

Раздел IV. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-266-275

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

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ N-P ПЕРЕХОДА

Структура и свойства полупроводниковых приборов в значительной степени зависят от распределения внутреннего электрического поля, которое создается распределением ионизированных примесей. Одним из способов контролируемого введения доноров, акцепторов является их диффузия в объем полупроводника. Существование поверхностных электронных состояний в зоне запрещенных энергий неконтролируемым образом влияет на распределение электрического поля в поверхностной области. Целью исследования является анализ влияния поверхностных состояний на распределение электрического поля в диффузионном n-p переходе. Задачи исследования. 1 – Разработать алгоритм численного решения уравнения Пуассона, учитывающий общую электронейтральность n-p перехода и плотность поверхностных состояний в эмиттере. 2 – Рассчитать численно распределения электрического потенциала, напряжённости электрического поля, концентрации электронов и дырок в диффузионном n-p переходе. 3 – Проанализировать влияние поверхностных состояний на изменение внутреннего электрического поля и скорость поверхностной рекомбинации неравновесных носителей заряда. В результате численно промоделировано влияние поверхностных состояний на распределение электрического поля в диффузионном n-p переходе в кремнии. Модель основана на численном решении уравнения Пуассона с граничными условиями, включающими условие общей электронейтральности образца. Показано, что плотность электронных состояний на поверхности эмиттера создает узкую область распределения плотности электрического заряда. Максимальное значение модуля напряжённости электрического поля в этой области превышает аналогичное значение в n-p переходе в три раза и более. Напряжённость электрического поля, обусловленная поверхностным зарядом, направляет неосновные носители заряда к поверхности, что повышает эффективную скорость их рекомбинации. Уменьшение плотности поверхностного заряда или изменение его знака является одной из задач технологии полупроводниковых приборов.

N-p переход; потенциал электрического поля; уравнение Пуассона; поверхностные состояния; электроны; дырки; кремний.

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

INFLUENCE OF SURFACE STATES ON THE ELECTRIC FIELD OF THE N-P JUNCTION

The structure and properties of semiconductor devices largely depend on the distribution of the internal electric field, which is created by the distribution of ionized impurities. One of the methods for the controlled introduction of donors and acceptors is their diffusion into the bulk of the semiconductor. The existence of surface electronic states in the band of forbidden energies has an uncontrollable effect on the distribution of the electric field in the surface region. The purpose of the study is to analyze the influence of surface states on the distribution of the electric field in a diffusion n-p junction. Research objectives. 1 – Develop an algorithm for the numerical solution of the Poisson equation, taking into account the general electrical neutrality of the n-p junction and the density of surface states in the emitter. 2 – Calculate numerically the distributions of electric potential, electric field strength, electron and hole concentrations in a diffusion n-p junction. 3 – Analyze the influence of surface states on the change in the internal electric field and the rate of surface recombination of nonequilibrium charge carriers. As a result, the influence of surface states on the

electric field distribution in a diffusion n-p junction in silicon was numerically simulated. The model is based on a numerical solution of the Poisson equation with boundary conditions that include the condition of the overall electrical neutrality of the sample. It is shown that the density of electronic states on the emitter surface creates a narrow range of electric charge density distribution. The maximum value of the modulus of the electric field strength in this region exceeds the similar value in the n-p junction by three times or more. The electric field strength caused by the surface charge directs minority charge carriers towards the surface. This increases the effective rate of their recombination. Reducing the surface charge density or changing its sign is one of the tasks of semiconductor device technology.

N-p junction; electric field potential; Poisson's equation; surface states; electrons; holes; silicon.

Введение. Распределение внутреннего электрического поля в значительной степени определяет энергетическую структуру и свойства полупроводниковых приборов. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) этих приборов зависят от совокупности их свойств. Анализ параметров ВАХ – один из методов диагностики диодов и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) [1–3]. Интерпретация ВАХ основана на теоретических моделях полупроводниковых структур и транспорта носителей заряда [4, 5].

Современная электроника требует уменьшения размеров элементов с *n-p* переходами. Это приводит к возрастанию влияния поверхности. Плотность поверхностных состояний в запрещенной зоне обуславливает образование поверхностного заряда и рекомбинацию через эти состояния.

