

19. Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., Smirnov V.A. Transparent Zinc Oxide Memristor Structures: Magnetron Sputtering of Thin Films, Resistive Switching Investigation, and Crossbar Array Fabrication, *Nanomaterials*, 2024, Vol. 14, No. 23, pp. 1901.
20. Tominov R., Vakulov Z., Kazantsev V., Prakash C., Rodriguez D., Smirnov V. Synaptic plasticity in the nanocrystalline ZnO cross-point for neuromorphic systems of AI, *2024 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA)*. IEEE, 2024, pp. 235-238.
21. Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Alyab'eva N.I., Vakulov Z.E., Zamburg E.G., Khakhulin D.A., Ageev O.A. Issledovanie memristornogo effekta v nanokristallicheskih plenkakh ZnO [Investigation of the memristor effect in nanocrystalline ZnO films], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors], 2019, Vol. 53, No. 1, pp. 77-82.
22. Rupp J L. M., Infortuna A., Gauckler L.J. Microstrain and self-limited grain growth in nanocrystalline ceria ceramics, *Acta materialia*, 2006, Vol. 54, No. 7, pp. 1721-1730.

Вакулов Захар Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: zvakulov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371611; к.т.н.; с.н.с.

Томинов Роман Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: tominov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371629; к.т.н.; доцент.

Дзюба Дмитрий Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: dmdzyuba@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371629; аспирант.

Смирнов Владимир Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vasmimov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371629; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой.

Vakulov Zakhar Evgenevich – Southern Federal University; e-mail: zvakulov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371611; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Tominov Roman Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: tominov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371629; cand. of eng. sc.; associate professor.

Dzyuba Dmitry Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: dmdzyuba@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371629; postgraduate student.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371629; cand. of eng. sc.; associate professor; head of department.

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-123-133

Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КРЕМНИЕВОЙ
N-I-P НАНОСТРУКТУРЫ

Распределение ионизованных примесей, электронов, дырок определяет структуру, физические свойства, эксплуатационные характеристики полупроводниковых приборов. Роль поверхностных электронных состояний отрицательна, степень их влияния на характеристики прибора зависит от особенностей структуры. Уменьшение размеров полупроводниковых приборов – современная тенденция совершенствования электроники. Влияние поверхностных состояний на свойства наноразмерных объектов возрастает при уменьшении их размеров. Объектом исследования является электрическое поле кремниевой n-i-p наноструктуры. Цель исследования – анализ влияния поверхностных состояний на внутреннее электрическое поле кремниевой n-i-p наноструктуры. Задачи исследования: 1 – Рассчитать численно с учетом поверхностных состояний потенциал и напряжённость электрического поля, концентрацию доноров и акцепторов в кремниевой n-i-p наноструктуре с диффузионным профилем легирования. 2 – Определить влияние толщины n-i-p наноструктуры и плотности поверхностных состояний на потенциал и напряжённость электрического поля. 3 – Определить состав области пространственного заряда n-i-p наноструктуры с минимизированным влиянием поверхностных состояний. Методика расчёта основана на численном решении уравнения Пуассона с учётом поверхностных состояний и граничными условиями, включающими условие общей электронейтральности образца. В результате получены распределения потенциала и напряжённости электрического поля для различных значений толщины

ны наноструктуры и плотности поверхностных состояний. Показано, что заряженные поверхностные состояния изменяют потенциал и напряженность электрического поля не только в поверхностной области, но и в объеме наноструктуры. Значение напряженности в базе возрастает с уменьшением её толщины, это значение уменьшается, если плотность поверхностных состояний превышает 10^{13} см^{-2} . Снижение плотности поверхностных состояний до 10^{12} см^{-2} устраняет созданный ими поверхностный потенциальный барьер. Область пространственного заряда состоит из 5 частей: область положительного заряда, созданного ионизованными донорами, область, обогащённая электронами, область, обеднённая носителями заряда, область, обогащённая дырками, область отрицательного заряда, созданного ионизованными акцепторами.

N-I-P наноструктура; потенциал электрического поля; уравнение Пуассона; поверхностные состояния; электроны; дырки; кремний.

