

УДК 517.958:537.311.1; 621.315.592

Расчет статических параметров кремниевого диода, содержащего в симметричном p – n -переходе δ -слой точечных трехзарядных дефектов

Поклонский Н.А., Ковалев А.И., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В.

Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 10.05.2018

Принята к печати 01.06.2018

Научный и практический интерес представляет изучение полупроводниковых материалов и приборов с узким слоем атомов примесей и/или собственных точечных дефектов кристаллической решетки. Цель работы – рассчитать электрические параметры симметричного кремниевого диода, в плоском p – n -переходе которого сформирован δ -слой точечных трехзарядных t -дефектов. Такой диод называется p – t – n -диодом, подобно p – i – n -диоду.

Каждый t -дефект может находиться в одном из трех зарядовых состояний (-1 , 0 , $+1$; в единицах элементарного заряда). Считается, что при комнатной температуре все водородоподобные акцепторы в p -области и водородоподобные доноры в n -области ионизованы. Принималось, что сечение захвата дырок v -зоны на t -дефекты больше сечения захвата электронов c -зоны на t -дефекты.

Численно решена система стационарных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих в дрейфово-диффузионном приближении миграцию электронов и дырок в полупроводниках. Рассчитаны статические вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики кремниевого диода с невырожденными областями p - и n -типа электропроводности при прямом и обратном электрическом напряжении смещения.

Расчетным путем показано, что в p – t – n -диоде, содержащем δ -слой t -дефектов, при прямом смещении имеется участок стабилизации плотности тока. При обратном смещении плотность тока в таком диоде много больше, чем в p – n -диоде без t -дефектов. При увеличении обратного смещения емкость p – t – n -диода, в отличие от p – n -диода, вначале увеличивается, а затем уменьшается.

Ключевые слова: кремний, p – n -переход, δ -слой точечных дефектов, вольт-амперная характеристика, вольт-фарадная характеристика.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Адрес для переписки:

Поклонский Н.А.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

Address for correspondence:

Poklonski N.A.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

Для цитирования:

Поклонский Н.А., Ковалев А.И., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В.
Расчет статических параметров кремниевого диода, содержащего в симметричном p – n -переходе δ -слой точечных трехзарядных дефектов. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 2. – С. 130–141.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

For citation:

Poklonski N.A., Kovalev A.I., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V.
[Calculation of static parameters of silicon diode containing δ -layer of point triple-charged defects in symmetric p – n -junction].
Devices and Methods of Measurements. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 130–141 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Calculation of static parameters of silicon diode containing δ -layer of triple-charged point defects in symmetric p – n -junction

Poklonski N.A., Kovalev A.I., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V.

Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 10.05.2018

Accepted for publication 01.06.2018

Abstract

The study of semiconductor materials and devices containing a narrow layer of impurity atoms and/or intrinsic point defects of the crystal lattice is of fundamental and practical interest. The aim of the study is to calculate the electric parameters of a symmetric silicon diode, in the flat p – n -junction of which a δ -layer of point triple-charged t -defects is formed. Such a diode is called p – t – n -diode, similarly to p – i – n -diode.

Each t -defect can be in one of the three charge states (-1 , 0 , and $+1$; in the units of the elementary charge). It is assumed that at room temperature all hydrogen-like acceptors in p -region and hydrogen-like donors in n -region are ionized. It was assumed that the cross-section for v -band hole capture on t -defects is greater than the cross-section for c -band electron capture on t -defects.

The system of stationary nonlinear differential equations, which describe in the drift-diffusion approximation a migration of electrons and holes in semiconductors, is solved numerically. The static capacity-voltage and current-voltage characteristics of the silicon diode with nondegenerate regions of p - and n -type of electrical conductivity are calculated for forward and reverse electric bias voltage.

It is shown by calculation that in the p – t – n -diode containing the δ -layer of t -defects, at the forward bias a region of current density stabilization occurs. At the reverse bias the current density in such a diode is much greater than the one in a p – n -diode without t -defects. With the reverse bias the capacitance of the p – t – n -diode, in contrast to the p – n -diode, increases at first and then decreases.

Keywords: silicon, p – n -junction, δ -layer of point defects, current-voltage characteristic, capacity-voltage characteristic.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Адрес для переписки:

Поклонский Н.А.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

Для цитирования:

Поклонский Н.А., Ковалев А.И., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В.
Расчет статических параметров кремниевого диода, содержащего в симметричном p – n -переходе δ -слой точечных трехзарядных дефектов.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 130–141.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Address for correspondence:

Poklonski N.A.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

For citation:

Poklonski N.A., Kovalev A.I., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V.
[Calculation of static parameters of silicon diode containing δ -layer of point triple-charged defects in symmetric p – n -junction].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 130–141 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Введение

Свойства полупроводников, содержащих дефекты кристаллической структуры, существенно зависят от типа дефектов, их концентрации и пространственного распределения. Научный и практический интерес представляет изучение полупроводниковых материалов и приборов с узким слоем атомов примесей и/или собственных точечных дефектов кристаллической решетки [1–3]. Это объясняется тем, что такие структуры являются малоизученными (с теоретической точки зрения) и порой приводят к явным разногласиям в трактовке результатов экспериментов. Так, в работе [4] утверждается, что формирование слоя дефектов вблизи плоского p – n -перехода имплантацией протонов в кремниевый диод повышает эффективность преобразования солнечного излучения таким диодом до 35 %. Однако в работе [5] опровергают данное заявление и утверждают, что эффективность такого диода не увеличивается. Напротив – напряжение холостого хода уменьшается на 20 % из-за увеличения темпа рекомбинации генерируемых светом электронов и дырок через уровни энергии дефектов в области p – n -перехода.

Как правило, создание полупроводниковых приборных структур и экспериментальное определение их параметров – длительный процесс, который не всегда позволяет достичь результатов в пределах желаемого. Поэтому для исследования таких структур используют математическое моделирование [6, 7].

Цель работы – рассчитать статические электрические параметры кремниевого диода, содержащего в двойном электрическом слое δ -слой точечных трехзарядных двухуровневых (без учета возбужденных состояний) дефектов кристаллической матрицы.

Модель симметричного p – t – n -диода

Рассмотрим одномерную модель диода, сформированного в кристаллическом кремнии. Длина диода L , плоский «металлургический» p – n -переход ($N_a = N_d$) расположен в точке с координатой $x = 0$ (рисунок 1). При $x < -L/2$ находится p^+ -контакт к p -области, при $x > L/2$ находится n^+ -контакт к n -области. В области объемного заряда (двойного электрического слоя) p – n -перехода создан δ -слой двухуровневых t -дефектов, каждый из которых может находиться в одном из трех зарядовых состояний $(-1, 0, +1)$.

