

УДК 621.382

EDN: NFAOЕК DOI: 10.31429/vestnik-21-3-61-69

Численное решение уравнения Пуассона в n – p переходе с учетом поверхностных состояний

Н. М. Богатов  

Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

 Богатов Николай Маркович; ORCID 0000-0002-9301-4545; SPIN 3221-6389; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

Аннотация. Уменьшение размеров полупроводниковых структур с n – p переходами — одна из тенденций развития современной электроники и оптоэлектроники. Физические законы приводят к увеличению вклада поверхностных свойств по отношению к объёмным. Электронные поверхностные состояния обладают электрофизическими и рекомбинационными свойствами, что существенно изменяет параметры субмикронных и наноструктур. Основные свойства n – p переходов объясняются распределением потенциала электрического поля, который является решением уравнения Пуассона. В работе предлагается новая численная модель распределения электрического поля n – p перехода, учитывающая плотность поверхностных состояний. С помощью этой модели выполнено численное моделирование n – p перехода с параметрами, соответствующими реальному диффузионному n – p переходу в кремнии. Показано, что вследствие заполнения поверхностных состояний электронами образуется поверхностный потенциальный барьер протяжённостью $4 \cdot 10^{-9}$ м, уменьшающий потенциальный барьер, созданный распределением доноров и акцепторов. Значение поверхностного потенциального барьера определяется моделью образования и заполнения поверхностных энергетических уровней.

Ключевые слова: n – p переход, потенциал электрического поля, уравнение Пуассона, поверхностные состояния, электроны, дырки, кремний.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Цитирование: 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. EDN: NFAOЕК. DOI: 10.31429/vestnik-21-3-61-69

Поступила 2 июля 2024 г. После доработки 16 августа 2024 г. Принято 22 августа 2024 г. Публикация 24 сентября 2024 г.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2024. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Numerical Solution of the Poisson Equation in the n – p Junction Taking Into Account Surface States

N. M. Bogatov 

Kuban State University, st. Stavropolskaya, 149, Krasnodar, 350040, Russia

 Nikolay M. Bogatov; ORCID 0000-0002-9301-4545; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

Abstract. Reducing the size of semiconductor structures with n – p junctions is one of the trends in the development of modern electronics and optoelectronics. Physical laws lead to an increase in the contribution of surface properties relative to volumetric ones. Electronic surface states have electrophysical and recombination properties, which significantly changes the parameters of submicron and nanostructures. The main properties of n – p junctions are explained by the distribution of the electric field potential, which is a solution to the Poisson equation. The work proposes a new numerical model of the electric field distribution of the n – p junction, taking into account the density of surface states. Using this model, a numerical simulation of the n – p junction was performed with parameters corresponding to the real diffusion n – p junction in silicon. It is shown that due to the filling of surface states with electrons, a surface potential barrier with a length of $4 \cdot 10^{-9}$ m is formed, which reduces the potential barrier created by the distribution of donors and acceptors. The value of the surface potential barrier is determined by the model of formation and filling of surface energy levels.

Keywords: n – p junction, electric field potential, Poisson's equation, surface states, electrons, holes, silicon.

Funding. The study did not have sponsorship.

Cite as: 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. DOI: 10.31429/vestnik-21-3-61-69

Received 2 July 2024. Revised 16 August 2024. Accepted 22 August 2024. Published 24 September 2024.

The author declare no competing interests.

© The Author(s), 2024. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Характеристики полупроводниковых приборов во многом зависят от координатной зависимости внутреннего электрического поля. Вольтамперная характеристика (ВАХ) является одной из важнейших характеристик и определяется как объемными, так и поверхностными свойствами прибора. Исследование ВАХ диодов, транзисторов и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) позволяет изучить эти свойства [1–3]. В основе анализа ВАХ лежат теоретические модели распределения электрического поля и переноса электронов и дырок в полупроводниковых структурах [4].

Уменьшение размеров современных полупроводниковых приборов с n - p переходами приводит к возрастанию вклада поверхностных свойств, так как электронные поверхностные состояния являются причиной формирования поверхностного заряда и поверхностной рекомбинации. Эти факты неоднократно обсуждались в научной литературе. Например, неравновесный поверхностный заряд на границе Si–SiO₂ обуславливает снижение эффективности собирания электронов, дырок в ФЭП [5, 6]; туннельно-рекомбинационные переходы электронов через поверхностные энергетические уровни на границе раздела Si–ITO препятствуют разделению фотогенерированных электронов, дырок [7]; поверхностный заряд создаёт поверхностный электрический потенциальный барьер, который препятствует перемещению электронов и дырок через поверхность [8]. Результаты исследований электрического поля в поверхностной области открывают дополнительные возможности для повышения стабильности диодов [9] и эффективности ФЭП [10].