N.M. Bogatov, V.S. Volodin, L.R. Grigoryan, M.S. Kovalenko

MODELING THE ELECTRIC FIELD OF A SILICON *N-I-P* NANOSTRUCTURE

*Distribution of ionized impurities, electrons, holes determines the structure, physical properties, performance characteristics of semiconductor devices. The role of surface electron states is negative, the degree of their influence on the characteristics of the device depends on the features of the structure. Reducing the size of semiconductor devices is a modern trend in improving electronics. The influence of surface states on the properties of nanoscale objects increases with decreasing size. The object of the study is the electric field of a silicon *n-i-p* nanostructure. The purpose of the study is to analyze the influence of surface states on the internal electric field of a silicon *n-i-p* nanostructure. Research objectives: 1 – Calculate numerically, taking into account the surface states, the potential and electric field strength, the concentration of donors and acceptors in a silicon *n-i-p* nanostructure with a diffusion doping profile. 2 – Determine the influence of the thickness of the *n-i-p* nanostructure and the density of surface states on the potential and electric field strength. 3 – Determine the composition of the space charge region of the *n-i-p* nanostructure with the minimized influence of surface states. The calculation method is based on the numerical solution of the Poisson equation taking into account the surface states and boundary conditions, including the condition of the general electroneutrality of the sample. As a result, the distributions of the potential and electric field strength were obtained for different values of the nanostructure thickness and the density of surface states. It is shown that charged surface states change the potential and electric field strength not only in the surface region, but also in the volume of the nanostructure. The value of the strength in the base increases with decreasing thickness, this value decreases if the density of surface states exceeds 10^{13} cm^{-2} . Reducing the density of surface states to 10^{12} cm^{-2} eliminates the surface potential barrier created by them. The space charge region consists of 5 parts: a region of positive charge created by ionized donors, a region enriched in electrons, a region depleted in charge carriers, a region enriched in holes, and a region of negative charge created by ionized acceptors.*

N-I-P nanostructure; electric field potential; Poisson's equation; surface states; electrons; holes; silicon.

Введение. Наноразмерные *n-i-p* (*p-i-n*) структуры входят в состав конструкций приборов современной электроники и оптоэлектроники. Эти структуры используются как элементы энергонезависимой памяти, блоков защиты от статического напряжения, *p-i-n* диоды с регулируемыми характеристиками, СВЧ диоды и другие [1–3]. Уменьшение размеров и времени переключения *n-i-p* структур является актуальной задачей физики и техники полупроводников.

Вклад поверхностных свойств в электрофизические и оптические свойства полупроводниковой структуры возрастает при уменьшении её размеров. Как правило, этот вклад играет отрицательную роль. Причиной является существование нарушенных валентных связей и, следовательно, плотности электронных состояний в запрещённой зоне, обуславливающих темп поверхностной рекомбинации и накопление поверхностного заряда. Плотность поверхностных состояний оценивалась теоретически и экспериментально – это таммовские состояния, уровни Шокли, уровни, созданные дефектами решетки, примесями и др. В кремнии плотность поверхностных состояний находится в диапазоне $10^{11} \div 10^{15} \text{ см}^{-2}$ [4, 5]. Современные методы обработки поверхности и теоретические оценки показывают, что минимальная толщина поверхностного слоя составляет 1–2 нм [6, 7].

Цель работы – анализ влияния поверхностных состояний на внутреннее электрическое поле кремниевой $n-i-p$ наноструктуры.

Методика исследования. Модель $n-i-p$ структуры состоит из четырёх частей: 1 – диффузионный слой n -типа, расположенный при $-w_n \leq x < 0$, 2 – высокоомный слой p_0 -типа (база), расположенный при $0 \leq x < w_p$, 3 – диффузионный слой p -типа, расположенный при $w_p \leq x < w_{p2}$, 4 – низкоомный слоя p -типа, расположенный при $w_{p2} \leq x \leq w_p + L$. Расположение слоев показано на рис. 1, $L \gg w_n, w_p, w_{p2}$.

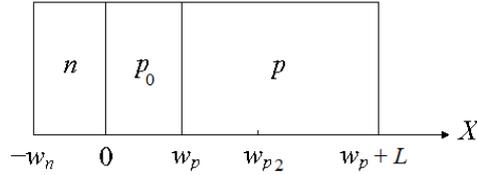


Рис. 1. Пространственная схема $n-p_0-p$ структуры

Предполагаем, что высокоомный слой толщиной $w_n + w_p + w_{p2}$ выращен на низкоомной подложке толщиной $L - w_{p2}$, легированной бором. Диффузия бора в область $x < w_{p2}$, происходит из подложки, а диффузия фосфора – из фосфорсодержащей композиции на противоположной поверхности при $x < -w_n$.

Концентрация фосфора определяется согласно модели диффузии из неограниченного источника

$$N_p(x) = N_{pp} \operatorname{erfc}\left(\frac{(x + w_n)}{x_{0p}}\right) \quad \text{при } -w_n \leq x, \quad (1)$$

N_{pp} – концентрация фосфора на поверхности $x = -w_n$, $x_{0p} = 2\sqrt{D_p t_p}$, D_p – коэффициент диффузии фосфора, зависящий от температуры диффузии, t_p – время диффузии. Концентрация бора в базе $N_{B0} = \text{const}$.

Концентрация примесей в p -слое:

$$N(x) = N_B(x) + N_{B0} \quad \text{при } w_p \leq x < w_{p2}, \quad (2)$$

где $N_B(x)$ – концентрация бора, описываемая моделью диффузии из неограниченного источника

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

N_{BB} – концентрация бора на поверхности $x = w_{p2}$, $x_{0B} = 2\sqrt{D_B t_B}$, D_B – коэффициент диффузии бора, зависящий от температуры диффузии, t_B – время диффузии бора в базу.

В подложке $N(x) = N_{BB}$ при $w_{p2} \leq x \leq w_p + L$.