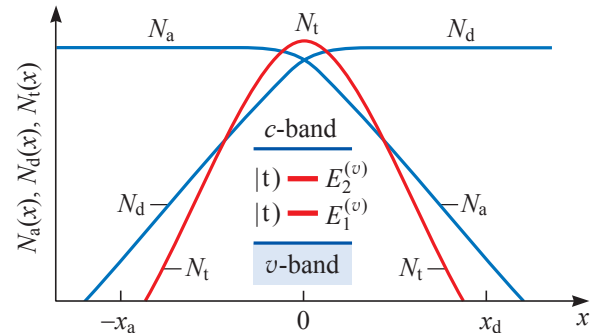


Рисунок 1 – Схема распределения по координате x водородоподобных акцепторов N_a , доноров N_d и t -дефектов N_t с уровнями энергии $E_2^{(v)} > E_1^{(v)} > 0$ относительно потолка v -зоны кремния; $x_a + x_d > 0$ – толщина двойного электрического слоя p – n -перехода

Figure 1 – Scheme of distribution over coordinate x of hydrogen-like acceptors N_a , donors N_d and t -defects N_t with the energy levels $E_2^{(v)} > E_1^{(v)} > 0$ relative to the top of v -band of silicon; $x_a + x_d > 0$ is the width of the double electrical layer of p – n -junction

Полагаем, что все водородоподобные акцепторы $|ap\rangle$ и доноры $|dn\rangle$ с концентрациями $N_a(x)$ и $N_d(x)$ неподвижны и полностью ионизованы, т. е. находятся в зарядовых состояниях (-1) и $(+1)$ соответственно, а их распределение по координате x вдоль диода определяется так [8]:

$$N_a(x) = \frac{N_a}{1 + \exp(x/l)}, \quad N_d(x) = \frac{N_d}{1 + \exp(-x/l)}, \quad (1)$$

где l – параметр профиля легирования, N_d и N_a – максимальные концентрации доноров и акцепторов в пределе $l \rightarrow 0$.

Пусть t -дефекты неподвижны и имеют нормальное (гауссово) распределение вдоль диода с максимумом в точке металлургического перехода ($x = 0$; см. рисунок 1):

$$N_t(x) = N_t(0) \exp[-(x/\Delta)^2], \quad (2)$$

где $N_t(x) = N_{t,-1}(x) + N_{t,0}(x) + N_{t,+1}(x)$ – полная концентрация t -дефектов в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$; Δ – параметр профиля распределения t -дефектов в δ -слое; $N_t(0)$ – концентрация t -дефектов в центре p – t – n -диода (при $x = 0$). Ясно, что подобные t -дефекты кремниевой матрицы должны быть термически устойчивы до температур немного больше 500 К для обеспечения стабильных параметров диодов в рабочем диапазоне температур (см., например, [9, 10]).

Зарядовые состояния неподвижных t -дефектов в δ -слое становятся условно подвижными за счет обмена электронами между t -дефектами,

а также за счет захвата электронов из зоны проводимости (c -зоны) и дырок из валентной зоны (v -зоны) и теплового выброса их обратно [11].

Вероятность нахождения t -дефектов в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$ определяется соответствующими функциями [12]:

$$\begin{aligned} f_{t,-1}(\varphi(x)) &= \left[1 + \gamma_2 \exp\left(\frac{E_2^{(v)} + E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \exp\left(\frac{E_1^{(v)} + E_2^{(v)} + 2E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) \right]^{-1}, \\ f_{t,0}(\varphi(x)) &= \left[1 + \gamma_1^{-1} \exp\left(\frac{E_1^{(v)} + E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \gamma_2^{-1} \exp\left(\frac{-E_2^{(v)} - E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) \right]^{-1}, \\ f_{t,+1}(\varphi(x)) &= \left[1 + \gamma_1 \exp\left(\frac{-E_1^{(v)} - E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \exp\left(\frac{-E_1^{(v)} - E_2^{(v)} - 2E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) \right]^{-1}, \quad (3) \end{aligned}$$

где γ_1, γ_2 – факторы вырождения уровней энергии t -дефектов $E_1^{(v)} > 0, E_2^{(v)} > 0$ (далее $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$); $\varphi(x)$ – распределение электрического потенциала вдоль диода (по координате x); k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Введем обозначения: $N_{t,-1}(x, \varphi(x)) \equiv N_{t,-1}(x)$; $N_{t,0}(x, \varphi(x)) \equiv N_{t,0}(x)$; $N_{t,+1}(x, \varphi(x)) \equiv N_{t,+1}(x)$. Тогда с учетом (1) и (2) формулы для концентраций t -дефектов в зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$ принимают вид [12, 13]:

$$\begin{aligned} N_{t,-1}(x) &= N_t(x) f_{t,-1}(\varphi(x)); \\ N_{t,0}(x) &= N_t(x) f_{t,0}(\varphi(x)); \\ N_{t,+1}(x) &= N_t(x) f_{t,+1}(\varphi(x)). \end{aligned} \quad (4)$$

Энергетическая зонная диаграмма диода, содержащего δ -слой t -дефектов, показана на рисунке 2. Уровни энергии t -дефектов $E_1^{(v)} > 0, E_2^{(v)} > 0$ и уровень Ферми (электрохимический потенциал для электронов) $E_F^{(v)} < 0$ отсчитываются от потолка v -зоны $E_v(x)$. Положение уровня Ферми $E_F^{(v)}(x) = -[E_g + E_F^{(c)}(x)]$ вдоль p - t - n -диода определяется выражением (см., например, [12, 13]):

$$E_F^{(v)}(x) \equiv E_F^{(v)}(\varphi(x)) = E_F^{(v)}(-L/2) - e\varphi(x), \quad (5)$$

где $E_F^{(v)}(-L/2) < 0$ – уровень Ферми на левой границе диода в p -области; e – элементарный электрический заряд.

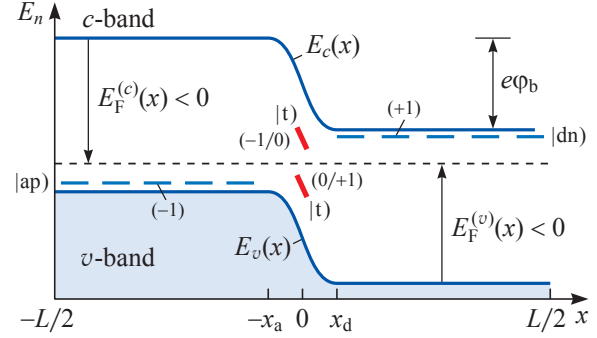


Рисунок 2 – Зонная диаграмма (зависимость одноэлектронной энергии E_n от координаты x) p - t - n -диода в равновесии: $E_c(x), E_v(x)$ – уровни энергии дна c -зоны и потолка v -зоны; $E_g = E_c(x) - E_v(x) > 0$ – ширина запрещенной зоны; $|ap\rangle$ – акцепторы в зарядовом состоянии (-1) ; $|dn\rangle$ – доноры в зарядовом состоянии $(+1)$; $|t\rangle$ – t -дефекты с уровнями энергии $E_1^{(v)}$ [зарядовые состояния $(0, +1)$] и $E_2^{(v)}$ [зарядовые состояния $(-1, 0)$]; $E_F^{(v)}(x) = -[E_g + E_F^{(c)}(x)] < 0$ – уровень Ферми; $e\varphi_b > 0$ – энергетический барьер p - n -перехода; L – длина диода

