$ -типа ($p-i-n$), например, блоки памяти и защиты от статического электричества, диоды с перестраиваемыми параметрами и др. [1–3]. Одним из физических эффектов, снижающих их параметры, является вклад поверхностных состояний в рекомбинационные, электрические и кинетические свойства носителей заряда.

Расчеты электрофизических свойств классических полупроводниковых структур с $n-p$ -переходом основаны на теории Шокли [4]. Модификациями этой теории являются модели резкого и плавного $n-p$ -переходов [5, 6]. В расчетах свойств полупроводниковых структур с реальным распределением примесей и в реальных условиях эксплуатации используются численные модели [7–10].

Выпрямляющие свойства $n-p$ -перехода определяют электрическим потенциальным барьером и областью пространственного заряда (ОПЗ). Распределение электрического потенциала, плотности заряда, концентрации электронов и дырок в ОПЗ имеет особенности [11], не содержащиеся в классических моделях [4–6]. Расчет структур, содержащих сильно несимметричные, а также сверхмелкие $n-p$ -переходы, выполняется с помощью численных моделей.

Уменьшение размеров полупроводниковых структур до наноразмерных масштабов является одной из тенденций полупроводниковой техники. В работах [12, 13] построен численный метод решения уравнения Пуассона в $n-p$ -переходе с учетом поверхностных состояний. Влияние плотности поверхностного заряда не ограничивается поверхностной обла-

стью. В [14] показано, что напряженность электрического поля в слое i -типа проводимости изменяется с уменьшением толщины наноструктуры.

Цель исследования – анализ влияния плотности поверхностного заряда на распределения концентрации электронов, дырок и их дрейфовой скорости в $n-i-p$ -наноструктуре.

Методика решения задачи

Модель кремниевой $n-i-p$ -наноструктуры включает четыре части (рис. 1): при $-w_n \leq x < 0$ расположен диффузионный слой n -типа проводимости; при $0 \leq x < w_p$ расположен высокоомный слой p_0 -типа (база); при $w_p \leq x < w_{p2}$ расположен диффузионный слой p -типа; при $w_{p2} \leq x \leq (w_p + L)$ ($L \gg w_n, w_p, w_{p2}$) расположен низкоомный слой p -типа проводимости. Слой n -типа содержит примесные атомы фосфора. Слои p -типа содержат примесные атомы бора с различной концентрацией. Поверхностные состояния находятся в слое толщиной w_s .

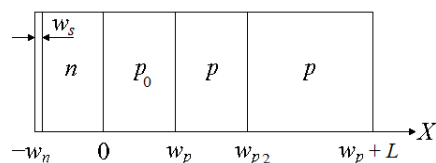


Рис. 1. Условная схема $n-i-p$ -наноструктуры

Распределение примесей бора в базе $N_{B0} = \text{const}$, фосфора при $-w_n \leq x$

$$N_P(x) = N_{PP} \operatorname{erfc} \left(\frac{(x + w_n)}{x_{0P}} \right), \quad (1)$$

где N_{PP} – поверхностная концентрация, x_{0P} – характеристическая диффузионная длина фосфора. Концентрация бора в p -слое при $w_p \leq x < w_{p2}$

$$N(x) = N_B(x) + N_{B0}, \quad (2)$$

$$N_B(x) = (N_{BB} - N_{B0}) \operatorname{erfc} \left(\frac{(w_{p2} - x)}{x_{0B}} \right), \quad (3)$$

где N_{BB} – концентрация бора при $x = w_{p2}$, x_{0B} – характеристическая диффузионная длина бора. $N(x) = N_{BB}$ в подложке при $w_{p2} \leq x \leq (w_p + L)$.

Фосфор и бор являются мелкими примесями в кремнии. Концентрация ионизованных примесей зависит от положения уровня Ферми F в запрещенной зоне.

$$N_P^{\text{ion}}(x) = \frac{N_P(x)}{1 + g_P e^{\frac{F_1(x) - E_g + E_P}{kT}}}, \quad (4)$$

$$N_B^{\text{ion}}(x) = - \frac{N_B(x)}{1 + g_B e^{\frac{E_B - F_1(x)}{kT}}}, \quad (5)$$

где $F_1(x) = F + q\phi(x)$, E_g – ширина запрещенной зоны; E_P и g_P – энергетический уровень в запрещенной зоне и фактор его вырождения для примеси фосфора; E_B и g_B – энергетический уровень в запрещенной зоне и фактор его вырождения для примеси бора; q – элементарный заряд; $\phi(x)$ – электрический потенциал; k – константа Больцмана; T – температура полупроводника. Начало отсчета энергии совпадает с вершиной валентной зоны в точке $x = (w_p + L)$. При $x = 0$ концентрации ионизованных доноров и акцепторов равны.