Накопление неравновесного поверхностного заряда на границе Si-SiO₂ является одной из причин снижения эффективности собирания фотогенерированных носителей заряда [6, 7]. В работе [8] экспериментально доказано отрицательное влияние туннельно-рекомбинационных переходов электронов через поверхностные состояния на границе раздела Si-ITO на эффективность разделения неравновесных электронов, дырок в ФЭП. Поверхностный электрический потенциальный барьер, созданный поверхностными зарядами, препятствует транспорту носителей заряда через поверхность [9].

Теоретический и экспериментальный анализ особенностей распределения электрического поля в поверхностной области для структур, содержащих *n-p* переход, является актуальным, так как результаты позволят повысить эффективность ФЭП [10] и стабильность диодов [11].

Цель работы – проанализировать влияние поверхностных состояний на распределение электрического поля в диффузионном *n-p* переходе.

Методика численного моделирования. Потенциал электрического поля является решением уравнения Пуассона. Численные алгоритмы решения этого уравнения для сложных многомерных задач активно совершенствуются [12–14]. Для достижения сформулированной цели достаточно решить одномерную задачу.

Распределение потенциала электрического поля $\varphi(x)$ в диффузионном *n-p* переходе с учетом поверхностных состояний является решением уравнения Пуассона

$$\frac{d^2}{dx^2} \varphi(x) = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)), \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость вещества, ε_0 – диэлектрическая постоянная, q – элементарный заряд, $p(x)$ – концентрация дырок, $n(x)$ – концентрация электронов, $N^{ion}(x)$ – концентрация ионизированных доноров и акцепторов, $N_s(x)$ – плотность дефектов в поверхностной области, создающих энергетические уровни в запрещенной зоне.

Геометрическая схема *n-p* перехода показана на рис. 1: при $-w_n \leq x \leq -d_n$ расположен эмиттер *n*-типа проводимости, w_n – глубина залегания *n-p* перехода; при $-d_n < x < d_p$ расположена область, обедненная носителями заряда, (ООНЗ), в которой $n(x) \ll |N^{ion}(x)|$, $p(x) \ll |N^{ion}(x)|$; при $d_p \leq x \leq w_p$ расположена база *p*-типа проводимости, в которой выполняется условие локальной нейтральности, w_p – толщина базы.

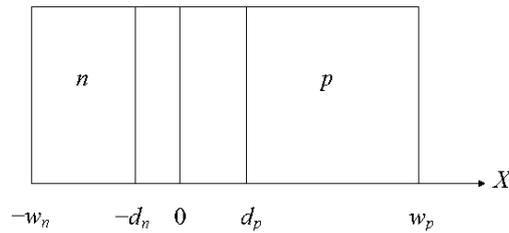


Рис. 1. Схема n-p перехода

Концентрация примесей $N(x) = N_D(x) - N_A$ при $-w_n \leq x \leq w_p$, где $N_D(x)$ – концентрация доноров, $N_A = const$ – концентрация акцепторов. В модели диффузии из неограниченного источника [15]

$$N_D(x) = N_{D0} \operatorname{erfc}\left(\frac{(x + w_n)}{x_0}\right). \quad (2)$$

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 ионизованных доноров и акцепторов определяется формулами [16]

$$N_D^{ion}(x) = \frac{N_D(x)}{1 + g_d e^{\frac{F-E_d}{kT}}}, \quad N_A^{ion} = \frac{N_A}{1 + g_a e^{\frac{E_a-F}{kT}}}, \quad (3)$$

где F – электрохимический потенциал (уровень Ферми), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, E_d – энергетический уровень донорной примеси в запрещенной зоне, g_d – фактор вырождения донорного уровня, E_a – энергетический уровень акцепторной примеси в запрещенной зоне, g_a – фактор вырождения акцепторного уровня. Металлургическая граница n-p перехода расположена при $x = 0$, где выполняется условие $N^{ion}(0) = 0$, являющееся уравнением для определения параметра x_0 в формуле (2).