Figure 2 – Band diagram (dependence of the single-electron energy E_n on the coordinate x) of p - t - n -diode in equilibrium: $E_c(x), E_v(x)$ are the energy levels of the bottom of c -band and the top of v -band; $E_g = E_c(x) - E_v(x) > 0$ is the band gap; $|ap\rangle$ are acceptors in the charge state (-1) ; $|dn\rangle$ are donors in the charge state $(+1)$; $|t\rangle$ are t -defects with energy levels $E_1^{(v)}$ [the charge states $(0, +1)$] and $E_2^{(v)}$ [the charge states $(-1, 0)$]; $E_F^{(v)}(x) = -[E_g + E_F^{(c)}(x)] < 0$ is the Fermi level; $e\varphi_b > 0$ is the energy barrier of p - n -junction; L is the diode length

Энергетический барьер $e\varphi_b$ в диоде для электронов c -зоны и дырок v -зоны является следствием термодинамического равновесия между процессами дрейфа и диффузии носителей заряда в области металлургического перехода. Величина $e\varphi_b$ определяется разностью уровней Ферми на границах диода:

$$\begin{aligned} e\varphi_b &= E_F^{(v)}(-L/2) - E_F^{(v)}(L/2) = \\ &= E_F^{(c)}(L/2) - E_F^{(c)}(-L/2) > 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где φ_b – контактная разность электрических потенциалов диода в отсутствие электрического тока (в термодинамическом равновесии).

Чтобы найти положение уровня Ферми $E_F^{(v)}$ на границах p - и n -областей относительно потолка v -зоны для невырожденного полупроводника, составим соответствующие уравнения электрической нейтральности:

$$\begin{aligned} n(x) + N_a(x) + N_{t,-1}(x) &= p(x) + N_{t,+1}(x) \\ \text{при } x = -L/2, \\ n(x) + N_{t,-1}(x) &= p(x) + N_d(x) + N_{t,+1}(x) \\ \text{при } x = L/2, \end{aligned} \quad (7)$$

где $n(x) = n_c \exp[-(E_g + E_F^{(v)}(x))/k_B T]$ – концентрация электронов в зоне проводимости; $n_c = 2[2\pi m_n k_B T / (2\pi\hbar)^2]^{3/2}$; $p(x) = p_v \exp(E_F^{(v)}(x)/k_B T)$ – концентрация дырок в валентной зоне; $p_v = 2[2\pi m_p k_B T / (2\pi\hbar)^2]^{3/2}$; m_n, m_p – эффективные массы плотности состояний для электронов c -зоны и дырок v -зоны, $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка.

В соотношениях (7) учтено, что концентрации дырок и электронов на границах диода (на p^+ и n^+ омических контактах) определяются концентрациями водородоподобных примесей и t -дефектов.

Дрейфово-диффузионная модель миграции электронов и дырок в диоде

Плотности электронного $J_n(x)$ и дырочного $J_p(x)$ токов имеют вид (см., например, [12, 13]):

$$\begin{aligned} J_n(x) &= en(x)\mu_n E(x) + eD_n \frac{dn(x)}{dx}, \\ J_p(x) &= ep(x)\mu_p E(x) - eD_p \frac{dp(x)}{dx}, \end{aligned} \quad (8)$$

где μ_n, μ_p – дрейфовые подвижности электронов (n) и дырок (p) соответственно; $E(x)$ – напряженность электрического поля; D_n, D_p – коэффициенты диффузии.

Связь между коэффициентом диффузии $D_{n(p)}$ и дрейфовой подвижностью $\mu_{n(p)}$ в условиях термодинамического равновесия для невырожденного газа электронов c -зоны (n) и дырок v -зоны (p) дается соотношением Нернста–Эйнштейна [14]:

$$\frac{D_{n(p)}}{\mu_{n(p)}} = \frac{k_B T}{e}. \quad (9)$$

В работе [15] предложена аппроксимация, позволяющая вычислять подвижность основных носителей заряда в кристаллических полупроводниковых материалах в широком диапазоне температур T и концентраций водородоподобных доноров N_d (или акцепторов N_a), в виде:

$$\begin{aligned} \mu_{n(p)}(N_{d(a)}, T) &= \\ &= \mu_{\max}^{n(p)}(T_0) \frac{B_{n(p)}(N_{d(a)})[T/T_0]^{\beta_{n(p)}}}{1 + B_{n(p)}(N_{d(a)})[T/T_0]^{(\delta_{n(p)} + \beta_{n(p)})}}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{где } B_{n(p)}(N_{d(a)}) = \frac{\mu_{\min}^{n(p)} + \mu_{\max}^{n(p)} [N_g^{n(p)} / N_{d(a)}]^{\gamma_{n(p)}}}{\mu_{\max}^{n(p)} - \mu_{\min}^{n(p)}} \Bigg|_{T=T_0};$$

$T_0 = 300$ К. Для расчета подвижности электронов в n -области (индекс n) и дырок в p -области (индекс p) кристаллического кремния исполь-

зуются константы:

$$\begin{aligned} \mu_{\max}^n &= 1414 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \quad \mu_{\min}^n = 68,5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \\ \mu_{\max}^p &= 470,5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \quad \mu_{\min}^p = 44,9 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \\ N_g^n &= 9,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}, \quad N_g^p = 2,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}, \\ \beta_n &= 0,26, \quad \delta_n = 2,42, \quad \gamma_n = 0,71, \\ \beta_p &= 0,36, \quad \delta_p = 2,20, \quad \gamma_p = 0,72. \end{aligned}$$

Вначале по формуле (10) вычисляются дрейфовые подвижности электронов и дырок, затем по (9) – их коэффициенты диффузии.

Напряженность электрического поля в диоде

Напряженность стационарного электрического поля в диоде $E(x)$ определяется из уравнения Пуассона (см., например, [11–13]):

$$\begin{aligned} \frac{dE(x)}{dx} &= \frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{e}{\epsilon_r \epsilon_0} [p(x) + N_d(x) + N_{t,+1}(x, \phi(x)) - \\ &- n(x) - N_a(x) - N_{t,-1}(x, \phi(x))], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\rho(x)$ – распределение объемной плотности электрического заряда вдоль диода; $\epsilon_r = 11,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость кремния; $\epsilon_0 = 8,85$ пФ/м – электрическая постоянная; $N_a(x)$ и $N_d(x)$ определяются по (1); концентрации t -дефектов в зарядовых состояниях (-1) и ($+1$) зависят, согласно формулам (2) и (3), не только от x , но и от электрического потенциала $\phi(x)$.