Заряженные поверхностные состояния расположены в слое толщиной w_s , сравнимой с периодом кристаллической решетки, при $-w_n \leq x < (w_s - w_n)$ (см. рис. 1). Обозначим плотность поверхностных состояний N_{ss} , тогда их объемная концентрация равна $N_s(x)$ [12].

$$N_s(x) = \frac{N_{ss} kT}{w_s E_g} \ln \left(\frac{\left(1 + e^{\frac{2F_1(x) - E_g}{2kT}} \right) \left(1 + e^{\frac{E_g - F_1(x)}{kT}} \right)}{\left(1 + e^{\frac{F_1(x)}{kT}} \right) \left(1 + e^{\frac{E_g - 2F_1(x)}{2kT}} \right)} \right). \quad (6)$$

Концентрация фосфора на поверхности $N_{PP} = 10^{26} \text{ м}^{-3}$, бора в базе $N_{B0} = 10^{17} \text{ м}^{-3}$, бора в подложке $N_{BB} = 10^{26} \text{ м}^{-3}$. При этих значениях для всех $-w_n \leq x \leq (w_p + L)$ $N_P^{\text{ion}}(x) < N_c$ эффективной плотности электронных состояний в окрестности дна зоны проводимости, $|N_B^{\text{ion}}(x)| < N_v$ эффективной плотности электронных состояний в окрестности вершины валентной зоны. Тогда в невырожденном состоянии концентрация электронов $n(x)$ и дырок $p(x)$ равна

$$n(x) = N_c e^{\frac{F - E_g + q\phi(x)}{kT}}, \quad p(x) = N_v e^{\frac{-F - q\phi(x)}{kT}}. \quad (7)$$

Электрический потенциал найдем, решая уравнение Пуассона численно, методом [12]. Имеем:

$$\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) = - \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} (p(x) - n(x) + N^{\text{ion}}(x) + N_s(x)). \quad (8)$$

Уравнение (8) записано в метрической системе СИ, $N^{\text{ion}}(x) = N_P^{\text{ion}} + N_B^{\text{ion}}$ – концентрация ионизованных дефектов с учетом знака.

В рассматриваемой модели выполняется условие электронейтральности

$$\int_{-w_n}^{w_p + L} (p(x) - n(x) + N^{\text{ion}}(x) + N_s(x)) dx = 0. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует

$$\left. \frac{d}{dx} \phi(x) \right|_{x=-w_n} = \left. \frac{d}{dx} \phi(x) \right|_{x=w_p + L} = 0. \quad (10)$$

Считаем, что $\phi(x) = 0$ при $x \geq (w_p + L)$, тогда из (10) следует $\phi(x) = \phi_0$ при $x \leq -w_n$. Значение ϕ_0 определяется в процессе численного решения уравнения (8).

В расчётах толщина слоёв n - i - p -наноструктуры $w_n = w_p = (w_{p2} - w_p) = w = 20 \text{ нм}$, толщина поверхностного слоя $w_s = 1 \text{ нм}$, температура $T = 300 \text{ К}$.

Результаты расчётов и их обсуждение

Влияние поверхностных состояний на электрическое поле, концентрацию носителей заряда и ионизованных объемных и поверхностных дефектов продемонстрировано на рис. 2, a - $в$.

Изменение поверхностного потенциального барьера мало в масштабе рис. 2, a ($N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). В этом случае поверхностные состояния мало влияют на состав ОПЗ, занимающей весь объем n - i - p -наноструктуры. Отметим особенности строения ОПЗ [13], продемонстрированные на рис. 2, a , необходимые для обоснования результатов работы. Область положительного заряда $N_P^{\text{ion}}(x) > n(x)$ расположена при $x \in (-w_n, -8 \text{ нм})$. Область отрицательного заряда $|N_B^{\text{ion}}(x)| > p(x)$ расположена при $x \in (26,4 \text{ нм}, 40 \text{ нм})$.