Концентрация ионизованных доноров и акцепторов меньше их полной концентрации [8],

$$N_p^{\text{ion}}(x) = \frac{N_p(x)}{1 + g_p e^{\frac{F + q\phi(x) - E_g + E_p}{kT}}}, \quad N_B^{\text{ion}}(x) = \frac{N_B(x)}{1 + g_B e^{\frac{E_B - F - q\phi(x)}{kT}}}, \quad (4)$$

где F – электрохимический потенциал (уровень Ферми), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, E_p – энергетический уровень примесного атома фосфора в запрещенной зоне, g_p – фактор вырождения этого уровня, E_B – энергетический уровень примесного атома бора в запрещенной зоне, g_B – фактор вырождения этого уровня,

E_g – ширина запрещённой зоны, q – элементарный заряд, $\varphi(x)$ – потенциал внутреннего электрического поля. Металлургическая граница n - p перехода расположена при $x = 0$, где выполняется условие $N^{ion}(0) = 0$.

В поверхностной области толщиной w_s находятся заряженные электронные состояния. Согласно модели [9] концентрация заряженных поверхностных состояний определяется функцией

$$N_s(x) = \begin{cases} \frac{N_{ss}kT}{w_s E_g} \ln \left(\frac{\left(1 + e^{\frac{F+q\varphi(x)-\frac{E_g}{2}}{kT}}\right) \left(1 + e^{\frac{E_g-F-q\varphi(x)}{kT}}\right)}{\left(1 + e^{\frac{F+q\varphi(x)}{kT}}\right) \left(1 + e^{\frac{\frac{E_g}{2}-F-q\varphi(x)}{kT}}\right)} \right), & \text{при } -w_n \leq x < (w_s - w_n), \\ 0, & \text{при } (w_s - w_n) \leq x \leq w_p + L \end{cases} \quad (5)$$

где N_{ss} – плотность поверхностных состояний в запрещённой зоне.

Концентрации $n(x)$, $p(x)$ рассчитываются по формулам [8]

$$n(x) = N_c e^{\frac{F-E_g+q\varphi(x)}{kT}}, \quad p(x) = N_v e^{\frac{-F-q\varphi(x)}{kT}}, \quad (6)$$

где N_c – эффективная плотность электронных состояний в окрестности дна зоны проводимости, N_v – эффективная плотность электронных состояний в окрестности вершины валентной зоны. Энергия отсчитывается от вершины валентной зоны в точке $x = w_p + L$.

Потенциал внутреннего электрического поля является решением уравнения Пуассона:

$$\frac{d^2}{dx^2} \varphi(x) = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)), \quad (7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость вещества, ε_0 – диэлектрическая постоянная, $N^{ion}(x)$ – суммарная концентрация ионизованных доноров и акцепторов.

Дополнительным условием для уравнения (7) является условие общей электронной-нейтральности:

$$\int_{-w_n}^{w_p+L} (p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)) dx = 0. \quad (8)$$

Из уравнения (7) и условия (8) следует, что

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=-w_n} = \left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=w_p+L}. \quad (9)$$

Вне рассматриваемой структуры в равновесных условиях напряженность электрического поля $E(x) = -\frac{d}{dx} \varphi(x)$ равна нулю, тогда условие (9) принимает вид

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x \leq -w_n} = 0. \quad (10)$$

Выбор начала отсчета потенциала произволен, поэтому считаем, что

$$\varphi(w_p + L) = 0. \quad (11)$$

Используя условие локальной нейтральности подложки, найдем равновесное значение F .

Из (10) следует, что $\varphi(x) = \varphi_0$ при $x \leq -w_n$. Константа φ_0 явно не задается, а определяется в итерационном процессе.

Уравнение (7) в разностной форме с дополнительными условиями (10, 11) решалось численно методом, изложенным в работах [9, 10].

Результаты моделирования. Расчёты проводились для кремниевой структуры с наноразмерными слоями одинаковой толщины $w_n = w_p = w_{p2}/2 = w$, толщиной поверхностного слоя $w_s = 1$ нм при температуре 300 К. Концентрация фосфора на поверхности $N_{pp} = 10^{20}$ см⁻³, бора в базе $N_{B0} = 10^{11}$ см⁻³, бора в подложке $N_{BB} = 10^{20}$ см⁻³. При этих значениях $N_p^{ion}(x) < N_c$, $|N_B^{ion}(x)| < N_v$ для всех $-w_n \leq x \leq w_p + L$, так что электронный и дырочный газ является невырожденным.

Функция $\varphi(x)$ монотонна при $N_{ss} = 0$. Влияние толщины слоев на потенциал $\varphi(x)$ и напряженность $E(x)$ внутреннего электрического поля при максимально возможном значении плотности поверхностных состояний $N_{ss} = 10^{15}$ см⁻² продемонстрировано на рис. 2–4. Существование максимума потенциала $\varphi_{max} = \varphi(x_m)$ (рис. 2) обусловлено отрицательно заряженными поверхностными состояниями, расположенными в запрещенной зоне выше уровня Ферми. Значение $\varphi(-w_n)$ минимизирует $|N_{ss}|$. Положительно ионизованные доноры экранируют отрицательный поверхностный заряд. В результате образуется поверхностная область пространственного заряда (ОПЗ), где $E(x) < 0$, с минимальным значением напряженности E_{min} (рис. 3).