Напряженность стационарного поля $E(x)$, потенциал $\phi(x)$ и постоянное внешнее напряжение U на диоде связаны соотношениями:

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = -E(x); \quad U - \phi_b = \int_{-L/2}^{L/2} E(x) dx. \quad (12)$$

Генерационно-рекомбинационные процессы в области p – n -перехода

При возбуждении стационарного тока в p – t – n -диоде изменяется концентрация электронов c -зоны и дырок v -зоны (относительно их равновесных значений), а также происходит перераспределение t -дефектов по зарядовым состояниям ($Z = -1, 0, +1$; в единицах элементарного заряда e). Так, в зарядовом состоянии (0) концентрация t -дефектов: 1) уменьшается вследствие захвата ими электронов из c -зоны или дырок из v -зоны, а также теплового выброса их t -дефектами в зарядовом состоянии (0) в зоны, 2) увеличивается при захвате электронов и вы-

бросе дырок t -дефектами в зарядовом состоянии (+1), а также при захвате дырок и выбросе электронов t -дефектами в зарядовом состоянии (–1).

В стационарном случае для описания генерационно-рекомбинационных процессов в p – n -переходе, содержащем δ -слой t -дефектов, запишем уравнения непрерывности [11, 13, 16]:

$$\begin{aligned}\frac{dJ_n(x)}{dx} &= -e[G_n(t, 0) - R_n(t, +1) + \\ &\quad + G_n(t, -1) - R_n(t, 0) + G_{np} - R_{np}], \\ \frac{dJ_p(x)}{dx} &= e[G_p(t, +1) - R_p(t, 0) + \\ &\quad + G_p(t, 0) - R_p(t, -1) + G_{np} - R_{np}],\end{aligned}\quad (13)$$

где $G_n(t, Z)$ – скорость (темп) теплового выброса t -дефектами (в зарядовом состоянии Z) электронов в c -зону, $G_p(t, Z)$ – скорость теплового выброса t -дефектами (в зарядовом состоянии Z) дырок в v -зону (т. е. захвата электронов из v -зоны на t -дефекты), G_{np} – скорость межзонной тепловой генерации электронов и дырок, $R_n(t, Z)$ – скорость теплового захвата на t -дефекты в зарядовом состоянии Z электронов из c -зоны, $R_p(t, Z)$ – скорость теплового захвата на t -дефекты в зарядовом состоянии Z дырок из v -зоны (т. е. выброса электронов t -дефектами в v -зону), R_{np} – скорость межзонной рекомбинации электронов и дырок,

$$\begin{aligned}G_n(t, 0) &= \beta_{t,n} N_{t,0}(x) = \alpha_{t,n} N_{t,0}(x) \left[n(x) \frac{N_{t,+1}(x)}{N_{t,0}(x)} \right]_{\text{eq}}; \\ R_n(t, +1) &= \alpha_{t,n} n(x) N_{t,+1}(x); \\ G_n(t, -1) &= \beta_{t,n} N_{t,-1}(x) = \alpha_{t,n} N_{t,-1}(x) \left[n(x) \frac{N_{t,0}(x)}{N_{t,-1}(x)} \right]_{\text{eq}}; \\ R_n(t, 0) &= \alpha_{t,n} n(x) N_{t,0}(x); \\ G_p(t, +1) &= \beta_{t,p} N_{t,+1}(x) = \alpha_{t,p} N_{t,+1}(x) \left[p(x) \frac{N_{t,0}(x)}{N_{t,+1}(x)} \right]_{\text{eq}}; \\ R_p(t, 0) &= \alpha_{t,p} p(x) N_{t,0}(x); \\ G_p(t, 0) &= \beta_{t,p} N_{t,0}(x) = \alpha_{t,p} N_{t,0}(x) \left[p(x) \frac{N_{t,-1}(x)}{N_{t,0}(x)} \right]_{\text{eq}}; \\ R_p(t, -1) &= \alpha_{t,p} p(x) N_{t,-1}(x); \\ G_{np} &= \beta_{np} = \alpha_{np} [n(x)p(x)]_{\text{eq}} = \alpha_{np} n_i^2; \\ R_{np} &= \alpha_{np} n(x)p(x); \end{aligned}$$

α_{np} – коэффициент межзонной рекомбинации; β_{np} – скорость (темп) межзонной генерации; $\alpha_{t,n}$ и $\alpha_{t,p}$ – коэффициенты захвата t -дефектом электрона из c -зоны и дырки из v -зоны; $\beta_{t,n}$ и $\beta_{t,p}$ – коэффициенты теплового выброса электрона в c -зону и дырки в v -зону из t -дефекта. Индексом

eq обозначены равновесные значения величин, т. е. в отсутствие тока ($J_n = J_p = 0$) и внешнего электрического напряжения ($U = 0$), $n_i = p_i = [n_c p_v \exp(-E_g/k_B T)]^{1/2}$ – концентрации электронов n_i и дырок p_i в собственном полупроводнике; $N_{t,-1}(x)$, $N_{t,0}(x)$, $N_{t,+1}(x)$ по (2) и (3) зависят не только от x , но и от $\phi(x)$.

В стационарном состоянии (как в отсутствие, так и при возбуждении тока в p – t – n -диоде) зарядовые состояния t -дефектов удовлетворяют уравнениям баланса [11, 17]:

$$\begin{aligned}\frac{dN_{t,-1}(x)}{dt} &= R_n(t, 0) - G_n(t, -1) + \\ &\quad + G_p(t, 0) - R_p(t, -1) + G_{tt} - R_{tt} = 0, \\ \frac{dN_{t,0}(x)}{dt} &= R_n(t, +1) + G_p(t, +1) + \\ &\quad + R_p(t, -1) + G_n(t, -1) - R_n(t, 0) - G_n(t, 0) - \\ &\quad - R_p(t, 0) - G_p(t, 0) - 2(G_{tt} - R_{tt}) = 0, \\ \frac{dN_{t,+1}(x)}{dt} &= R_p(t, 0) - G_p(t, +1) + \\ &\quad + G_n(t, 0) - R_n(t, +1) + G_{tt} - R_{tt} = 0,\end{aligned}\quad (14)$$

где t – время; $G_{tt} = \beta_t [N_{t,0}(x)]^2$ – средняя скорость термически ассистированного перехода электрона между соседними t -дефектами в зарядовых состояниях (0); $R_{tt} = \alpha_t N_{t,-1}(x) N_{t,+1}(x)$ – средняя скорость (темп) перехода электрона с t -дефекта в зарядовом состоянии (–1) на соседний t -дефект в зарядовом состоянии (+1); β_t и α_t – коэффициенты взаимной тепловой ионизации и нейтрализации двух t -дефектов; см. также обозначения к системе уравнений (13). Так как $N_{t,-1}(x) + N_{t,0}(x) + N_{t,+1}(x) = N_t(x)$ не зависит от времени, то $dN_t(x)/dt = 0$. Вкладом локальной прыжковой миграции электронов между t -дефектами [8] в полную плотность тока $J = J_n(x) + J_p(x)$ пренебрегаем.