Ионизованные примесные атомы дают основной вклад в значение напряженности электрического поля в базе $E_0 \approx 2 \cdot 10^7 \text{ В/м}$. Существуют две области: обогащённая электронами при $x \in (-8 \text{ нм}, 7,2 \text{ нм})$ и обогащённая дырками при $x \in (13,6 \text{ нм}, 26,4 \text{ нм})$. Область, обеднённая электронами и дырками ($n, p < N_{B0}$), расположена при $x \in (7,2 \text{ нм}, 13,6 \text{ нм})$. Области, обогащённые и обеднённые носителями заряда, создают изменение напряженности $\Delta E(x) \ll E_0$.

Таким образом, база имеет дипольную структуру. Значение E_0 превышает критическое, так что дрейфовая скорость электронов превышает тепловую [15]. ОПЗ распространяется на всю n - i - p -наноструктуру, её размер 60 нм. В работе [16] отмечается, что для реализации туннельного эффекта средний размер

ОПЗ составляет 10 нм, а при 40 нм активное туннелирование возможно при достаточно большом обратном смещении. Следовательно, вклад квантового туннелирования при толщине трёх слоёв по 20 нм пренебрежимо мал. Применимость данной модели ограничена толщиной слоёв ~ 10 нм.

Плотность поверхностных состояний $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$ на рис. 2, б, $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$ на рис. 2, в, при этом $N^{\text{ion}}(x) + N_s(x) < 0$ при $x < -1,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ в поверхностном слое толщиной $w_s = 1 \text{ нм}$. Особенность распределения концентрации заряженных частиц $Q(x) = p(x) - n(x) + N^{\text{ion}}(x) + N_s(x)$ в поверхностной области поясняет рис. 3.

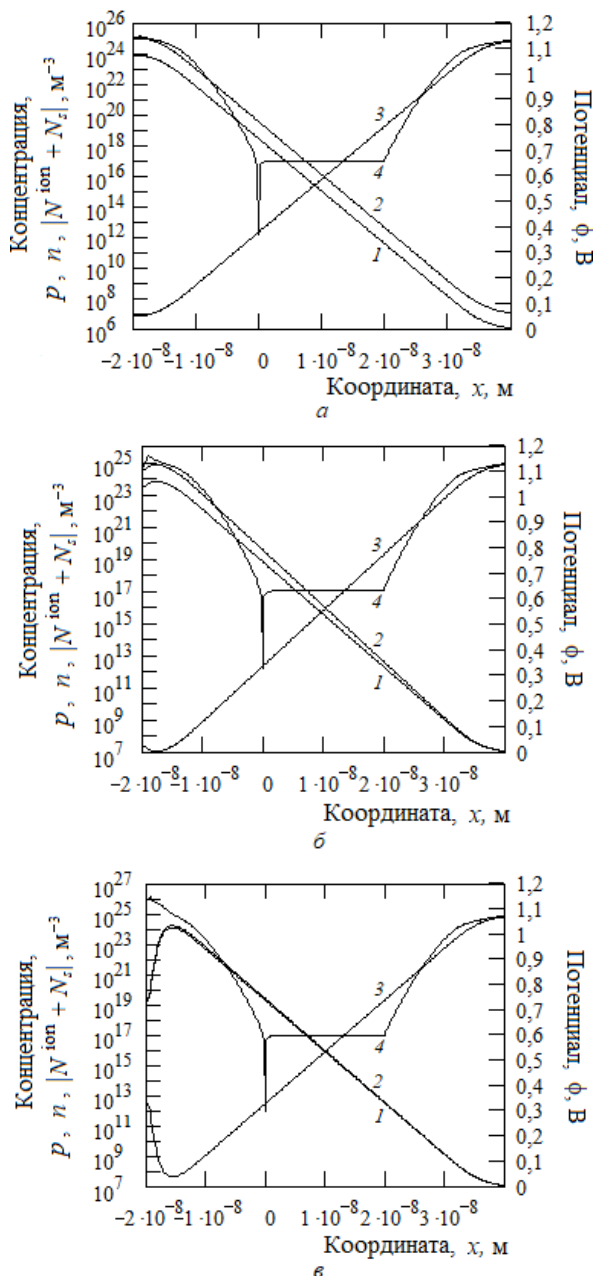


Рис. 2. Электрический потенциал и концентрация частиц: 1 – $\phi(x)$, 2 – $n(x)$, 3 – $p(x)$, 4 – $|N^{\text{ion}}(x) + N_s(x)|$; а – $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$, б – $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$, в – $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$