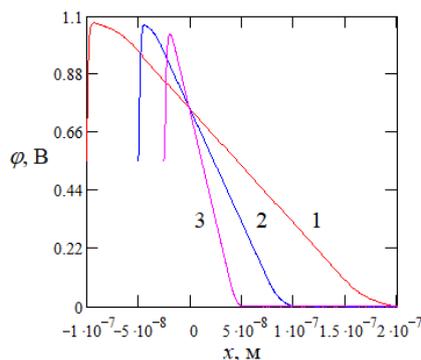


Рис. 2. Зависимость $\varphi(x)$ от толщины слоев: 1 – $w = 100$ нм, $\varphi_{max} = 1.073$ В; 2 – $w = 50$ нм, $\varphi_{max} = 1.066$ В; 3 – $w = 25$ нм, $\varphi_{max} = 1.032$ В

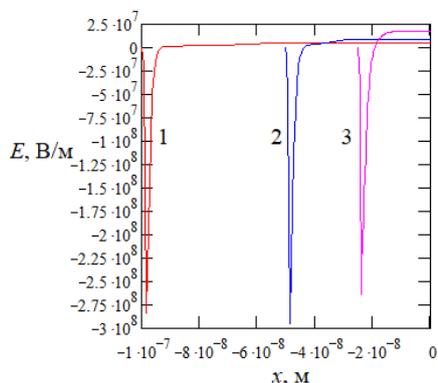


Рис. 3. Зависимость $E(x)$ от толщины n-слоя: 1 – $w_n = 100$ нм; 2 – $w_n = 50$ нм; 3 – $w_n = 25$ нм

Значение φ_{max} уменьшается с уменьшением толщины n -слоя (рис. 2). Положение максимума потенциала x_m , где $E(x_m) = 0$, приближается к металлургической границе $x = 0$ (рис. 3), так что ОПЗ поверхности при $w_n = 25$ нм соединяется с ОПЗ n - p_0 перехода, где $E(x) > 0$.

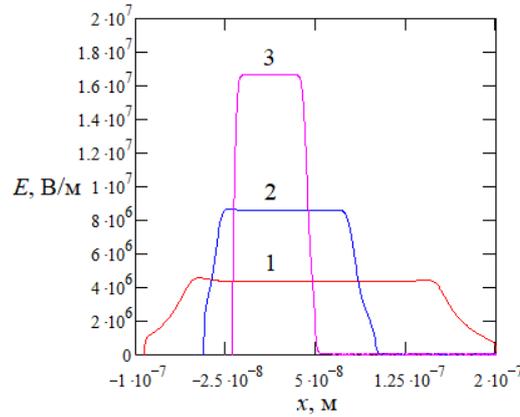


Рис. 4. Зависимость напряжённости от толщины слоев для $E(x) > 0$: 1 – $w = 100$ нм; 2 – $w = 50$ нм; 3 – $w = 25$ нм

В высокоомной области n - p_0 - p структуры напряжённость электрического поля приблизительно постоянна, $E(x) \approx E_0 > 0$ (рис. 4), отклонение от константы $|\Delta E(x)| \ll E_0$. Значение E_0 возрастает при уменьшении толщины базы, но выполняется неравенство $E_0 \ll |E_{min}|$.

Влияние плотности поверхностных состояний N_{ss} на $\varphi(x)$ и $E(x)$ показано на рис. 5 – рис. 7. Размеры слоев наноструктуры $w_n = w_p = \Delta w_p = 20$ нм выбраны так, что квантовыми эффектами можно пренебречь.

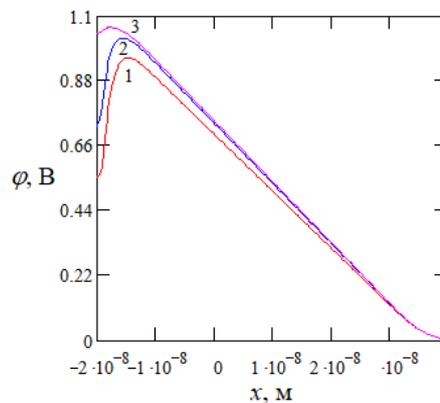


Рис. 5. Распределение электрического потенциала $\varphi(x)$ для различных значений плотности поверхностных состояний N_{ss} : 1 – $N_{ss} = 10^{15}$ $см^{-2}$; 2 – $N_{ss} = 10^{14}$ $см^{-2}$; 3 – $N_{ss} = 10^{13}$ $см^{-2}$

Значение максимума φ_{max} электрического потенциала в поверхностной области снижается, а его положение x_m приближается к металлургической границе при увеличении N_{ss} (рис. 5). Поверхностная область создает потенциальный барьер для транспорта носителей заряда приблизительно треугольной формы, максимальная высота этого барьера $h \approx E_g/2$, основание $a \approx 6$ нм при $N_{ss} = 10^{15}$ $см^{-2}$. Высота поверхностного барьера убывает с уменьшением N_{ss} . ОПЗ n - p_0 -перехода сливается с ОПЗ поверхности при $N_{ss} \geq 10^{13}$ $см^{-2}$. При

$N_{ss} \leq 10^{12} \text{ см}^{-2}$ поверхностные состояния практически не влияют на электрическое поле n -области. Чем меньше размер наноструктуры, тем сильнее влияние поверхности на электрическое поле в объеме.