Для переходов электронов из v -зоны в c -зону и обратно коэффициент α_{np} определяется согласно [13, 16] по формуле $\alpha_{np} = (2\tau_i n_i)^{-1}$, где τ_i – время жизни электронов в c -зоне и дырок в v -зоне, ограниченное их межзонной рекомбинацией.

Коэффициенты захвата электронов c -зоны и дырок v -зоны на t -дефекты рассчитываются согласно [18]: $\alpha_{t,n} = v_n S_n$, $\alpha_{t,p} = v_p S_p$, где $S_{n(p)}$ – сечение захвата электронов (дырок); $v_{n(p)} = (8k_B T / \pi m_{nc(pc)})^{1/2}$ – средняя тепловая скорость в невырожденном газе электронов (дырок) [12], $m_{nc} = 0,259m_0$ и $m_{pc} = 0,397m_0$ – эффективные массы электропроводности для электронов и дырок.

Следуя работам [8, 19], коэффициент захвата α_t одного электрона с t -дефекта в зарядовом состоянии (-1) на ближайший к нему по расстоянию t -дефект в зарядовом состоянии $(+1)$ можно записать в виде: $\alpha_t = v_{it}/N_t(x)$, где $v_{it} \approx 10$ ТГц – характерная частота фононов кристаллической матрицы. Связь между коэффициентами тепловой ионизации β_t и захвата α_t записывается в виде: $\beta_t/\alpha_t = (1/\gamma_1\gamma_2) \exp[(E_1^{(v)} - E_2^{(v)})/k_B T]$, где $\gamma_1 \approx \gamma_2$ – факторы вырождения двух уровней энергии ($E_2^{(v)} > E_1^{(v)} > 0$) t -дефектов (далее $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$).

Система дифференциальных уравнений

В дрейфово-диффузионном приближении (см., например, [11, 13, 20]) стационарные процессы миграции электронов и дырок в p - n -переходе, где сформирован δ -слой t -дефектов, описываются системой дифференциальных уравнений (см. уравнения (8), (12), (13)):

$$\begin{aligned} \frac{dn(x)}{dx} &= -n(x) \frac{eE(x)}{k_B T} + \frac{J_n(x)}{eD_n}, \\ \frac{dp(x)}{dx} &= p(x) \frac{eE(x)}{k_B T} - \frac{J_p(x)}{eD_p}, \\ \frac{d\phi(x)}{dx} &= -E(x), \\ \frac{dE(x)}{dx} &= \frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{e}{\epsilon_r \epsilon_0} [p(x) + N_d(x) + N_{t+1}(x) - \\ &\quad - n(x) - N_a(x) - N_{t-1}(x)], \\ \frac{dJ_n(x)}{dx} &= -e [G_p(t, +1) - R_p(t, 0) + \\ &\quad + G_n(t, -1) - R_n(t, 0) + G_{np} - R_{np} - G_{tt} + R_{tt}], \\ \frac{dJ_p(x)}{dx} &= e [G_p(t, +1) - R_p(t, 0) + \\ &\quad + G_n(t, -1) - R_n(t, 0) + G_{np} - R_{np} - G_{tt} + R_{tt}]. \end{aligned} \quad (15)$$

Зная решение системы (15), можно найти распределение концентраций электронов и дырок вдоль диода, распределение электрического потенциала $\phi(x)$ и напряженности электрического поля $E(x)$, а также распределение плотностей электронного $J_n(x)$ и дырочного $J_p(x)$ токов.

Для расчета статических электрических параметров диода, таких как вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики, необходимо решать систему (15) с граничными условиями:

$$\begin{aligned} n(L/2) &= n(E_F^{(v)}(-L/2) - e\phi_b), \\ p(-L/2) &= p(E_F^{(v)}(-L/2)), \\ \phi(-L/2) &= 0, \quad \phi(L/2) = \phi_b - U, \\ J_n(-L/2) &= J_p(L/2) = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

при разных значениях внешнего напряжения U .

Стационарная плотность полного тока J есть сумма плотностей электронного $J_n(x)$ и дырочного $J_p(x)$ токов; J не зависит от x .

В медленно изменяющемся во времени внешнем электрическом поле, по сравнению с темпом обмена t -дефектов электронами и дырками с зонами разрешенных значений энергии, отношение дифференциальной емкости диода C_d к площади S плоского p - n -перехода определяется так [13, 21, 22]:

$$\frac{C_d}{S} = \frac{1}{S} \left| \frac{dQ}{dU} \right|, \quad (17)$$

где нескомпенсированный электрический заряд $Q(U)$ вычисляется интегрированием абсолютной величины плотности объемного заряда $\rho(x, U)$ по координате x так:

$$Q(U) = \frac{S}{2} \int_{-L/2}^{L/2} |\rho(x, U)| dx; \quad S \int_{-L/2}^{L/2} \rho(x, U) dx = 0.$$

Результаты расчетов и обсуждение

Численное решение системы стационарных нелинейных уравнений (15) с граничными условиями (16) выполнялось без какой-либо дополнительной подгонки в программном пакете *MatLab* 2015. Объект исследования – кремниевый диод длиной $L = 10$ мкм с параметром профиля легирования $l = 0,2$ мкм акцепторами $|ap\rangle$ и донорами $|dn\rangle$, шириной δ -слоя t -дефектов $\Delta = 3l = 0,6$ мкм и концентрацией t -дефектов $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в центре p - n -перехода (при $x = 0$). В качестве легирующих водородоподобных атомов примесей были выбраны бор (акцепторы) и фосфор (доноры) с концентрациями на границах диода: $N_a(-L/2) = N_d(L/2) = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (т. е. симметричный p - t - n -диод). Вероятные средние значения уровней энергии t -дефектов в запрещенной зоне (энергетической щели) кремния оценены по работе [23] так: $E_1^{(v)} = 210$ мэВ, $E_2^{(v)} = 780$ мэВ.

Следуя [24, 25] принималось, что время жизни электронов и дырок в кристаллическом кремнии (ограниченное их межзонной рекомбинацией при концентрациях атомов бора N_a и фосфора N_d меньше 10^{16} см^{-3}) $\tau_i = 100$ мкс. При расчетах использовались вероятные значения сечений захвата, соответствующие дефектам типа дивакансии [26–30]: $S_n = 10^{-15} \text{ см}^2$ [при захвате электронов s -зоны на t -дефекты в зарядовых состояниях (0) и (+1)] и $S_p = 10^{-14} \text{ см}^2$ [при захвате дырок v -зоны на t -дефекты в зарядовых состояниях (-1) и (0)].