Физические причины возникновения энергетических уровней в поверхностной области различны: нарушения трансляционной симметрии на границах кристалла — таммовские состояния, поверхностные уровни Шокли, уровни, созданные дефектами решетки и примесями. Плотность поверхностных электронных состояний N_{ss} принимает значения $10^{15} \div 10^{19} \text{ м}^{-2}$, зависит от содержания газов в атмосфере, обработки поверхности [11], облучения ионизирующими частицами [12] и других факторов. Современные технологические методы обработки и очистки поверхности кремния позволяют уменьшить толщину поверхностного слоя w_{surf} до $\sim 10^{-9} \text{ м}$ [13], что согласуется с оценкой $2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ [14].

В работе предлагается новая численная модель распределения электрического поля n - p перехода, учитывающая плотность поверхностных состояний.

1. Модель заполнения поверхностных состояний электронами

Энергетический спектр плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне обозначим $r(E)$. Плотность заряженных поверхностных состояний N_{sq} вычисляется с помощью статистики Ферми–Дирака.

Примем следующее правило заполнения электронами поверхностных состояний. В равновесном состоянии суммарный электрический заряд на поверхности собственного полупроводника равен нулю при $T = 0 \text{ К}$. Это означает, что энергетические уровни, обусловленные нарушениями атомной структуры полупроводника, расположенные ниже середины запрещенной зоны, заполнены и нейтральны (донорные состояния), а расположенные выше середины запрещенной зоны свободны и нейтральны (акцепторные состояния), так как уровень Ферми находится

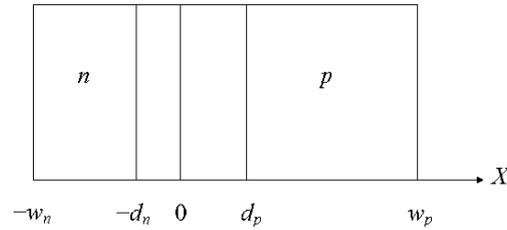


Рис. 1. Схема n - p перехода

Fig. 1. n - p junction diagram

по середине запрещенной зоны. Тогда при $T \neq 0$ К плотность заряженных поверхностных состояний равна

$$N_{sq} = \int_0^{\frac{E_g}{2}} \frac{r(E) dE}{1 + e^{\frac{F-E}{kT}}} - \int_{\frac{E_g}{2}}^{E_g} \frac{r(E) dE}{1 + e^{\frac{E-F}{kT}}}, \quad (1.1)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны, F — уровень Ферми, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. В формуле (1.1) энергия отсчитывается от вершины валентной зоны.

Вид функции $r(E)$ определяется квантовой структурой поверхности и присутствием на ней чужеродных атомов и молекул. Моделирование атомной структуры поверхности не является целью данной работы. Далее используем равномерное распределение спектра плотности поверхностных состояний

$$r(E) = \begin{cases} \frac{N_{ss}}{E_g}, & E \in [0, E_g]; \\ 0, & E \notin [0, E_g]. \end{cases} \quad (1.2)$$

Из формул (1.1) и (1.2) получим

$$N_{sq} = \frac{N_{ss} kT}{E_g} \ln \frac{\left(1 + e^{\frac{F - \frac{E_g}{2}}{kT}}\right) \left(1 + e^{\frac{E_g - F}{kT}}\right)}{\left(1 + e^{\frac{F}{kT}}\right) \left(1 + e^{\frac{\frac{E_g}{2} - F}{kT}}\right)}. \quad (1.3)$$

2. Численная модель распределения электрического поля n - p перехода

Модель распределения электрического поля n - p перехода основана на численном решении уравнения Пуассона. Это уравнение используется для описания физических процессов в различных областях науки и техники, что стимулирует разработку новых алгоритмов [15–19].

Объектом исследования является планарный n - p переход, предметом исследования — потенциал электрического поля $\varphi(x)$. Пространственная схема n - p перехода показана на рис. 1. Эмиттер n -типа проводимости расположен при $-w_n \leq x \leq -d_n$, где w_n — глубина залегания n - p перехода. Область, обедненная носителями заряда, (ООНЗ) расположена при $-d_n < x < d_p$. База p -типа проводимости расположена при $d_p \leq x \leq w_p$, где w_p — толщина базы, $w_p \gg d_p$.