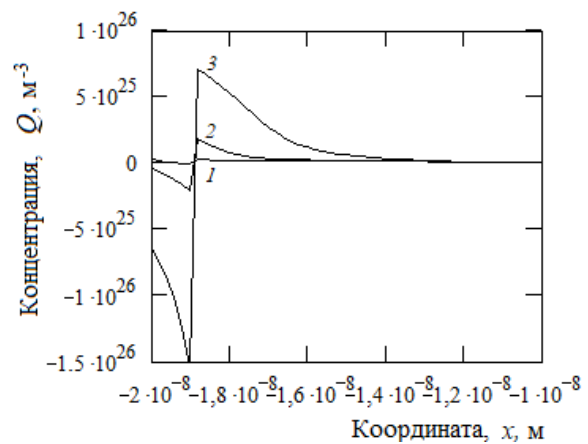


Рис. 3. Изменение концентрации заряженных частиц, обусловленное поверхностным зарядом: 1 – $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$; 2 – $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$; 3 – $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$

В модели заполнения электронами поверхностных состояний [12] эти состояния заряжены отрицательно на материале n -типа. В этом случае отрицательный заряд экранирован положительным зарядом доноров (см. рис. 3), так как концентрации электронов меньше концентрации ионизованных доноров (см. рис. 2, б, в). Увеличение N_{ss} приводит к уменьшению электрического потенциального барьера n - i - p -структуры $\Delta\phi = \phi(-w_n) - \phi(w_p + L)$ и концентрации основных носителей заряда в поверхностной области (см. рис. 2, б, в). Значения электрического потенциального барьера: $\Delta\phi = 1,0737 \text{ В}$ при $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$, $\Delta\phi = 1,0414 \text{ В}$ при $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$, $\Delta\phi = 0,7343 \text{ В}$ при $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$. Таким образом, существует поверхностная ОПЗ, обусловленная поверхностными состояниями N_{ss} , в которой уменьшается электрический потенциал $\phi(x)$ (см. рис. 2, в).

В неравновесном состоянии возможны осцилляции $\Delta\phi$. Поверхностные или под точечными контактами инжекционные неустойчивости тока в Si наблюдались экспериментально [17].

Поверхностные электронные состояния в запрещённой зоне возникают вследствие нарушения периодичности кристаллической решётки (таммовские состояния, уровни Шокли). Кроме того, дают вклад примеси и другие кристаллические дефекты. Согласно литературным данным [18, 19], плотность поверхностных состояний в кремнии находится в диапазоне $10^{15} - 10^{19} \text{ м}^{-2}$. Нарушенный поверхностный слой – более широкое понятие, включающее кроме поверхностных состояний область, содержащую механические дефекты. Современные технологические методы обработки поверхности позволяют минимизировать нарушенный слой так, что остаются только поверхностные дефекты в слое толщиной 1–2 нм [20, 21].

Дрейфовая скорость термолизованных носителей заряда является сложной функцией концентрации примесей и напряженности электрического поля [22]. Изменение дрейфовой скорости электронов $v_{dn}(x)$ при различных значениях N_{ss} , рассчитанное с помощью феноменологической формулы [22] и зна-

чений $[N^{\text{ion}}(x) + N_s(x)]$, $E(x) = -d\phi(x)/dx$ (см. рис. 2, а–в), показано на рис. 4. Рассчитанное значение дрейфовой длины электронов в базе $d_n = \tau_0 v_{dn} \gg w_p$, где τ_0 – эффективное время жизни [22].

Если плотность поверхностных состояний $N_{ss} \gg 10^{16} \text{ м}^{-2}$, то в поверхностной области напряженность электрического поля отрицательна $E \geq -2 \cdot 10^8 \text{ В/м}$, поэтому дрейфовая скорость меняет знак на противоположный с 10^5 на -10^5 м/с .

Поверхностные состояния мало влияют на распределение носителей заряда и электрический потенциальный барьер при $N_{ss} \leq 10^{16} \text{ м}^{-2}$ (см. рис. 2, а).