На рис. 6, 7 показано изменение напряженности электрического поля в различных масштабах. Вектор напряженности электрического поля в поверхностной области противоположен вектору напряженности в базе и превышает его по модулю. Максимальное значение модуля напряженности $2.3 \cdot 10^8 \text{ В/м}$ при $N_{ss} = 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что увеличивает эффективную скорость поверхностной рекомбинации [10]. При уменьшении плотности поверхностных состояний менее 10^{12} см^{-2} этот эффект исчезает.

Размер области, в которой $E(x) \approx E_0$, превышает размер базы (рис. 7). Напряженность электрического поля E_0 возрастает с уменьшением плотности поверхностных состояний N_{ss} и достигает значения $E_{max} > 2.1 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ при $N_{ss} < 10^{13} \text{ см}^{-2}$. В таком электрическом поле происходит разогрев неравновесных носителей заряда, наблюдается нелинейная зависимость их дрейфовой скорости от напряженности электрического поля, пролетный режим транспорта, ударная ионизация и другие нелинейные эффекты [11–13].

В работе [14] исследовано распределение напряженности электрического поля в p - i - n структуре толщиной 250 мкм. Показано, что уменьшение подвижности электронов, дырок с ростом напряженности обуславливает пространственные осцилляции электрического поля и плотности заряда при увеличении плотности тока. Рассчитанное значение E_{max} в наноструктуре толщиной 20 нм много больше, чем в работе [14], и выходит за пределы применимости использованной в [14] зависимости подвижности от напряженности.

На рис. 8 показано распределение электрического потенциала и концентрации заряженных частиц при $N_{ss} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Концентрация ионизированных примесей взята по модулю, так как $N^{ion}(x) < 0$ при $x > 0$. Поверхностный потенциальный барьер пренебрежимо мал. Область положительного заряда, созданного ионизированными донорами, расположена при $-w_n < x < -8 \text{ нм}$, область отрицательного заряда, созданного ионизированными акцепторами, расположена при $26.4 \text{ нм} < x < 40 \text{ нм}$. Эти области создают электрическое поле в объеме с напряженностью E_0 (аналог плоскопараллельного конденсатора). Между ними находятся три области: 1 – обогащённая электронами при $-8 \text{ нм} < x < 7.2 \text{ нм}$, 2 – обеднённая носителями заряда при $7.2 \text{ нм} < x < 13.6 \text{ нм}$, 3 – обогащённая дырками при $13.6 \text{ нм} < x < 26.4 \text{ нм}$. Последние три области обуславливают малое отклонение напряженности $\Delta E(x)$ от E_0 .

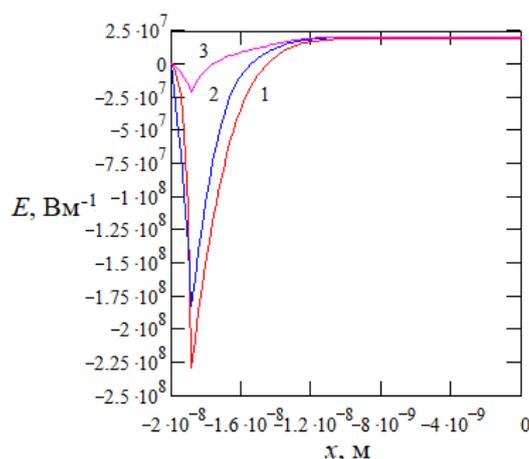


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля $E(x)$ в n -слое для различных значений плотности поверхностных состояний N_{ss} : 1 – $N_{ss} = 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 2 – $N_{ss} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 3 – $N_{ss} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$

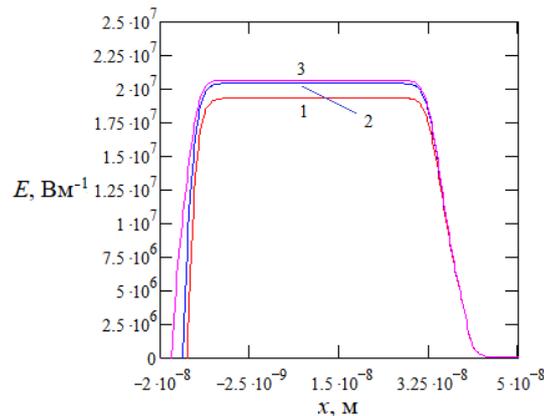


Рис. 7. Распределение положительных значений напряженности электрического поля $E(x)$ для различных значений плотности поверхностных состояний N_{ss} : 1 – $N_{ss} = 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 2 – $N_{ss} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 3 – $N_{ss} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$