Электрическое поле n - p перехода создается распределением заряженных частиц: дырок $p(x)$, электронов $n(x)$, доноров $N_D^{\text{ion}}(x)$, акцепторов N_A^{ion} , а также состояниями на поверхности эмиттера N_s .

Потенциал электрического поля является решением уравнения

$$\frac{d^2}{dx^2} \varphi(x) = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p(\varphi) - n(\varphi) + N^{\text{ion}}(x, \varphi) + N_s(\varphi)), \quad (2.1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость вещества, ε_0 — диэлектрическая постоянная, q — элементарный заряд, $N^{\text{ion}}(x, \varphi) = N_D^{\text{ion}}(x, \varphi) - N_A^{\text{ion}}(\varphi)$.

Совместим начало отсчета энергии с вершиной валентной зоны на границе базы $x = w_p$, тогда $\varphi(w_p) = 0$. Дополнительным условием для уравнения (2.1) является физически выполняющееся условие общей электронейтральности структуры

$$\int_{-w_n}^{w_p} (p(\varphi(x)) - n(\varphi(x)) + N^{\text{ion}}(x, \varphi(x)) + N_s(\varphi(x))) dx = 0. \quad (2.2)$$

Из (2.1) и (2.2) следует, что

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=-w_n} = \left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=w_p}. \quad (2.3)$$

Напряженность электрического поля $E(x) = -\frac{d}{dx} \varphi(x)$ в равновесных условиях в базе равна нулю. В этом случае условие (2.3) принимает вид

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x \leq -w_n} = 0. \quad (2.4)$$

Уровень Ферми в равновесии пространственно не изменяется, однако положение вершины валентной зоны $E_v(x) = -q\varphi(x)$, а дна зоны проводимости $E_c(x) = E_g - q\varphi(x)$, поэтому изменение концентраций электронов и дырок в невырожденном полупроводнике определяется следующими формулами:

$$n(\varphi) = N_c e^{\frac{F - E_g + q\varphi(x)}{kT}}, \quad p(\varphi) = N_v e^{\frac{-F - q\varphi(x)}{kT}}, \quad (2.5)$$

где N_c — эффективная плотность электронных состояний в окрестности дна зоны проводимости, N_v — эффективная плотность электронных состояний в окрестности вершины валентной зоны.

Аналогично в формуле (1.3) следует учесть пространственное изменение вершины валентной зоны. В уравнении (2.1) $N_s(x)$ — объемная концентрация, тогда как в (1.3) N_{sq} — поверхностная плотность. Поверхностные уровни существуют в поверхностном слое толщиной $w_{\text{surf}} \approx 10^{-9}$ м, где их концентрация $N_{\text{surf}} = N_{ss}/w_{\text{surf}}$. Глубина n - p перехода $w_n \gg w_{\text{surf}}$, поэтому представим $N_s(x)$ в следующем виде:

$$N_s(\varphi) = \begin{cases} \frac{N_{\text{surf}} kT}{E_g} \ln \frac{\left(1 + e^{\frac{F + q\varphi(x) - E_g}{kT}}\right) \left(1 + e^{\frac{E_g - F - q\varphi(x)}{kT}}\right)}{\left(1 + e^{\frac{F + q\varphi(x)}{kT}}\right) \left(1 + e^{\frac{E_g}{2} - \frac{F - q\varphi(x)}{kT}}\right)}, & x = -w_n; \\ 0, & x \neq -w_n. \end{cases} \quad (2.6)$$

Распределение примесей соответствует модели диффузии доноров из неограниченного источника с поверхности эмиттера в пластину, содержащую однородную концентрацию акцепторов. Концентрация доноров

$$N_D(x) = N_{D0} \operatorname{erfc} \left(\frac{(x + w_n)}{x_0} \right), \quad (2.7)$$

где N_{D0} — концентрация доноров на поверхности $x = -w_n$, $x_0 = 2\sqrt{D_d t_d}$, D_d — коэффициент диффузии доноров, зависящий от температуры, t_d — время диффузии. Концентрация акцепторов $N_A = \text{const}$.