Плотность состояний, созданных дефектами в поверхностной области, изменяется от максимального значения N_{surf} при $x = -w_n$ до 0 при $x = w_{surf} - w_n$:

$$N_s(x) = \begin{cases} N_{surf} \frac{w_{surf} - w_n - x}{w_{surf}}, & \text{при } -w_n \leq x < (w_{surf} - w_n), \\ 0, & \text{при } (w_{surf} - w_n) \leq x \leq w_p \end{cases} \quad (4)$$

где w_{surf} – толщина поверхностного слоя. Плотность поверхностных состояний

$$N_{ss} = \int_{-w_n}^0 N_s(x) dx = \frac{1}{2} N_{surf} w_{surf}.$$

Концентрации носителей заряда $n(x)$, $p(x)$ рассчитываются по формулам [16]

$$n(x) = N_c e^{\frac{F-E_g+q\phi(x)}{kT}}, \quad p(x) = N_v e^{\frac{-F-q\phi(x)}{kT}}, \quad (5)$$

где N_c – эффективная плотность электронных состояний в окрестности дна зоны проводимости, N_v – эффективная плотность электронных состояний в окрестности вершины валентной зоны, E_g – ширина запрещенной зоны. Уровень Ферми F отсчитывается от вершины валентной зоны в точке $x = w_p$.

Условие общей электронейтральности структуры

$$\int_{-w_n}^{w_p} (p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)) dx = 0 \quad (6)$$

является дополнительным условием для уравнения (1). Из условия (6) следует, что

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=-w_n} = \left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=w_p}. \quad (7)$$

В базе в равновесных условиях напряженность электрического поля $E(x) = -\frac{d}{dx} \varphi(x)$ равна нулю, тогда условие (7) принимает вид

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x \leq -w_n} = 0. \quad (8)$$

Начало отсчета электрического потенциала выбирается произвольно, поэтому $\varphi(w_p) = 0$. Равновесное значение F является решением уравнения $p(w_p) - n(w_p) + N^{ion}(w_p) = 0$ (условие локальной нейтральности базы).

Из (8) следует, что $\varphi(x) = \varphi_0$ при $x \leq -w_n$. Значение φ_0 определяется итерационно в процессе численного решения уравнения (1).

Уравнение (1) в разностной форме (9) решалось численно методом последовательных приближений.

$$\begin{aligned} & \frac{\varphi^j(x-h) - 2\varphi^j(x) + \varphi^{j-1}(x+h)}{h^2} = \\ & = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(N_v e^{\frac{-F - q\varphi^j(x)}{kT}} - N_c e^{\frac{F - E_g + q\varphi^j(x)}{kT}} + N^{ion}(x) + N_s(x) \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где h – шаг дискретизации, j – номер итерации.

Граничные условия для уравнения (9): $\varphi^j(-w_n - h) = \varphi^j(-w_n)$, $\varphi^j(w_p) = 0$. Начальное приближение для $j = 0$ является решением уравнения локальной нейтральности

$$N_v e^{\frac{-F - q\varphi^0(x)}{kT}} - N_c e^{\frac{F - E_g + q\varphi^0(x)}{kT}} + N^{ion}(x) + N_s(x) = 0. \quad (10)$$

Значения $\varphi^j(x_i)$ являются решением алгебраических уравнений (9), которые решались численно методом биекций в каждой точке отрезка интегрирования $x_i = -w_n + i \cdot h$, $i = 0, 1, \dots, K - 1$, $K = (w_p + w_n)/h$, используя $\varphi^{j-1}(x_i)$. Итерационный процесс прекращается при достижении условия (6).

Результаты моделирования и их обсуждение. Объект моделирования – n - p переход в кремнии, созданный диффузией фосфора в подложку, легированную бором. Параметры распределения концентрации примесей: $N_{D0} = 10^{26} \text{ м}^{-3}$, $N_A = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Глубина залегания диффузионного n - p перехода $w_n = 0.45 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, n - p переход является достаточно плавным, чтобы уменьшить размер области, обогащенной электронами, в области пространственного заряда (ОПЗ) [17].