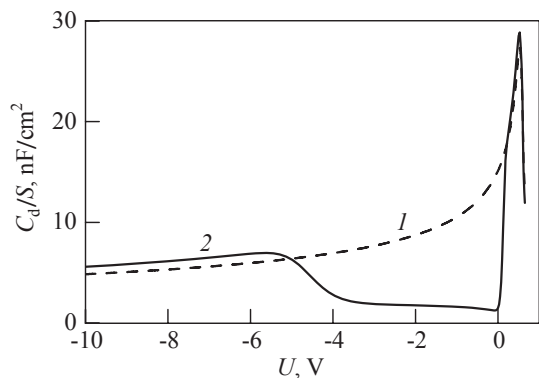


Рисунок 3 – Зависимость статической (низкочастотной) емкости C_d (отнесенной к площади p – n -перехода S) от напряжения U на диоде: кривая 1 – p – n -диод без t -дефектов; 2 – p – t – n -диод, содержащий в области p – n -перехода δ -слой t -дефектов $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Figure 3 – Dependence of static (low-frequency) capacitance C_d (related to the area of p – n -junction S) on the voltage U through diode: curve 1 is p – n -diode without t -defects; 2 is p – t – n -diode containing in p – n -junction region a δ -layer of t -defects $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Далее все расчеты электрических параметров p – t – n -диода, а также p – n -диода выполнены для температуры $T = 300 \text{ К}$.

На рисунке 3 представлены вольт-фарадные характеристики кремниевого диода без t -дефектов (кривая 1) и содержащего δ -слой t -дефектов [$N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$] в области p – n -перехода (кривая 2).

На рисунке 4 для p – t – n -диода представлено распределение объемной плотности заряда $\rho(x, U)$ вдоль диода для напряжений смещения: $U = 0$; $-2,5$; $+0,3 \text{ В}$. Зависимость $\rho(x)$ несимметрична относительно $x = 0$ в основном из-за того, что уровни энергии $E_1^{(v)}$ и $E_2^{(v)}$ несимметричны относительно середины запрещенной энергетической зоны кремния. Так как согласно (13) дивергенция суммарного стационарного тока электронов и дырок $dJ/dx = d(J_n + J_p)/dx$ равна нулю, то суммарный заряд между p^+ - и n^+ -контактами к диоду равен нулю:

$$S \int_{-L/2}^{L/2} \rho(x, U) dx = 0.$$

Низкочастотная дифференциальная емкость C_d кремниевого p – n -диода (без t -дефектов) получена в результате решения стационарной системы дифференциальных уравнений (15), которая в дрейфово-диффузионном приближении описывает процессы миграции, а также межзонной рекомбинации электронов и дырок. При расчете в

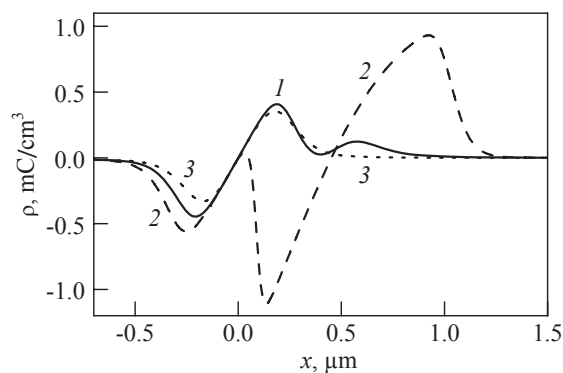


Рисунок 4 – Зависимость объемной плотности электрического заряда ρ от координаты x для p – t – n -диода [$N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $\Delta = 3l = 0.6 \text{ мкм}$] при напряжении $U = 0 \text{ В}$ (кривая 1), $U = -2,5 \text{ В}$ (2) и $U = 0,3 \text{ В}$ (3)

Figure 4 – Dependence of volume density of electric charge ρ on coordinate x for p – t – n -diode [$N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\Delta = 3l = 0.6 \text{ мкм}$] at voltage $U = 0 \text{ В}$ (curve 1), $U = -2,5 \text{ В}$ (2) and $U = 0,3 \text{ В}$ (3)

качестве легирующих примесей [ap] и [dn]) были выбраны бор и фосфор, распределенные согласно формуле (1). Расчет показывает, что в пределе $l \rightarrow 0$ зависимость барьерной емкости C_d от обратного напряжения смещения ($U < 0$) согласуется с классической формулой для p – n -диода с резким плоским p – n -переходом [21, 22]:

$$\frac{C_d}{S} = \sqrt{\frac{e \varepsilon_r \varepsilon_0 N_a N_d}{2(\phi_b - U)(N_a + N_d)}}, \quad (18)$$

где S – площадь p – n -перехода; $\phi_b > 0$ – контактная разность электрических потенциалов.

По сравнению с диодом без t -дефектов, вольт-фарадная характеристика $C_d(U)$ диода с t -дефектами отличается немонотонной зависимостью дифференциальной емкости C_d от напряжения смещения (при обратном смещении возникает аномальная область с участком увеличения емкости). Это можно объяснить перераспределением зарядовых состояний t -дефектов по координате x в двойном электрическом слое при обратном смещении диода (см. рисунок 4) [31, 32]. Емкость p – t – n -диода увеличивается до тех пор, пока не произойдет полная перезарядка t -дефектов. После этого емкость начинает уменьшаться при увеличении обратного смещения ($U < 0$), как и в диоде без t -дефектов (см. формулу (18)). Вольт-фарадная характеристика такого типа наблюдалась [3] в кремниевом диоде, в котором путем ионной имплантации ксенона был сформирован слой компенсирующих дефектов с максимальной концентрацией вблизи p – n -перехода.

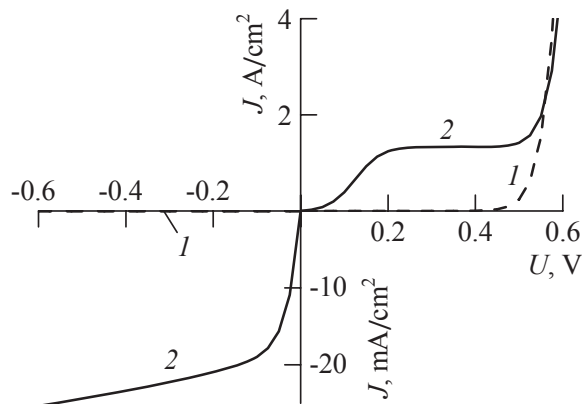


Рисунок 5 – Зависимость стационарной плотности электрического тока $J = J_n + J_p$ от напряжения U на p - n -диоде [кривая 1 при $N_t(0) = 0$] и на p - t - n -диоде [кривая 2 при $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$]

Figure 5 – Dependence of stationary electric current density $J = J_n + J_p$ on the voltage U through p - n -diode [curve 1 for $N_t(0) = 0$] and through p - t - n -diode [curve 2 for $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$]

На рисунке 5 представлены рассчитанные вольт-амперные характеристики (ВАХ) кремниевое диода без t -дефектов (кривая 1) и диода со слоем t -дефектов в области p - n -перехода (кривая 2). Отметим, что рассчитанная ВАХ диода без t -дефектов (кривая 1) хорошо согласуется с ВАХ реальных симметричных кремниевых диодов [25].