В зависимости от температуры и положения уровня Ферми не все доноры и акцепторы являются ионизованными. Концентрации ионизованных доноров и акцепторов равны

$$N_D^{\text{ion}}(x, \varphi) = \frac{N_D(x)}{1 + g_d e^{\frac{F + q\varphi(x) - E_g + E_d}{kT}}}, \quad N_A^{\text{ion}}(\varphi) = \frac{N_A}{1 + g_a e^{\frac{E_a - F - q\varphi(x)}{kT}}}, \quad (2.8)$$

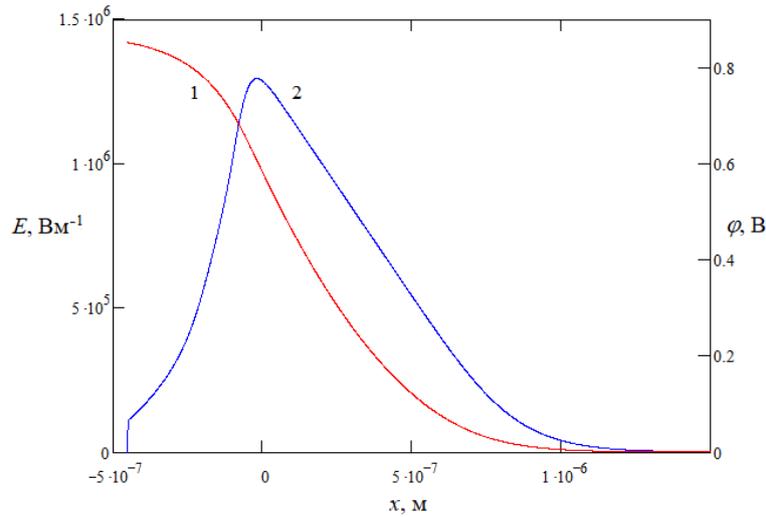


Рис. 2. Потенциал и напряженность электрического поля n - p перехода при $N_{surf} = 0$:
1 — потенциал $\varphi(x)$, 2 — напряженность $E(x)$

Fig. 2. Potential and electric field strength of n - p junction at $N_{surf} = 0$: 1 — potential $\varphi(x)$, 2 — strength $E(x)$

где E_d — энергетический уровень донорной примеси, отсчитанный от дна зоны проводимости, g_d — фактор вырождения донорного уровня, E_a — энергетический уровень акцепторной примеси, отсчитанный от вершины валентной зоны, g_a — фактор вырождения акцепторного уровня. Положение металлургической границы n - p перехода определяется условием $N_D(0) = N_A$, из которого определяется параметр x_0 в формуле (2.7).

Равновесное значение F определяется из условия локальной нейтральности базы

$$p(w_p) - n(w_p) + N^{ion}(w_p) = 0.$$

Из граничного условия (2.4) следует, что $\varphi(x) = \varphi_0$ при $x \leq -w_n$. Значение φ_0 не задается, а определяется в процессе численного решения уравнения (2.1) методом последовательных итераций.

Уравнение (2.1) в разностной форме имеет вид

$$\frac{\varphi^j(x-h) - 2\varphi^j(x) + \varphi^{j-1}(x+h)}{h^2} = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \left(N_v e^{\frac{-F-q\varphi^j(x)}{kT}} - N_c e^{\frac{F-E_g+q\varphi^j(x)}{kT}} + N^{ion}(x, \varphi^j(x)) + N_s(\varphi^j(x)) \right), \quad (2.9)$$

где h — шаг дискретизации, j — номер итерации.

Граничные условия для уравнения (2.9): $\varphi^j(-w_n - h) = \varphi^j(-w_n)$, $\varphi^j(w_p) = 0$. Выбор начального приближения для $j = 0$ определяется условиями решаемой задачи. Одним из возможных условий является уравнение локальной нейтральности

$$N_v e^{\frac{-F-q\varphi^0(x)}{kT}} - N_c e^{\frac{F-E_g+q\varphi^0(x)}{kT}} + N^{ion}(x, \varphi^0(x)) + N_s(\varphi^0(x)) = 0. \quad (2.10)$$

Алгебраические уравнения (2.9) решались относительно $\varphi^j(x_i)$ численно методом биекций в каждой точке $x_i = -w_n + i \cdot h$, $i = 0, 1, \dots, K-1$, $K = (w_p + w_n)/h$, используя известные из предыдущей итерации $\varphi^{j-1}(x_i)$. Вычисления прекращались при достижении условия (2.2).