Поверхностные состояния существуют как нарушения трансляционной симметрии кристалла – таммовские поверхностные уровни, поверхностные состояния типа Шокли, состояния, обусловленные дефектами кристаллической решетки и примесными атомами. В зависимости от способа обработки поверхности [18], облучения ионизирующими час-

тицами [19], состава атмосферы и других факторов плотность поверхностных электронных состояний принимает значения $10^{15} \div 10^{19} \text{ м}^{-2}$, толщина поверхностного слоя в кремнии $\sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ [20].

На рис. 2 показаны рассчитанные численно зависимости потенциала и напряженности электрического поля в n - p переходе в кремнии при отсутствии поверхностных состояний, $T = 300 \text{ К}$. Рассчитанные в этом случае зависимости $n(x)$, $p(x)$ и $N_1^{ion}(x)$ показаны на рис. 3.

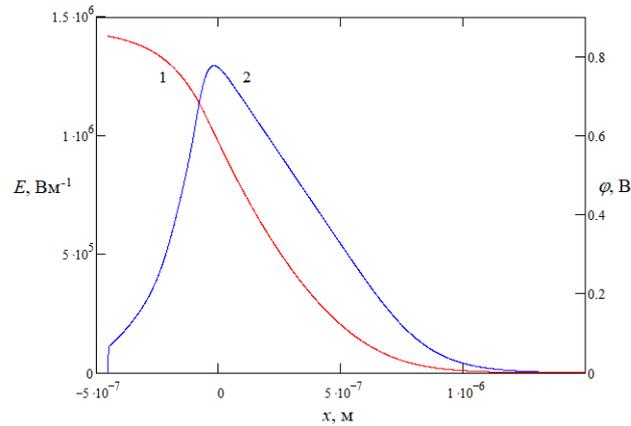


Рис. 2. Электрическое поле диффузионного n - p перехода:
1 – потенциал $\varphi(x)$, 2 – напряженность $E(x)$

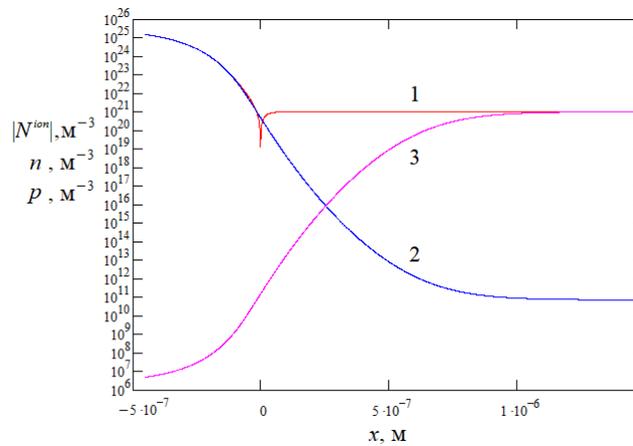


Рис. 3. Концентрации заряженных частиц: 1 – ионизированных примесей (по модулю) $|N^{ion}(x)|$, 2 – электронов $n(x)$, 3 – дырок $p(x)$

Концентрация ионизированных доноров $N^{ion} = 1.46 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ при $x = -w_n$ (рис. 3), $N^{ion} < N_c = 2.74 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $N_A \ll N_v$, следовательно, электроны и дырки не являются вырожденными. ООЗ, где $n(x), p(x) \ll |N^{ion}(x)|$, расположена при $0 < x < 0.75 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Изменение $\varphi(x)$ в ООЗ равновесного n - p перехода составляет $V_0 = 0.6 \text{ В}$. Часть ОПЗ, содержащая положительную плотность заряда, начинается на поверхности $x = -w_n$ и простирается вплоть до металлургической границы $x = 0$. В этой области $n(x)$ меньше, но порядка $N^{ion}(x)$, поэтому последовательное сопротивление n слоя много меньше, чем p слоя.