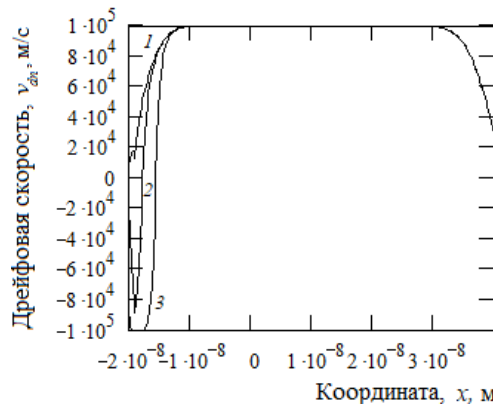


Рис. 4. Дрейфовая скорость термолизованных электронов в объёме наноразмерной $n-i-p$ -структуры: 1 – $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$, 2 – $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$; 3 – $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$

Заключение

Результаты численного моделирования показывают, что поверхностные состояния в зоне запрещённых энергий обуславливают существование ОПЗ в поверхностной области $n-i-p$ -наноструктуры, в которой происходит уменьшение электрического потенциального барьера и концентрации основных носителей заряда. Заряд поверхностных состояний экранируется зарядом ионизованных примесей в поверхностной ОПЗ. Вследствие этого электрическая проводимость поверхностной области оказывается меньше, чем легированной, а переходное (контактное) сопротивление нелинейно. Дрейфовая скорость носителей заряда меняет знак на противоположный в ОПЗ поверхностного заряда, что препятствует их транспорту. Эти свойства поверхностной области отрицательно влияют на характеристики реальных полупроводниковых структур.

Уменьшение плотности поверхностных состояний до 10^{16} м^{-2} практически устраняет поверхностную ОПЗ. Технологически это достигается пассивацией поверхности пленкой диэлектрика [23].

Увеличение напряжённости электрического поля базы $p-i-n$ -структуры является важным фактором для повышения квантового выхода лавинных фотодиодов и детекторов ионизирующего излучения [24, 25]. Дипольный характер распределения электронов и дырок обуславливает резонансное поглощение и излучение электромагнитных волн ТГц диапазона [26]. Результаты расчетов распределения носителей заряда и напряженности электрического поля могут

быть использованы для совершенствования этих приборов.

Литература

1. Характеристики pin -структуры с дискретно металлизированной поверхностью i -области / А.А. Даниленко, А.Д. Иванов, В.Л. Иванов, В.В. Марочкин, Н.И. Михайлов, В.В. Перепеловский // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 41–51.
2. Торина Е.М. Транзисторы для твердотельных СВЧ-переключателей (обзор) / Е.М. Торина, В.Н. Кочемасов, А.Р. Сафин // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 6–31.
3. A study on the high power microwave effects of PIN diode limiter based on deep learning algorithm / H. Chen, W. Gao, Y. Zhao, S. Wang, X. Yan, H. Zhou, S. Chen, H. Liu // Nanotechnology. – 2024. – Vol. 35, No. 26. – P. 265202.
4. Shockley W. The theory of $n-p$ junctions in semiconductors and $n-p$ -junction transistors // Bell Syst. Tech. J. – 1949. – Vol. 28, No. 7. – P. 435–439.
5. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices / S.M. Sze, Y. Li, K.K. Ng. – 4th ed. – Wiley, 2021. – 944 p.
6. Kazuya M. Elementary Semiconductor Device Physics / M. Kazuya, A. Shuhei. – Boca Raton: Taylor & Francis, 2024. – 362 p.
7. Numerical Simulation and Hole Transport Layers Optimization of a Lead Sulfide-Based Solar Cell with a Power Conversion Efficiency of Above 22% / E.L. Meyer, I. Vulindlela, A. Paca, M.A. Agoro, N. Rono // Coatings. – 2025. – Vol. 15, No. 3. – Art. 255.
8. Numerical Solution of Charge Transport Equations in Semiconductors / M. Benaichi, A. Karkri, A. Khriess, R. Zarrouk // EHEI Journal of Science and Technology. – 2024. – Vol. 04, No. 1. – P. 42–47.
9. Alahmadi A.N.M. Numerical Analysis and Design of Hole and Electron Transport Layers in Lead-Free MASnIBr₂ Perovskite Solar Cells // Eng. – 2025. – Vol. 6, No. 9. – Art. 222.
10. Моделирование солнечной батареи космического аппарата в процессе эксплуатации на орбите / Р.В. Козлов, Д.Д. Дубов, В.Г. Букреев, А.П. Пичугин // Доклады ТУСУР. – 2025. – Т. 28, № 3. – С. 163–170.
11. Богатов Н.М. Распределение заряда в резком несимметричном равновесном $n-p$ -переходе // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2016. – № 3. – С. 12–17.
12. Богатов Н.М. Численное решение уравнения Пуассона в $n-p$ -переходе с учетом поверхностных состояний // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2024. – Т. 21. – № 3. – С. 61–69.
13. Влияние поверхностных состояний на электрическое поле $n-p$ перехода / Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 266–275.
14. Моделирование электрического поля кремниевой $n-i-p$ -наноструктуры / Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 5. – С. 123–133.
15. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. пособие для вузов. – М.: Юрайт, 2022. – 463 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://urait.ru/bcode/509181> (дата обращения: 15.12.2025).
16. Барыкин Д.А. Численное моделирование туннельного эффекта в гетероструктуре нитрида галлия на кремнии / Д.А. Барыкин, К.Ю. Шугуров, А.М. Можаров, И.С. Мухин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 46–56.