3. Результаты моделирования и их обсуждение

Распределение примесей создано диффузией фосфора в пластину кремния, легированную бором. Параметры концентрации примесей: $N_{D0} = 10^{26} \text{ м}^{-3}$, $N_A = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Глубина залегания

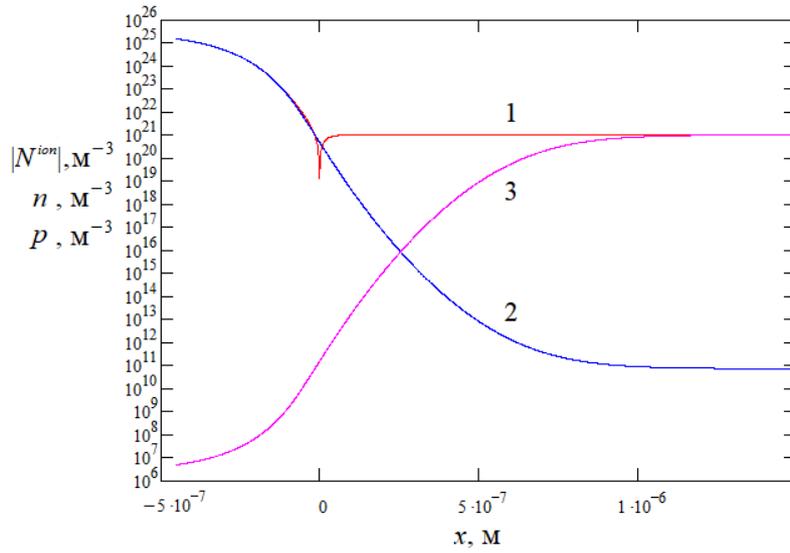


Рис. 3. Концентрации заряженных частиц при $N_{surf} = 0$: 1 — модуль концентрации ионизованных примесей $|N^{ion}|$, 2 — концентрация электронов n , 3 — концентрация дырок p

Fig. 3. Concentrations of charged particles at $N_{surf} = 0$: 1 — modulus of concentration of ionized impurities $|N^{ion}|$, 2 — electron concentration n , 3 — hole concentration p

диффузионного n - p перехода $w_n = 0,45 \cdot 10^{-6}$ м, так что n - p переход является достаточно плавным, и размером области, обогащенной электронами [20], в области пространственного заряда (ОПЗ) можно пренебречь.

Результаты расчетов при $T = 300$ К, не учитывающие поверхностные состояния, показаны на рис. 2, 3. Максимальное значение концентрации ионизованных доноров $N^{ion}(-w_n, \varphi(-w_n)) = 1,46 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ (рис. 3) меньше $N_c = 2,74 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Концентрация акцепторов $N_A \ll N_v$. Следовательно, носители заряда не вырождены, формулы (2.5) применимы.

Размер ООЗ меньше, чем ОПЗ (рис. 3). В ООЗ $n(x), p(x) \ll |N^{ion}|$, следовательно, $d_n \approx 0, d_p \approx 0,75 \cdot 10^{-6}$ м. Концентрация электронов n меньше, но порядка N^{ion} при $-w_n \leq x < -d_n$, следовательно, весь эмиттер содержит положительный заряд и входит в ОПЗ. Размер части ОПЗ, содержащей отрицательный заряд, созданный ионизованными акцепторами, превышает d_p . В равновесном n - p переходе изменение электрического потенциала в ООЗ $\varphi(-d_n) - \varphi(d_p) \approx 0,6$ В (рис. 2).

Влияние поверхностных состояний в эмиттере n -типа на $\varphi(x)$ продемонстрировано на рис. 4. В расчетах использовались значения $N_{ss} = 10^{19} \text{ м}^{-2}, N_{surf} = 10^{28} \text{ м}^{-3}$. На рис. 4 сравниваются три случая: 1 — поверхностный заряд отсутствует, 2 — поверхностный заряд определяется статистикой Ферми-Дирака (формула (2.6)), 3 — все поверхностные состояния заряжены отрицательно (формула (3.1)).

$$N_s(x) = \begin{cases} -N_{surf}, & x = -w_n; \\ 0, & x \neq -w_n. \end{cases} \quad (3.1)$$

В полупроводнике n -типа поверхностные состояния имеют суммарный отрицательный заряд, а в полупроводнике p -типа — положительный. В результате происходит образование электрического потенциального барьера $\Delta\varphi_s$ в поверхностной области толщиной $w_e \approx 4 \cdot 10^{-9}$ м (рис. 4), $w_e > w_{surf}$. Значение $\Delta\varphi_s$ зависит от спектра плотности поверхностных состояний $r(E)$ и закона их заполнения. Если N_s определяется формулой (2.6), то при увеличении N_{ss} происходит только компенсация типа проводимости, а $q\Delta\varphi_s$ приближается к $E_g/2$, если N_s определяется формулой (3.1), то происходит сильная инверсия типа проводимости, когда $q\Delta\varphi_s > E_g/2$. На рис. 4 $\Delta\varphi_s = -0,5$ В в случае 2, $\Delta\varphi_s = -1,27$ В в случае 3.