В эмиттере n -типа поверхностные состояния в запрещенной зоне, расположенные ниже уровня Ферми, заряжены отрицательно, поэтому в формуле (4) $N_{surf} < 0$. В эмиттере p -типа $N_{surf} > 0$. На рис. 4 продемонстрировано влияние знака поверхностного заряда на изменение $E(x)$ в эмиттере n -типа. В расчетах использованы следующие значения параметров формулы (4) $|N_{surf}| = 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $w_{surf} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, так что плотность поверхностных состояний $|N_{ss}| = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

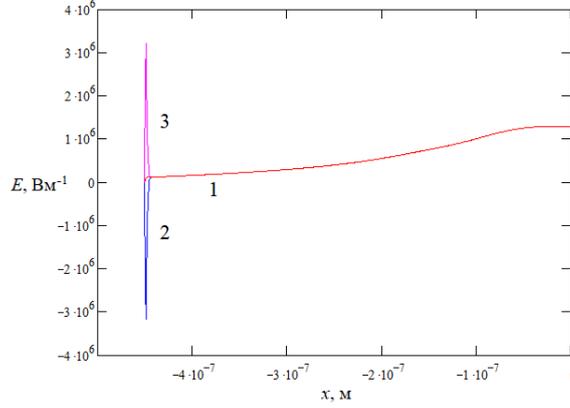


Рис. 4. Напряженность электрического поля $E(x)$ в эмиттере: 1 – $N_{ss} = 0$,
2 – $N_{ss} = -10^{16} \text{ м}^{-2}$, 3 – $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$

Условие $N_{ss} = 0$ соответствует отсутствию поверхностных состояний, $N_{ss} = -10^{16} \text{ м}^{-2}$ – наличию отрицательно заряженных состояний ниже уровня Ферми на поверхности эмиттера n -типа, $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ – дополнительно созданному положительному заряду на поверхности.

Определим влияние знака поверхностного заряда на рекомбинационные свойства поверхности. Используем приближенное решение системы уравнений транспорта носителей заряда. В случае низкой инжекции носителей заряда для концентрации избыточных электронов δn и дырок δp в эмиттере выполняются условия $n_0 \gg \delta n \sim \delta p$, $n_0 \gg p_0$, $p = p_0 + \delta p$, где n_0, p_0 – концентрации равновесных электронов и дырок. Поток дырок

$$j_p(x) \approx \mu_p(x)E(x)\delta p(x) - D_p(x)\frac{d}{dx}\delta p(x), \quad (11)$$

где μ_p – подвижность дырок, D_p – коэффициент диффузии дырок.

$$\frac{d}{dx}j_p(x) = -\frac{\delta p(x)}{\tau_p(x)}, \quad (12)$$

где τ_p – время жизни дырок.

Размер ОПЗ поверхностного слоя $w_{ch} \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ (рис. 4). Проинтегрируем уравнение (12) в тонком поверхностном слое – $w_n \leq x \leq -w_n + w_{ch}$,

$$\frac{1}{w_{ch}}(j_p(-w_n + w_{ch}) - j_p(-w_n)) \approx -\frac{\overline{\delta p}}{\tau_{ps}}, \quad (13)$$

где $\overline{\delta p}$ – среднее значение концентрации избыточных дырок в ОПЗ поверхностного слоя, τ_{ps} – эффективное время жизни дырок. На свободной поверхности $j_p(-w_n) \approx 0$. Из (13) следует условие на границе $x = -w_n + w_{ch}$

$$j_p(-w_n + w_{ch}) \approx -S\bar{\delta p}, \quad (14)$$

где $S \approx w_{ch}\tau_{ps}^{-1}$ – скорость поверхностной рекомбинации.

Зависимость $E(x)$ в поверхностном слое принимает экстремальное значение E_{ex} при $x = -w_n + w_{ex}$, $w_{ex} \approx 1.4 \cdot 10^{-9}$ м (рис. 4).

$$j_p(-w_n + w_{ex}) \approx \mu_{ps}E_{ex}\bar{\delta p} - D_{ps}\frac{\delta p(-w_n + w_{ch}) - \bar{\delta p}}{w_{ch} - w_{ex}}, \quad (15)$$

где μ_{ps} , D_{ps} – средние значения подвижности и коэффициента диффузии дырок в ОПЗ поверхностного слоя. Из (12) и (15) получим

$$j_p(-w_n + w_{ex}) - j_p(-w_n) \approx \mu_{ps}E_{ex}\bar{\delta p} - D_{ps}\frac{\delta p(-w_n + w_{ch}) - \bar{\delta p}}{w_{ch} - w_{ex}} = -w_{ex}\frac{\bar{\delta p}}{\tau_{ps}},$$