17. Зикриллаев Н.Ф. Автоколебательные процессы в кремнии, проблемы и перспективы исследования и применение их в электронике / Н.Ф. Зикриллаев, М.М. Шоабдурахимова, К.С. Аюпов, Ф.Э. Уракова, О.С. Нематов // Электронная обработка материалов. – 2023. – Т. 59, № 5. – С. 56–71.

18. Яфаров Р.К. Влияние встроенного поверхностного потенциала на ВАХ кремниевых МДП-структур // Микроэлектроника. – 2019. – Т. 48, № 2. – С. 155–159.

19. Александров О.В. Влияние интенсивности ионизирующего облучения на отклик МОП-структур // Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т. 55, В. 2. – С. 152–158.

20. Волковский Ю.А. Исследование состояния приповерхностного слоя полированных кремниевых подложек методом рентгеновской рефлектометрии в зависимости от методов их очистки / Ю.А. Волковский, А.Ю. Серегин, М.С. Фоломешкин, П.А. Просекова, М.Д. Павлюк, Ю.В. Писаревский, А.Е. Благова, М.В. Ковальчук // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 9. – С. 40–48.

21. Юров В.М. Толщина поверхностного слоя типичных полупроводников / В.М. Юров, Т. Жанабергенов, С.А. Гученко // The scientific heritage. – 2020. – № 43. – С. 20–23.

22. A review of some charge transport properties of silicon / C. Jacoboni, C. Canali, G. Ottaviani, A. Alberigi Quaranta // Solid-State Electronics. – 1977. – Vol. 20, No. 2. – P. 77–89.

23. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency / H. Savin, P. Repo, G. von Gastrow, P. Ortega, E. Calle, M. Garín, R. Alcubilla // Nature Nanotechnol. – 2015. – Vol. 10, No. 7. – P. 624–628.

24. Shobitha G.S. Potentiality of Avalanche Transit Time Devices for Biomedical Applications: A Comprehensive Review / G.S. Shobitha, G.C. Ghivela // Biomedical Materials & Devices. – 2026. – Vol. 4. – P. 4121–4137.

25. Wang B. High-speed Si-Ge avalanche photodiodes / B. Wang, J. Mu // Photonix. – 2022. – Vol. 3, No. 8. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43074-022-00052-6>.

26. Андрианов А.В. Генерация терагерцевого излучения в полупроводниках / А.В. Андрианов // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – В. 10. – С. 1633–1671.

Богатов Николай Маркович

Д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. физики и информационных систем Кубанского государственного университета (КубГУ) Ставропольская ул., 149, г. Краснодар, Россия, 350040
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9301-4545>
Тел.: +7-903-451-31-06
Эл. почта: bogatov@phys.kubsu.ru

Володин Владимир Сергеевич

Ст. преп. каф. физики и информационных систем КубГУ Ставропольская ул., 149, г. Краснодар, Россия, 350040
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0639-1105>
Тел.: +7-989-820-36-72
Эл. почта: volodinv1995@mail.ru

Григорьян Леонтий Рустемович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики и информационных систем КубГУ Ставропольская ул., 149, г. Краснодар, Россия, 350040
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4744-0356>
Тел.: +7-918-168-17-19
Эл. почта: leonmezon@mail.ru

Коваленко Максим Сергеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики и информационных систем КубГУ Ставропольская ул., 149, г. Краснодар, Россия, 350040
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5402-7366>
Тел.: +7-918-469-49-54
Эл. почта: m.s.kovalenko@ya.ru

Поступила в редакцию: 16.03.2026.

Принята к публикации: 01.07.2026.

Bogatov N.M., Volodin V.S.,

Grigoryan L.R., Kovalenko M.S.