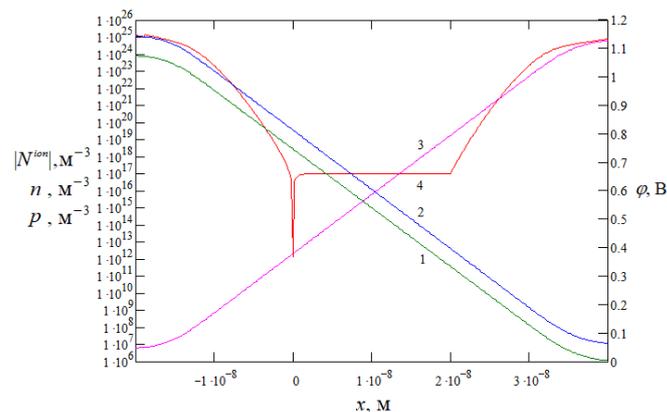


Рис. 8. Изменение 1 – $\varphi(x)$, 2 – $n(x)$, 3 – $p(x)$, 4 – $|N^{ion}(x)|$ в объёме наноразмерной n - p_0 - p структуры при $N_{ss} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$

Таким образом, условие квазинейтральности в базе не выполняется, распределение свободных носителей заряда образует зарядовый диполь.

Выводы. Выполнено численное моделирование кремниевой наноразмерной n - i - p структуры с диффузионным профилем легирования и учетом поверхностных состояний. Показано, что заряженные поверхностные состояния изменяют потенциал и напряженность электрического поля не только в поверхностной области, но и в объеме наноструктуры.

В литературе влияние поверхностных состояний на характеристики фотоэлектрических структур рассматривается прежде всего с точки зрения поверхностной рекомбинации неравновесных носителей заряда [15]. Для устранения этого эффекта рекомендуется уменьшить плотность поверхностных состояний до значения 10^{12} см^{-2} за счет пассивации поверхности пленкой диэлектрика [16]. Напряженность электрического поля в базе n - i - p структуры считается постоянной, а база – квазинейтральной при отсутствии электрического тока [17].

В результате численного решения уравнения Пуассона показано, что в наноразмерной n - i - p структуре значение напряженности в базе возрастает с уменьшением её толщины, но электрическое поле, созданное заряженными поверхностными состояниями, уменьшает это значение. При $N_{ss} \leq 10^{12} \text{ см}^{-2}$ влияние поверхностных состояний на электрическое поле n -области и базы пренебрежимо мало.

Таким образом, снижение плотности поверхностных состояний до 10^{12} см^{-2} не только уменьшает скорость поверхностной рекомбинации, но устраняет созданный ими поверхностный потенциальный барьер и отрицательное влияние на напряженность электрического поля в базе.

Рассчитанное значение напряженности поля в базе превышает критическое, при котором дрейфовая скорость электронов сравнивается с тепловой [18, 19]. В рассмотренном случае условие квазинейтральности в высокоомной базе не выполняется, наноразмерная база оказывается поляризованной.

Полученные результаты можно использовать для совершенствования полупроводниковых приборов. Большое значение напряженности электрического поля базы обеспечивает высокий квантовый выход лавинных фотодиодов [20, 21], *p-i-n* детекторов ионизирующего излучения [22, 23]. Возбуждение колебаний неравновесных носителей заряда *p-i-n* структуры даёт резонансное поглощение или излучение электромагнитных волн ТГц диапазона [24].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Даниленко А.А., Иванов А.Д., Иванов В.Л., Марочкин В.В., Михайлов Н.И., Перепеловский В.В. Характеристики *pin*-структуры с дискретно металлизированной поверхностью *i*-области // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 41-51.
2. Кочемасов В., Рауткин Ю. Интегральные СВЧ-переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2018. – № 4 (00175). – С. 122-127.
3. Резников В., Губырин Л. Высокочастотные и СВЧ *p-i-n*-диоды // Компоненты и технологии. – 2000. – № 3. – С. 1-2.
4. Яфаров Р.К. Влияние встроенного поверхностного потенциала на ВАХ кремниевых МДП структур // Микроэлектроника. – 2019. – Т. 48, № 2. – С. 155-159.
5. Александров О.В. Влияние интенсивности ионизирующего облучения на отклик МОП-структур // Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т. 55. – В. 2. – С. 152-158.
6. Волковский Ю.А., Серегин А.Ю., Фоломешкин М.С., Просеков П.А., Павлюк М.Д., Писаревский Ю.В., Благов А.Е., Ковальчук М.В. Исследование состояния приповерхностного слоя полированных кремниевых подложек методом рентгеновской рефлектометрии в зависимости от методов их очистки // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 9. – С. 40-48.
7. Юров В.М., Жанабергенов Т., Гученко С.А. Толщина поверхностного слоя типичных полупроводников // The scientific heritage. – 2020. – № 43. – С. 20-23.
8. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Лань, 2010. – 400 с.
9. Бозатов 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.
10. Бозатов Н.М., Володин В.С., Григорьян Л.Р., Коваленко М.С. Влияние поверхностных состояний на электрическое поле *n-p* перехода // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 266-275.
11. Щука А.А. Наноэлектроника. – М.: Юрайт, 2025. – 297 с.
12. Гуртов В.А. Твердотельная электроника. – М.: Техносфера, 2008. – 512 с.
13. Берикашвили В.Ш., Воробьев С.А. Твердотельная электроника и микроэлектроника. – М.: КноРус, 2023. – 301 с.
14. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю., Фадеев А.В., Калямин А.А. Пространственные осцилляции электрического поля и плотности заряда в кремниевом *p-i-n*-диоде // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – В. 21. – С. 104-110.
15. *Chai J.Y.-H., Wong B.T., Juodkazis S.* Black-silicon-assisted photovoltaic cells for better conversion efficiencies: a review on recent research and development efforts // Materials Today Energy. – 2020. – Vol. 18. – 100539. – P. 1-23.
16. *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 // Nat Nanotechnol. – 2015. – Vol. 10 (7). – 624-8. – P. 1-12.
17. Смирнов В.И. Физика полупроводниковых приборов. – Ульяновск: УлГТУ, 2022. – 203 с.
18. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники. – М.: Юрайт, 2025. – 463 с.