откуда найдем

$$\bar{\delta p} \approx \frac{\delta p(-w_n + w_{ch})}{\left(1 + \frac{(w_{ch} - w_{ex})qE_{ex}}{kT} + \frac{w_{ex}(w_{ch} - w_{ex})}{D_{ps}\tau_{ps}}\right)}. \quad (16)$$

Из (14) и (16) следует рекомбинационное условие на поверхности эмиттера

$$j_p(-w_n + w_{ch}) \approx -S_{ef}\bar{\delta p}(-w_n + w_{ch}), \quad (17)$$

$$S_{ef} \approx \frac{S}{\left(1 + \frac{(w_{ch} - w_{ex})qE_{ex}}{kT} + \frac{w_{ex}(w_{ch} - w_{ex})}{L_{ps}^2}\right)},$$

где S_{ef} – эффективная скорость поверхностной рекомбинации, $L_{ps} = \sqrt{D_{ps}\tau_{ps}}$.

Решая уравнения (11) и (12) относительно $\delta p(x)$, учтем, что $w_n \gg w_{ch}$, тогда (17) является краевым условием при $x = -w_n$ для решения диффузионно-дрейфового уравнения в эмиттере.

Рассмотрим три случая, представленные на рис. 4.

$$1. N_{ss} = 0, E_{ex} = 0, w_{ch} = w_{surf}, w_{ex} = 0, S_{ef} = S \sim 10^3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}.$$

$$2. N_{ss} = -10^{16} \text{ м}^{-2}, E_{ex} = -3.2 \cdot 10^6 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}, S_{ef} \approx 1.8 \cdot S.$$

$$3. N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}, E_{ex} = 3.2 \cdot 10^6 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}, S_{ef} \approx 0.7 \cdot S \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}.$$

Выводы. Предложен численный метод решения уравнения Пуассона для электрического потенциала в n - p переходе с граничными условиями, обеспечивающими общую электронейтральность.

Распределение электрического поля в диффузионном n - p переходе рассчитано с учетом плотности электронных состояний в запрещенной зоне в поверхностной области эмиттера. Значение плотности поверхностных состояний ограничено так, что инверсия типа проводимости на поверхности не возникает. Максимальное значение модуля напряжённости электрического поля в поверхностной области превышает аналогичное значение в n - p переходе в три раза и более.

В теоретических моделях фотоэлектрических преобразователей влияние поверхностных состояний на вольтамперную характеристику учитывается посредством скорости поверхностной рекомбинации. Результаты расчетов показывают, что вследствие сущест-

ования электронных состояний в запрещенной зоне на поверхности эмиттера напряженность электрического поля направляет неосновные носители заряда к поверхности, увеличивая эффективную скорость поверхностной рекомбинации. Для компенсации этого эффекта необходимо в 10 раз уменьшить плотность поверхностных состояний за счет пассивации или изменить знак поверхностного заряда на противоположный, используя технологию подлегирования или имплантации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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.
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.
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, В. 5. – С. 737-743.
4. Mohammed A. P-N Junction // Technical Report. – 2020. – 19 p.
5. Pulfrey D.L. Understanding Modern Transistors and Diodes. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 355 p.
6. Богатов Н.М., Корнеев А.И., Матвеекин М.П., Родоманов Р.Р. Исследование влияния неравновесного заряда границы SiO_2 -Si на динамику спектральной чувствительности солнечных элементов с субмикронным p - n -переходом // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 2. – С. 52-54.
7. Богатов Н.М., Матвеекин М.П., Першин Н.В., Родоманов Р.Р. Определение времени захвата неравновесного поверхностного заряда в полупроводниковых структурах по спаду тока короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2008. – № 6. – С. 39-41.
8. Симашикевич А.В., Шербан Д.А., Брук Л.И., Фёдоров В.М., Коваль А., Усатый Ю.В. Особенности механизма прохождения тока через изотипную структуру ИТО/nSI // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 1. – С. 44-47.
9. 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, 105287. – P. 1-7.
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.
11. Papež V., Hájek J., Kojecký V. Influence of surface states on the reverse and noise properties of silicon power diodes // IET Circuits Devices Syst. – 2014. Vol. 8, Issue 3. – P. 213-220.
12. Данилкин Е.А., Старченко А.В., Каратаева Е.А., Юмин К.В., Дель И.В., Смиян Н.С., Лецинский 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: Сб. статей. Томск, 5–7 октября 2021 г. – Томск: Изд-во НТЛ, 2021. – С. 18-28.
13. Кенжебек Е.Г., Иманкулов Т.С., Ахмед-Заки Д.Ж. Параллельный алгоритм решения уравнения Пуассона на основе технологии MPI+OPENMP // Проблемы оптимизации сложных систем: Матер. XIV Международной Азиатской школы-семинара. Алматы, 20–31 июля 2018 г. – Алматы: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК, 2018. – С. 307-315.
14. Мингалев О.В., Мельник М.Н. Численное решение краевых задач для уравнения Пуассона методом быстрого преобразования Фурье с использованием параллельных вычислений // Тр. Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9, В. 5. – С. 165-182.
15. Мерер Х. Диффузия в твердых телах. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 536 с.
16. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Лань, 2010. – 400 с.
17. Богатов Н.М. Распределение заряда в резком несимметричном равновесном n - p -переходе // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2016. – № 3. – С. 12-17.