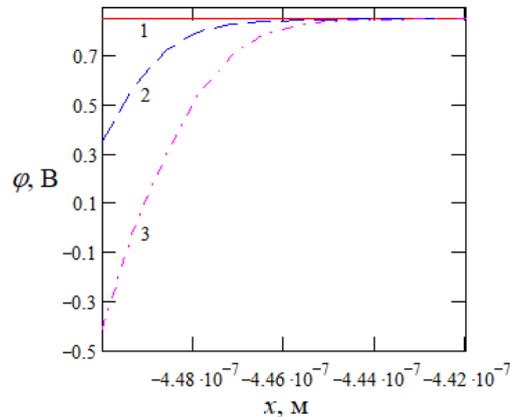


Рис. 4. Потенциал электрического поля в поверхностной области эмиттера для различных значений N_s : 1 — $N_s = 0$, 2 — формула (2.6), 3 — формула (3.1)

Fig. 4. Electric field potential in the surface region of the emitter for different values of N_s : 1 — $N_s = 0$, 2 — formula (2.6), 3 — formula (3.1)

Заключение

В работе предложена новая численная модель равновесного n - p перехода, учитывающая влияние поверхностных состояний на потенциал внутреннего электрического поля. Получена формула для расчета плотности заряда, созданного нарушениями атомной структуры на поверхности. Разработан численный метод решения уравнения Пуассона с граничными условиями, содержащими зависимость поверхностного заряда от потенциала электрического поля.

Выполнено численное моделирование n - p перехода с параметрами, соответствующими реальному диффузионному n - p переходу в кремнии. Рассчитанное значение изменения электрического потенциала во всём n - p переходе $\varphi_0 = 0,85$ В без учета поверхностных состояний (рис. 2).

Показано, что вследствие заполнения поверхностных состояний электронами образуется поверхностный потенциальный барьер $\Delta\varphi_s$ протяжённостью $w_e \approx 4 \cdot 10^{-9}$ м (рис. 4), уменьшающий φ_0 . Значение $\Delta\varphi_s$ определяется моделью образования и заполнения поверхностных энергетических уровней. Статистика Ферми–Дирака (формула (2.6)) регулирует значение $\Delta\varphi_s$, уменьшая влияние поверхностного заряда. Таким образом, реализуется общий закон природы, проявляющийся в процессах саморегуляции.

Литература [References]

1. Кондратенко, В.С., Куроедов, А.В., Рыжиков, И.В., Метод неразрушающего контроля надежности PIN фотодиодов по вольт-амперным характеристикам. *Прикладная физика*, 2010, № 2, с. 67–73. [Kondratenko, V.S., Kuroyedov, A.V., Ryzhikov, I.V., Method of non-destructive testing of the reliability of PIN photodiodes based on current-voltage characteristics. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2010, no. 2, pp. 67–73. (in Russian)]
2. Артамонов, А.В., Астахов, В.П., Карпов, В.В., Чижко, В.Ф., Левшин, В.Л., Расчет фотоэлектрических характеристик фотодиодных матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 2,0–3,5 мкм на основе арсенида индия. *Прикладная физика*, 2011, № 6, с. 145–148. [Artamonov, A.V., Astakhov, V.P., Karpov, V.V., Chishko, V.F., Levshin, V.L., Calculation of photoelectric characteristics of photodiode matrix photodetector devices with a spectral range of 2.0–3.5 microns based on indium arsenide. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2011, no. 6, pp. 145–148. (in Russian)]
3. Трегулов, В.В., Литвинов, В.Г., Ермачихин, А.В., Механизмы токопрохождения в полупроводниковой структуре фотоэлектрического преобразователя с n^+ — p -переходом и антиотражающей пленкой пористого кремния, сформированной методом окрашивающего травления. *Журнал технической физики*, 2019, т. 89, вып. 5, с. 737–743. [Tregulov, V.V., Litvinov, V.G., Ermachikhin,