Numerical solution of the Poisson equation in a silicon *n-i-p*-nanostructure taking into account surface states

Relevance. Recently, *n-i-p*-nanostructures have become quite widespread in modern electronic devices. Surface electron states influence the distribution of charge carriers within the bulk of the silicon *n-i-p*-nanostructure, with a diffusion distribution of donors and acceptors, thereby altering the properties of semiconductor devices. However, this effect has not been fully studied. **Purpose of the study.** Analysis of the influence of surface charge density on the distribution of electron and hole concentrations and their drift velocity in an *n-i-p*-nanostructure. **Methods.** To simulate the change in the concentration of charge carriers depending on the electric field potential, a numerical method for solving the Poisson equation was employed, taking surface states into account. **Scientific novelty.** Fundamentally new knowledge is obtained about the influence of surface states on the space-charge region of a silicon *n-i-p*-nanostructure. **Results.** It is shown that the surface states create a space-charge region in which both the difference in electric potential at the structure boundaries and the concentration of the majority charge carriers decrease. Therefore, the electrical conductivity of the surface region is lower than that in the doped layer. The drift velocity of thermally generated charge carriers reverses in the surface region. Reducing the density of surface states to 10^{16} m^{-2} virtually eliminates these effects. **Practical significance.** The obtained results can be used in semiconductor nanoelectronics to improve existing devices and develop new ones.

Keywords: *n-i-p*-nanostructure, electric field potential, surface states, electrons, holes, silicon, drift velocity.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-93-98

References

1. Danilenko A.A., A.A. Ivanov A.A., Ivanov V.L., Marochkin V.V., Mikhailov N.I., Perepelovskiy V.V. [The Characteristics of the *pin*-Structure with a Discrete Metallic Surface *i*-Region]. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 41–51 (in Russ.).
2. Torina E.M., Kochemasov V.N., Safin A.R. [Transistors for Solid-State Microwave Switches (A Review)]. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 6–31 (in Russ.).
3. Chen H., Gao W., Zhao Y., Wang S., Yan X., Zhou H., Chen S., Liu H. A study on the high power microwave effects of *PIN* diode limiter based on deep learning algorithm. *Nanotechnology*, 2024, vol. 35, no. 26, pp. 265202.
4. Shockley W. The theory of *n-p* junctions in semiconductors and *n-p*-junction transistors. *Bell Syst. Tech. J.*, 1949, vol. 28, no. 7, pp. 435–439.
5. Sze S.M., Li Y., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. 4th ed., Wiley, 2021, 944 p.