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

REFERENCES

1. Kondratenko V.S., Kuroedov A.V., Ryzhikov I.V. Metod nerazrushayushchego kontrolya nadezhnosti PIN fotodiodov po vol't-ampernym kharakteristikam [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.
2. Artamonov A.V., Astakhov V.P., Karpov V.V., Chishko V.F., Levshin V.L. Raschet fotoelektricheskikh kharakteristik fotodiodnykh matrichnykh fotopriemnykh ustroystv spektral'nogo diapazona 2,0–3,5 mkm na osnove arsenida indiya [Calculation of photoelectric characteristics of photodiode matrix photodetector devices of the spectral range 2.0–3.5 microns based on indium arsenide], *Prikladnaya fizika [Applied Physics]*, 2011, No. 6, pp. 145-148.
3. Tregulov V.V., Litvinov V.G., Ermachikhin A.V. Mekhanizmy tokoprokhozhdeniya v poluprovodnikovoy strukture fotoelektricheskogo preobrazovatelya s n⁺-p-perekhodom i antiotrazhayushchey plenкой poristogo kremniya, sformirovannoy metodom okrashivayushchego travleniya [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, V. 5, pp. 737-743.
4. Mohammed A. P-N Junction, *Technical Report*, 2020, 19 p.
5. Pulfrey D.L. Understanding Modern Transistors and Diodes. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 355 p.
6. Bogatov N.M., Korneev A.I., Matveyakin M.P., Rodomanov R.R. Issledovanie vliyaniya neravnovesnogo zaryada granitsy SiO₂-Si na dinamiku spektral'noy chuvstvitel'nosti solnechnykh elementov s submikronnym p-n-perekhodom [Study of the influence of the nonequilibrium charge of the SiO₂-Si boundary on the dynamics of the spectral sensitivity of solar cells with a submicron p-n junction], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskije nauki [News of higher educational institutions of the North Caucasus region. Technical science]*, 2006, No. 2, pp. 52-54.
7. Bogatov N.M., Matveyakin M.P., Pershin N.V., Rodomanov R.R. Opredelenie vremeni zakhvata neravnovesnogo poverkhnostnogo zaryada v poluprovodnikovykh strukturakh po spadу toka korotkogo zamykaniya [Determination of the time of capture of a nonequilibrium surface charge in semiconductor structures by the decline in short-circuit current], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural Sciences]*, 2008, No. 6, pp. 39-41.
8. Simashkevich A.V., Sherban D.A., Bruk L.I., Fedorov V.M., Koval' A., Usaty Yu.V. Osobennosti mekhanizma prokhozhdeniya toka cherez izotipnyuyu strukturu ITO/nSI [Features of the mechanism of current passage through the isotope ITO/nSI structure], *Elektronnaya obrabotka materialov [Electronic processing of materials]*, 2010, No. 1, pp. 44-47.
9. 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, 105287, pp. 1-7.
10. Mel'nik N.N., Tregulov V.V., Skoptsova G.N., Ivanov A I., Kostsov D.S. Svoystva p-n-perekhoda, sformirovannogo v plenke poristogo kremniya, vyrashchennoy metall-stimulirovannym travleniem [Properties of a p-n junction formed in a porous silicon film grown by metal-stimulated etching], *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN [Brief communications on physics of the Lebedev Physical Institute]*, 2022, No. 9, pp. 3-10.
11. 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, Issue 3, pp. 213-220.
12. Danilkin E.A., Starchenko A.V., Karataeva E.A., Yumin K.V., Del' I.V., Smiyan N.S., Leshchinskiy D.V. Parallelnaya realizatsiya nekotorykh iteratsionnykh metodov dlya resheniya sistemy lineynykh algebraicheskikh uravneniy v mezomasshtabnoy meteorologicheskoy modeli atmosfernogo pogrannichnogo sloya [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: Sb. statey. Tomsk, 5–7 oktyabrya 2021 g. [Tenth Siberian Conference on Parallel and High-Performance Computing: Proc. articles. Tomsk, October 5–7, 2021]*. Tomsk: Izd-vo NTL, 2021, pp. 18-28.