- A.V., Mechanisms of current flow in the semiconductor structure of a photoelectric converter with an $n^+ - p$ junction and an anti-reflection film of porous silicon formed by color etching. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*, 2019, vol. 89, iss. 5, pp. 737–743. (in Russian)] DOI: [10.21883/JTF.2019.05.47477.237-18](https://doi.org/10.21883/JTF.2019.05.47477.237-18)
4. Pulfrey, D.L., *Understanding Modern Transistors and Diodes*. Cambridge, Cambridge University Press, 2010.
 5. Богатов, Н.М., Корнеев, А.И., Матвейкин, М.П., Родоманов, Р.Р., Влияние неравновесного заряда границы SiO_2 -Si на нестационарность спектральной характеристики солнечных элементов с субмикронным p - n -переходом. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2006, № 4, с. 63–67. [Bogatov, N.M., Korneev, A.I., Matveyakin, M.P., Rodomanov, R.R., The influence of the nonequilibrium charge of the SiO_2 -Si boundary on the nonstationarity of the spectral characteristics of solar cells with a submicron p - n junction. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2006, no. 4, pp. 63–67. (in Russian)]
 6. Богатов, Н.М., Матвейкин, М.П., Першин, Н.В., Родоманов, Р.Р., Определение времени захвата неравновесного поверхностного заряда в полупроводниковых структурах по спаду фотоэдс. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2008, № 2, с. 57–61. [Bogatov, N.M., Matveyakin, M.P., Pershin, N.V., Rodomanov, R.R., Determination of the time of capture of a nonequilibrium surface charge in semiconductor structures by the decrease in photovoltage. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2008, no. 2, pp. 57–61. (in Russian)]
 7. Симашкевич, А.В., Шербан, Д.А., Брук, Л.И., Фёдоров, В.М., Коваль, А., Усатый, Ю.В., Особенности механизма прохождения тока через изотипную структуру ИТО/ n SI. *Электронная обработка материалов*, 2010, № 1, с. 44–47. [Simashkevich, A.V., Sherban, D.A., Brook, L.I., Fedorov, V.M., Koval, A., Usatyy, Yu.V., Features of the mechanism of current passage through the isotype ITO/ n SI structure. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic processing of materials*, 2010, no. 1, pp. 44–47. (in Russian)]
 8. Deng, S., Xu, R., Li, M., Li, L., Wang, Z.L., Zhang, Q., Influences of surface charges and gap width between p -type and n -type semiconductors on charge pumping. *Nano Energy*, 2020, vol. 78, art. 105287. DOI: [10.1016/j.nanoen.2020.105287](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105287)
 9. Papež, V., Hájek, J., Kojecký, B., Influence of surface states on the reverse and noise properties of silicon power diodes. *IET Circuits Devices Syst.*, 2014, vol. 8, iss. 3, pp. 213–220. DOI: [10.1049/iet-cds.2013.0219](https://doi.org/10.1049/iet-cds.2013.0219)
 10. Мельник, Н.Н., Трегулов, В.В., Скопцова, Г.Н., Иванов, А.И., Косцов, Д.С., Свойства p - n -перехода, сформированного в пленке пористого кремния, выращенной металл-стимулированным травлением. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 2022, № 9, с. 3–10. [Melnik, N.N., Tregulov, V.V., Skoptsova, G.N., Ivanov, A.I., Kostsov, D.S., Properties of a p - n junction formed in a porous silicon film grown by metal-stimulated etching. *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN = Brief reports on physics of the FIAN*, 2022, no. 9, pp. 3–10 (in Russian)]
 11. Яфаров, Р.К., Влияние встроенного поверхностного потенциала на ВАХ кремниевых МДП структур. *Микроэлектроника*, 2019, т. 48, № 2, с. 155–159. [Yafarov, R.K., The influence of the built-in surface potential on the current-voltage characteristics of silicon MIS structures. *Mikroelektronika = Microelectronics*, 2019, vol. 48, no. 2, pp. 155–159. (in Russian)] DOI: [10.1134/S0544126919010095](https://doi.org/10.1134/S0544126919010095)
 12. Александров, О.В., Влияние интенсивности ионизирующего облучения на отклик МОП-структур. *Физика и техника полупроводников*, 2021, т. 55, вып. 2, с. 152–158. [Alexandrov, O.V., Effect of ionizing radiation intensity on the response of MOS structures. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*, 2021, vol. 55, iss. 2, pp. 152–158. (in Russian)] DOI: [10.21883/FTP.2021.02.50502.9533](https://doi.org/10.21883/FTP.2021.02.50502.9533)
 13. 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. [Volkovsky, Yu.A., Seregin, A.Yu., Folomeshkin, M.S., Prosekov, P.A., Pavlyuk, M.D., Pisarevsky, Yu.V., Blagov, A.E., Kovalchuk, M.V., Study of the state of the surface layer of polished silicon substrates using X-ray reflectometry depending on the methods of their cleaning. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya = Surface. X-ray, synchrotron and neutron research*, 2021, no. 9, pp. 40–48. (in Russian)] DOI: [10.31857/S102809602109020X](https://doi.org/10.31857/S102809602109020X)