19. Дурнаков А.А. Физические основы микро- и наноэлектроники. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 247 с.
20. Shobitha G.S., Ghivela G.C. Potentiality of Avalanche Transit Time Devices for Biomedical Applications: A Comprehensive Review // Biomedical Materials & Devices. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00339-9>.
21. Wang B., Mu J. High-speed Si-Ge avalanche photodiodes // PhotonIX. – 2022. – Vol. 3. – I. 8. – P. 1-22.
22. Физика полупроводниковых преобразователей / под ред. А.Н. Саурова, С.В. Булярского. – М.: РАН, 2018. – 280 с.
23. Сауров М.А. Оптимизация параметров преобразователя излучения на основе кремниевого р–i–n диода // Известия вузов. Электроника. – 2023. – Т. 28. – В. 4. – С. 431-440.
24. Андрианов А.В. Генерация терагерцевого излучения в полупроводниках // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – В. 10. – С. 1633-1671.

REFERENCES

1. Danilenko A.A., Ivanov A.D., Ivanov V.L., Marochkin V.V., Mikhaylov N.I., Perepelovskiy V.V. Kharakteristiki pin-struktury s diskretno metallizirovannoy poverkhnost'yu i-oblasti [Characteristics of a pin structure with a discretely metallized surface of the i-region], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics], 2020, Vol. 23, No. 1, pp. 41-51.
2. Kochemasov V., Rautkin Yu. Integral'nye SVCh-pereklyuchateli [Integrated microwave switches], *ELEKTRONIKA: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [ELECTRONICS: Science, Technology, Business], 2018, No. 4 (00175), pp. 122-127.
3. Reznikov V., Gubyrin L. Vysokochastotnye i SVCh p-i-n-diody [High-frequency and microwave p-i-n-diodes], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2000, No. 3, pp. 1-2.
4. Yafarov R.K. Vliyanie vstroennogo poverkhnostnogo potentsiala na VAKh kremnievykh MDP struktur [Influence of built-in surface potential on the volt-ampere characteristic characteristics of silicon MIS structures], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2019, Vol. 48, No. 2, pp. 155-159.
5. Aleksandrov O.V. Vliyanie intensivnosti ioniziruyushchego oblucheniya na otklik MOP-struktur [Effect of ionizing radiation intensity on the response of MOS structures], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors], 2021, Vol. 55, Issue 2, pp. 152-158.
6. Volkovskiy Yu.A., Seregin A.Yu., Folomeshkin M.S., Prosekov P.A., Pavlyuk M.D., Pisarevskiy Yu.V., Blagov A.E., Koval'chuk M.V. Issledovanie sostoyaniya pripoverkhnostnogo sloya polirovannykh kremnievykh podlozhek metodom rentgenovskoy reflektometrii v zavisimosti ot metodov ikh ochkistki [Study of the state of the near-surface layer of polished silicon substrates by X-ray reflectometry depending on their cleaning methods], *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, Synchrotron and Neutron Studies], 2021, No. 9, pp. 40-48.
7. Yurov V.M., Zhanabergenov T., Guchenko S.A. Tolshchina poverkhnostnogo sloya tipichnykh poluprovodnikov [Surface layer thickness of typical semiconductors], *The scientific heritage*, 2020, No. 43, pp. 20-23.
8. Shalimova K.V. Fizika poluprovodnikov [Physics of semiconductors]. Moscow: Lan', 2010, 400 p.
9. Bogatov N.M. Chislennoe reshenie uravneniya Puassona v n-p perekhode s uchedom poverkhnostnykh sostoyaniy [Numerical solution of the Poisson equation in an n-p junction taking into account surface states], *Ekologicheskij vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2024, Vol. 21, No. 3, pp. 61-69.
10. Bogatov N.M., Volodin V.S., Grigor'yan L.R., Kovalenko M.S. Vliyanie poverkhnostnykh sostoyaniy na elektricheskoe pole n-p perekhoda [Influence of surface states on the electric field of an n-p junction], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 266-275.
11. Shchuka A.A. Naneoelktronika [Nanoelectronics]. Moscow: Yurayt, 2025, 297 p.
12. Gurtov V.A. Tverdotel'naya elektronika [Solid-state electronics]. Moscow: Tekhnosfera, 2008, 512 p.
13. Berikashvili V.Sh., Vorob'ev S.A. Tverdotel'naya elektronika i mikroelektronika [Solid-state electronics and microelectronics]. Moscow: KnoRus, 2023, 301 p.
14. Usanov D.A., Gorbatov S.S., Kvasko V.YU., Fadeev A.V., Kalyamin A.A. Prostranstvennyye ostsillyatsii elektricheskogo polya i plotnosti zaryada v kremnievom p-i-n-diode [Spatial oscillations of the electric field and charge density in a silicon p-i-n diode], *Pisma v ZhTF* [Letters to the Journal of Technical Physics], 2014, Vol. 40, Issue 21, pp. 104-110.
15. Chai J.Y.-H., Wong B.T., Juodkazis S. Black-silicon-assisted photovoltaic cells for better conversion efficiencies: a review on recent research and development efforts, *Materials Today Energy*, 2020, Vol. 18, 100539, pp. 1-23.