6. Kazuya M., Shuhei A. Elementary Semiconductor Device Physics, Boca Raton, Taylor & Francis, 2024, 362 p.
7. Meyer E.L., Vulindlela I., Paca A., Agoro M.A., Rono N. Numerical Simulation and Hole Transport Layers Optimization of a Lead Sulfide-Based Solar Cell with a Power Conversion Efficiency of Above 22%. *Coatings*, 2025, vol. 15, no. 3, art. 255.
8. Benaichi M., Karkri A., Khriess A., Zarrouk R. Numerical Solution of Charge Transport Equations in Semiconductors. *EHEI Journal of Science and Technology*, 2024, vol. 4, no. 1, pp. 42–47.
9. Alahmadi A.N.M. Numerical Analysis and Design of Hole and Electron Transport Layers in Lead-Free MASnIBr₂ Perovskite Solar Cells. *Eng*, 2025, vol. 6, no. 9, art. 222.
10. Kozlov R.V., Dubov D.D., Bukreev V.G., Pichugin A.P. [Modeling a spacecraft's solar array during on-orbit operation]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistema upravleniya i radioelektroniki*, 2025, vol. 28, no. 3, pp. 163–170 (in Russ.).
11. Bogatov N.M. [The charge distribution in sharp asymmetrical equilibrium *n-p*-junction]. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2016, no. 3, pp. 12–17 (in Russ.).
12. Bogatov N.M. [Numerical solution of the Poisson equation in the *n-p* junction taking into account surface states] *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 61–69 (in Russ.).
13. Bogatov N.M., Volodin V.S., Grigoryan L.R., Kovalenko M.S. [Influence of surface states on the electric field of the *n-p* junction]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2024, no. 3, pp. 266–275 (in Russ.).
14. Bogatov N.M., Volodin V.S., Grigoryan L.R., Kovalenko M.S. [Modeling the electric field of a silicon *n-i-p* nanostructure]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2025, no. 5, pp. 123–133 (in Russ.).
15. Staroselsky V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov mikroelektroniki* [Physics of semiconductor devices of microelectronics: a textbook for universities]. M.: Yurait, 2022, 463 p. Available: <https://urait.ru/bcode/509181> (accessed: 15 December 2025) (in Russ.).
16. Barykin D.A., Shugurov K.Yu., Mozharov A.M., Mukhin I.S. [Numerical simulation of the tunnel effect in the gallium nitride heterostructure on silicon]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2024, vol. 17, no. 3, pp. 46–56 (in Russ.).
17. Zikrillaeve N.F., Shoabdurakhimova M.M., Ayupov K.S., Urakova F.E., Nematov O.S. *Avtokolebatel'nyye protsessy v kremnii, problemy i perspektivy issledovaniya i primeneniye ikh v elektronike* [Self-oscillating processes in silicon: problems and prospects of research and their application in electronics]. *Elektronnaya Obrabotka Materialov/Electronic Processing of Materials*, 2023, vol. 59, no. 5, pp. 56–71 (in Russ.).
18. Yafarov R.K. Effect of the built-in surface potential on the *I-V* characteristics of silicon MIS-structures. *Russian microelectronics*, 2019, vol. 48, pp. 127–130.
19. Aleksandrov O.V. The Effect of the Ionizing Radiation Intensity on the Response of MOS-Structures. *Semiconductors*, 2021, vol. 55, no. 2, pp. 207–213.
20. Volkovsky Yu.A., Seregin A.Yu., Folomeshkin M.S., Prosekov P. A., Pavlyuk M.D., Pisarevsky Yu.V., Blagov A.E., Kovalchuk M.V. X-Ray Reflectometry Study of the State of the Surface Layer of Polished Silicon Substrates Depending on the Methods of Their Cleaning. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2021, vol. 15, no. 5, pp. 927–933.
21. Yurov V., Zhanabergenov T., Guchenko S. [Surface layer typical semiconductors]. *The scientific heritage*, 2020, no. 43, pp. 20–23 (in Russ.).
22. Jacoboni C., Canali C., Otiaviani G., Alberigi Quaranta A. A review of some charge transport properties of silicon. *Solid-State Electronics*, 1977, vol. 20, no. 2, pp. 77–89.
23. Savin H., Repo P., von Gastrow G., Ortega P., Calle E., Garin M., Alcubilla R. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency. *Nature Nanotechnol*, 2015, vol. 10, no. 7, pp. 624–628.
24. Shobitha G.S., Ghivela G.C. Potentiality of Avalanche Transit Time Devices for Biomedical Applications: A Comprehensive Review. *Biomedical Materials & Devices*, 2026, vol. 4, pp. 4121–4137.
25. Wang B., Mu J. [High-speed Si-Ge avalanche photodiodes]. *Photonix*, 2022, vol. 3, no. 8, <https://doi.org/10.1186/s43074-022-00052-6>.
26. Andrianov A.V. Generation of terahertz radiation in semiconductors. *Physics of the Solid State*, 2023, vol. 65, no. 10, pp. 1563–1598.

Nikolay M. Bogatov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Head of the Department of Physics and Information Systems,
Kuban State University
149, Stavropolskaya St., Krasnodar, Russia, 350040
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9301-4545>
Phone: +7-903-451-31-06
Email: bogatov@phys.kubsu.ru

Vladimir S. Volodin

Senior Lecturer, Department Physics and Information
Systems, Kuban State University
149, Stavropolskaya St., Krasnodar, Russia, 350040
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0639-1105>
Phone: +7-989-820-36-72
Email: volodinvs1995@mail.ru

Leonty R. Grigoryan

Ph.D. (Phys. and Mathematics), Assoc. Prof., Dept. Physics
and Information Systems, Kuban State University
149, Stavropolskaya St., Krasnodar, Russia, 350040
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4744-0356>
Phone: +7-918-168-17-19
Email: leonmezon@mail.ru

Maksim S. Kovalenko

Ph.D. (Phys. and Mathematics), Assoc. Prof., Dept. Physics
and Information Systems, Kuban State University
149, Stavropolskaya St., Krasnodar, Russia, 350040
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5402-7366>
Phone: +7-918-469-49-54
Email: m.s.kovalenko@ya.ru

Received: 16.03.2026.

Accepted: 01.07.2026.