13. *Kenzhebek E.G., Imankulov T.S., Akhmed-Zaki D.Zh.* Parallelnyy algoritm resheniya uravneniya Puassona na osnove tekhnologii MPI+OPENMP [Parallel algorithm for solving the Poisson equation based on MPI+OPENMP technology], *Problemy optimizatsii slozhnykh sistem: Mater. XIV Mezhdunarodnoy Aziatskoy shkoly-seminara. Almaty, 20–31 iyulya 2018 g.* [Problems of optimization of complex systems: Proceedings of the XIV International Asian School-Seminar. Almaty, July 20–31, 2018]. Almaty: Institut informatsionnykh i vychislitel'nykh tekhnologiy MON RK, 2018, pp. 307-315.
14. *Mingalev O.V., Mel'nik M.N.* Chislennoe reshenie kraevykh zadach dlya uravneniya Puassona metodom bystrogo preobrazovaniya Fur'e s ispol'zovaniem parallelnykh vychisleniy [Numerical solution of boundary value problems for the Poisson equation by the fast Fourier transform method using parallel computing], *Tr. Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, Vol. 9, V. 5, pp. 165-182.
15. *Merer Kh.* Diffuziya v tverdykh telakh [Diffusion in solids]. Dolgoprudnyy: Izdatel'skiy dom «Intellekt», 2011, 536 p.
16. *Shalimova K.V.* Fizika poluprovodnikov [Physics of semiconductors]. Moscow: Lan', 2010, 400 p.
17. *Bogatov N.M.* Raspredelenie zaryada v rezkom nesimmetrichnom ravnesnom n-p-perekhode [Charge distribution in a sharp asymmetric equilibrium n-p junction], *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2016, No. 3, pp. 12-17.
18. *Yafarov R.K.* Vliyanie vstroennogo poverkhnostnogo potentsiala na VAKh kremnievykh MDP struktur [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.
19. *Aleksandrov O.V.* Vliyanie intensivnosti ioniziruyushchego oblucheniya na otklik MOP-struktur [Influence of the intensity of ionizing radiation on the response of MOS structures], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and semiconductor technology], 2021, Vol. 55, V. 2, pp. 152-158.
20. *Yurov V.M., Zhanabergenov T., Guchenko S.A.* Tolshchina poverkhnostnogo sloya tipichnykh poluprovodnikov [Thickness of the surface layer of typical semiconductors], *The scientific heritage* [The scientific heritage], 2020, No. 43, pp. 20-23.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

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 – e-mail: volodinvs1995@mail.ru; тел.: +79898203672; аспирант.

Григорьян Леонтий Рустемович – e-mail: leonmezon@mail.ru; тел.: +79181681719; к.ф.-м.н.; доцент.

Коваленко Максим Сергеевич – e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; 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 – e-mail: volodinvs1995@mail.ru; phone: +79898203672; graduate student.

Grigoryan Leontiy Rustemovich – e-mail: leonmezon@mail.ru; phone: +79181681719; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

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