16. 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, *Nat Nanotechnol*, 2015, Vol. 10 (7), 624-8, pp. 1-12.
17. Smirnov V.I. Fizika poluprovodnikovyykh priborov [Physics of semiconductor devices]. Ulyanovsk: UIGTU, 2022, 203 p.
18. Starosel'skiy V.I. Fizika poluprovodnikovyykh priborov mikroelektroniki [Physics of semiconductor devices of microelectronics]. Moscow: Yurayt, 2025, 463 p.
19. Durnakov A.A. Fizicheskie osnovy mikro- i nanoelektroniki [Physical Foundations of micro- and nanoelectronics]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2020, 247 p.
20. Shobitha G.S., Ghivela G.C. Potentiality of Avalanche Transit Time Devices for Biomedical Applications: A Comprehensive Review, *Biomedical Materials & Devices*, 2025. Available at: <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00339-9>.
21. Wang B., Mu J. High-speed Si-Ge avalanche photodiodes, *PhotoniX*, 2022, Vol. 3, Issue 8, pp. 1-22.
22. Fizika poluprovodnikovyykh preobrazovateley [Physics of semiconductor converters], ed. by A.N. Saurova, S.V. Bulyarskogo. Moscow: RAN, 2018, 280 p.
23. Saurov M.A. Optimizatsiya parametrov preobrazovatelya izlucheniya na osnove kremnievogo p-i-n-dioda [Optimization of parameters of a radiation converter based on a silicon p-i-n diode], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Bulletin of Universities. Electronics], 2023, Vol. 28, Issue 4, pp. 431-440.
24. Andrianov A.V. Generatsiya teragertseвого izlucheniya v poluprovodnikakh [Generation of Terahertz Radiation in Semiconductors], *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics], 2023, Vol. 65, Issue 10, pp. 1633-1671.

Богатов Николай Маркович – Кубанский государственный университет; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79034513106; д.ф.-м.н.; профессор.

Володин Владимир Сергеевич – Кубанский государственный университет; e-mail: volodinvs1995@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79898203672; аспирант.

Григорьян Леонтий Рустемович – Кубанский государственный университет; e-mail: leonmezoon@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79181681719; к.ф.-м.н.; доцент.

Коваленко Максим Сергеевич – Кубанский государственный университет; e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79184694954; к.ф.-м.н.; доцент.

Bogatov Nikolay Markovich – Kuban State University; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79034513106; dr. of phys. and math.; professor.

Volodin Vladimir Sergeevich – Kuban State University; e-mail: volodinvs1995@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79898203672; graduate student.

Grigoryan Leontiy Rustemovich – Kuban State University; e-mail: leonmezoon@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79181681719; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Kovalenko Maxim Sergeevich – Kuban State University; e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79184694954; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 537.876

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-133-142

М. Пленингер, С.В. Балакирев, М.С. Солодовник

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1,3 МКМ В ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ GaAs С КОНФИГУРАЦИЕЙ ВОЛНОВОД–МИКРОРЕЗОНАТОР

Фотонные кристаллы – это полупроводниковые структуры, которые характеризуются периодическим изменением диэлектрической проницаемости в пространстве с периодом, соизмеримым с длиной волны электромагнитного излучения. Интерес к ним обусловлен как важностью фундаментальных исследований взаимодействия света с веществом, так и перспективами применения фотонных кристаллов в оптических интегральных схемах и компонентах оптоэлектроники нового поколения. В данной работе представлены результаты исследования закономерностей распространения электромагнитного излучения с длиной волны 1,3 мкм в двумерных фотонных