14. Юров, В.М., Жанабергенов, Т., Гученко, С.А., Толщина поверхностного слоя типичных полупроводников. *The Scientific Heritage*, 2020, № 43, с. 20–23. [Yurov, V.M., Zhanabergenov, T., Guchenko, S.A., Surface layer thickness of typical semiconductors. *The Scientific Heritage*, 2020, no. 43, pp. 20–23 (in Russian)]
15. Уртенев, К.М., Коваленко, А.В., Чубырь, Н.О., Хромых, А.А., Краевая задача для плотности тока в области пространственного заряда. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2010, № 1, с. 70–73. [Urtenov, K.M., Kovalenko, A.V., Chubyr, N.O., Khromykh, A.A., Boundary value problem for current density in the space charge region. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2010, no. 1, pp. 70–73. (in Russian)]
16. Коваленко, А.В., Чубырь, Н.О. Узденова, А.М., Уртенев, М.Х., Численно-аналитический метод решения краевых задач для системы уравнений Нернста-Планка и Пуассона. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2022, т. 19, № 3, с. 6–16. [Kovalenko, A.V., Chubyr, N.O. Uzdenova, A.M., Urtenov, M.Kh., Numerical-analytical method for solving boundary value problems for the system of Nernst-Planck and Poisson equations. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 6–16. (in Russian)] DOI: 10.31429/vestnik-19-3-6-16
17. Данилкин, Е.А., Старченко, А.В., Каратаева, Е.А., Юмин, К.В., Дель, И.В., Смиян, Н.С., Лещинский, Д.В., Параллельная реализация некоторых итерационных методов для решения системы линейных алгебраических уравнений в мезомасштабной метеорологической модели атмосферного пограничного слоя. *Десятая Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям. Сборник статей*. Томск, 5–7 октября 2021, г. Томск: Издательство НТЛ, 2021, с. 18–28. [Danilkin, E.A., Starchenko, A.V., Karataeva, E.A., Yumin, K.V., Del, I.V., Smiyan, N.S., Leshchinsky, D.V., Parallel implementation of some iterative methods for solving a system of linear algebraic equations in a mesoscale meteorological model of the atmospheric boundary layer. *Desyataya Sibirskaya konferentsiya po parallel'nym i vysokoproizvoditel'nyim vychisleniyam. Sbornik statey = Tenth Siberian Conference on Parallel and High-Performance Computing. Digest of articles*. Tomsk, October 5–7, 2021, Tomsk: NTL Publishing House, 2021. pp. 18–28. (in Russian)]
18. Кенжебек, Е.Г., Иманкулов, Т.С., Ахмед-Заки, Д.Ж., Параллельный алгоритм решения уравнения Пуассона на основе технологии MPI+OPENMP. *Проблемы оптимизации сложных систем. Материалы XIV Международной Азиатской школы-семинара*. Алматы, 20–31 июля 2018 г. Алматы: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК, 2018, с. 307–315. [Kenzhebek, E.G., Imankulov, T.S., Akhmed-Zaki, D.Zh., A parallel algorithm for solving the Poisson equation based on MPI+OPENMP technology. *Problemy optimizatsii slozhnykh sistem. Materialy XIV Mezhdunarodnoy Aziatskoy shkoly-seminara = Problems of optimization of complex systems. Materials of the XIV International Asian School-Seminar*. Almaty, July 20–31, 2018 Almaty: Institute of Information and Computing Technologies of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, 2018, pp. 307–315. (in Russian)]
19. Мингалев, О.В., Мельник, М.Н., Численное решение краевых задач для уравнения Пуассона методом быстрого преобразования Фурье с использованием параллельных вычислений. *Труды Кольского научного центра РАН*, 2018, т. 9, вып. 5, с. 165–182. [Mingalev, O.V., Melnik, M.N., Numerical solution of boundary value problems for the Poisson equation by the fast Fourier transform method using parallel computing. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proc. of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 9, iss. 5, pp. 165–182. (in Russian)]
20. Богатов, Н.М., Распределение заряда в резком несимметричном равновесном n - p -переходе. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2016, № 3, с. 12–17. [Bogatov, N.M., Charge distribution in a sharp asymmetric equilibrium n - p junction. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2016, no. 3, pp. 12–17. (in Russian)]