Для диода со слоем t -дефектов в области p - n -перехода (кривая 2) модель, построенная выше, предсказывает существенное отличие ВАХ. Так, из графика видно, что при обратном смещении, ток через диод, содержащий δ -слой t -дефектов, значительно больше обратного тока через диод без t -дефектов. (Максимальная напряженность электрического поля E внутри кремниевое p - t - n -диода была на порядок меньше порогового значения ($\approx 100 \text{ кВ/см}$) для электрического пробоя p - n -диода при комнатной температуре [33, 34].)

Прямая ветвь ВАХ диода со слоем t -дефектов в области p - n -перехода (кривая 2) также отличается от ВАХ диода без t -дефектов (кривая 1) и напоминает ВАХ обращенного p^+-n^+ -диода [35]. Точнее, построенная модель предсказывает, что при увеличении прямого напряжения смещения от 0 до 0,2 В ток через диод, содержащий δ -слой t -дефектов в области p - n -перехода, суперлинейно увеличивается, после чего в диапазоне напряжений от 0,2 до 0,45 В происходит его стабилизация. Это можно объяснить рекомбинацией электронов и дырок на t -дефектах в двойном электрическом

слое толщиной $x_a + x_d$. Из-за асимметрии сечений захвата дырок и электронов ($S_p > S_n$) инжектируемые из p -области в область двойного электрического слоя дырки захватываются отрицательно заряженными t -дефектами и нейтрализуют их. При дальнейшем увеличении напряжения электроны s -зоны и дырки v -зоны не успевают прорекомбинировать на t -дефектах, что приводит к резкому (экспоненциальному) увеличению тока двойной инжекции, и кривая 2 для p - t - n -диода практически совпадает с кривой 1 для p - n -диода (без t -дефектов).

Заключение

Впервые построена модель симметричного кремниевое p - t - n -диода, содержащего в области p - n -перехода δ -слой точечных двухуровневых t -дефектов, которые могут находиться в трех зарядовых состояниях ($-1, 0, +1$). В рамках дрейфово-диффузионного приближения рассчитаны статическая емкость и плотность электрического тока для p - t - n -диода с невырожденными областями p - и n -типа электропроводности при прямом и обратном напряжениях смещения.

Расчеты показывают, что в p - t - n -диоде при прямом смещении ($U > 0$) в диапазоне напряжений от 0,2 до 0,45 В для комнатной температуры плотность тока значительно больше, чем в диоде без t -дефектов, и слабо зависит от напряжения U (область стабилизации тока). Плотность обратного тока в p - t - n -диоде на несколько порядков больше, чем в обычном p - n -диоде (без t -дефектов). Таким образом, при прямом смещении p - t - n -диод имитирует обращенный p^+-n^+ -диод. При обратном смещении ($U < 0$) низкочастотная барьерная емкость диода с t -дефектами немонотонно зависит от U . При малых смещениях емкость p - t - n -диода существенно меньше емкости диода без t -дефектов.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Маттех». Авторы признательны А.Т. Власову и С.А. Вырко за конструктивные замечания по алгоритму расчета электрических параметров диодов.

The work was supported by the Belarusian National Research Program «Mattekh». The authors are grateful to A.T. Vlassov and S.A. Vyrko for helpful comments on the algorithm of calculation of electrical parameters of diodes.

Список использованных источников

1. Шик, А.Я. Полупроводниковые структуры с δ -слоями / А.Я. Шик // ФТП. – 1992. – Т. 26, № 7. – С. 1161–1181.
2. El-Hajj, H. Characteristics of boron δ -doped diamond for electronic applications / H. El-Hajj [et al.] // Diamond Relat. Mater. – 2008. – V. 17, № 4–5. – pp. 409–414. doi: 10.1016/j.diamond.2007.12.030
3. Poklonski, N.A. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions / N.A. Poklonski [et al.] // Microelectron. Reliab. – 2010. – Vol. 50, № 6. – pp. 813–820. doi: 10.1016/j.microrel.2010.02.007
4. Li, J. 35% efficient nonconcentrating novel silicon solar cell / J. Li [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1992. – Vol. 60, № 18. – P. 2240–2242. doi: 10.1063/1.107042
5. Summonte, C. Spectral behavior of solar cells based on the “junction near local defect layer” design / C. Summonte [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1993. – Vol. 63, № 6. – P. 785–787. doi: 10.1063/1.109907
6. Комаров, Ф.Ф. Моделирование технологических процессов субмикронной электроники для систем проектирования интегральных схем / Ф.Ф. Комаров [и др.] // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2011. – № 3. – С. 26–32.
7. Замалин, Е.Ю. Некоторые задачи моделирования технологических процессов изготовления приборов микроэлектроники / Е.Ю. Замалин, О.Б. Бондарь // Микроэлектроника. – 1995. – Т. 24, № 4. – С. 309–314.
8. Поклонский, Н.А. Полупроводниковый диод с прыжковой миграцией электронов по точечным дефектам кристаллической матрицы / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко, А.Т. Власов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 3. – С. 30–37.
9. Siemieniec, R. Compensation and doping effects in heavily helium-radiated silicon for power device applications / R. Siemieniec [et al.] // Microelectron. J. – 2006. – Vol. 37, № 3. – P. 204–212. doi: 10.1016/j.mejo.2005.09.011
10. Челядинский, А.Р. Эффект Воткинса в полупроводниках. Явление и приложения в микроэлектронике / А.Р. Челядинский, В.Б. Оджаяев // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2011. – № 3. – С. 10–17.
11. Поклонский, Н.А. Ионизационное равновесие и прыжковая электропроводность в легированных полупроводниках. – Минск : БГУ, 2004. – 195 с.
12. Поклонский, Н.А. Статистическая физика полупроводников / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, С.Л. Поденок. – М. : КомКнига, 2005. – 264 с.
13. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1990. – 688 с.
14. Poklonski, N.A. Drift-diffusion model of hole migration in diamond crystals via states of valence and acceptor bands / N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, A.I. Koval, A.N. Dzeraviahia // J. Phys. Commun. – 2018. – Vol. 2, № 1. – P. 015013 (14 p.). doi: 10.1088/2399-6528/aa8e26
15. Мнацаканов, Т.Т. Универсальный метод аналитической аппроксимации подвижности основных носителей заряда в полупроводниках в широком диапазоне температур и уровней легирования / Т.Т. Мнацаканов, М.Е. Левинштейн, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 1. – С. 56–60. doi: 10.1134/1.1641133
16. Воловичев, И.Н. Генерационно-рекомбинационные процессы в полупроводниках / И.Н. Воловичев, Ю.Г. Гуревич // ФТП. – 2001. – Т. 35, № 3. – С. 321–329. doi: 10.1134/1.1356153
17. Поклонский, Н.А. Дрейф и диффузия электронов по двухуровневым (трехзарядным) точечным дефектам в кристаллических полупроводниках / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 3. – С. 37–43.
18. Bleichner, H. Temperature and injection dependence of the Shockley–Read–Hall lifetime in electron irradiated *n*-type silicon / H. Bleichner, P. Jonsson, N. Keskitalo, E. Nordlander // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79, № 12. – P. 9142–9148. doi: 10.1063/1.362585
19. Львов, В.С. Межцентровые переходы носителей заряда в частично разупорядоченном кремнии: эксперимент и обсуждение результатов / В.С. Львов, В.И. Стриха, О.В. Третьяк, А.А. Шматов // ФТТ. – 1989. – Т. 31, № 11. – С. 206–213.
20. Березин, Ю.А. Метод расщепления для задач физики полупроводников / Ю.А. Березин, Н.Н. Яненко // Докл. Акад. наук СССР. – 1984. – Т. 274, № 6. – С. 1338–1340.
21. Ржевский, К.С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов / К.С. Ржевский. – М. : МГУ, 1986. – 256 с.
22. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. – М. : Высш. шк., 1991. – 351 с.
23. Коршунов, Ф.П. Об акцепторных уровнях дивакансии в кремнии / Ф.П. Коршунов, В.П. Маркевич, И.Ф. Медведева, Л.И. Мурин // ФТП. – 1992. – Т. 26, № 11. – С. 2006–2010.
24. Schroder, D.K. Carrier lifetimes in silicon / D.K. Schroder // IEEE Trans. Electron Dev. – 1997. – Vol. 44, № 1. – P. 160–170. doi: 10.1109/16.554806
25. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М. : Мир, 1989. – 630 с.
26. Комаров, Б.А. Особенности отжига радиационных дефектов в кремниевых *p-n*-структурах: роль примесных атомов железа / Б.А. Комаров // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 9. – С. 1079–1083. doi: 10.1134/1.1797482
27. Абакумов, В.Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках / В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясиевич. – СПб. : ПИЯФ РАН, 1997. – 376 с. doi: 10.1016/B978-0-444-88854-9.50002-3

28. Бургуэн, Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты / Ж. Бургуэн, М. Ланно. – М.: Мир, 1985. – 304 с.
doi: 10.1007/978-3-642-81832-5

29. Емцев, В.В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках / В.В. Емцев, Т.В. Машовец. – М.: Радио и связь, 1981. – 248 с.

30. Милнс, А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках / А. Милнс. – М.: Мир, 1977. – 564 с.

31. Шеховцов, Н.А. Дифференциальная емкость p^+-p -перехода / Н.А. Шеховцов // ФТП. – 2012. – Т. 46, № 1. – С. 60–69. **doi:** 10.1134/S1063782612010174

32. Мурыгин, В.И. Аномальные зависимости барьерной емкости диода от напряжения смещения и температуры / В.И. Мурыгин, А.У. Фаттахдинов, Д.А. Локтев, В.Б. Гундырев // ФТП. – 2007. – Т. 41, № 10. – С. 1207–1213. **doi:** 10.1134/S1063782607010174

33. Кюрегян, А.С. Напряжение лавинного пробоя $p-n$ -переходов на основе Si, Ge, SiC, GaAs, GaP и InP при комнатной температуре / А.С. Кюрегян, С.Н. Юрков // ФТП. – 1989. – Т. 23, № 10. – С. 1819–1827.

34. Maes, W. Impact ionization in silicon: a review and update / W. Maes, K. De Meyer, R. Van Overstraeten // Solid-State Electron. – 1990. – Vol. 33, № 6. – P. 705–718.
doi: 10.1016/0038-1101(90)90183-F

35. Ng, K.K. Complete guide to semiconductor devices / K.K. Ng. – New York: Wiley, 2002. – xxiv+740 p.
doi: 10.1002/9781118014769

References

1. Shik A.Ya. Semiconductor structures with delta-layers. *Sov. Phys. Semicond.*, 1992, vol. 26, no. 7, pp. 649–660.

2. El-Hajj H., Denisenko A., Bergmaier A., Dollinger G., Kubovic M., Kohn E. Characteristics of boron δ -doped diamond for electronic applications. *Diamond Relat. Mater.*, 2008, vol. 17, no. 4–5, pp. 409–414.
doi: 10.1016/j.diamond.2007.12.030

3. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Lastovskii S.B., Skuratov V.A., Wieck A., Markevich V.P. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions. *Microelectron. Reliab.*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 813–820.
doi: 10.1016/j.microrel.2010.02.007

4. Li J., Chong M., Zhu J., Li Y., Xu J., Wang P., Shang Z., Yang Z., Zhu R., Cao X. 35% efficient non-concentrating novel silicon solar cell. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, vol. 60, no. 18, pp. 2240–2242. **doi:** 10.1063/1.107042

5. Summonte C., Biavati M., Gabilli E., Galloni R., Guerri S., Rizzoli R., Zignani F. Spectral behavior of solar cells based on the “junction near local defect layer” design. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, vol. 63, no. 6, pp. 785–787.
doi: 10.1063/1.109907

6. Komarov F.F., Komarov A.F., Mironov A.M., Zayats G.M., Makarevich Yu.V., Miskevich S.A. [Simulation of the submicron electronics processing technologies for the computer-aided design of integrated circuits]. *Vestnik BGU. Ser. 1* [BSU Bull. Ser. 1], 2011, no. 3, pp. 26–32 (in Russian).

7. Zamalin E.Yu., Bondar’ O.B. [Some problems of modeling of technological processes for the manufacturing of microelectronics devices]. *Mikroelektronika* [Russ. Microelectron.], 1995, vol. 24, no. 4, pp. 309–314 (in Russian).

8. Poklonski N.A., Kovalev A.I., Vyrko S.A., Vlassov A.T. Semiconductor diode with hopping migration of electrons via point defects of crystalline matrix. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 3, pp. 30–37 (in Russian).

9. Siemieniec R., Schulze H.-J., Niedernostheide F.-J., Südkamp W., Lutz J. Compensation and doping effects in heavily helium-radiated silicon for power device applications. *Microelectron. J.*, 2006, vol. 37, no. 3, pp. 204–212.
doi: 10.1016/j.mejo.2005.09.011

10. Chelyadinskii A.R., Odzaev V.B. [Watkins effect in semiconductors. Phenomenon and applications in microelectronics]. *Vestnik BGU. Ser. 1* [BSU Bull. Ser. 1], 2011, no. 3, pp. 10–17 (in Russian).

11. Poklonski N.A. [Ionization equilibrium and hopping conductivity in doped semiconductors]. Minsk, BGU Publ., 2004, 195 p. (in Russian).

12. Poklonski N.A., Vyrko S.A., Podenok S.L. Statistical physics of semiconductors. Moscow, KomKniga Publ., 2005, 264 p. (in Russian).

13. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G. Semiconductor physics. Moscow, Nauka Publ., 1990, 688 p. (in Russian).

14. Poklonski N.A., Vyrko S.A., Kovalev A.I., Dze-raviah A.N. Drift-diffusion model of hole migration in diamond crystals via states of valence and acceptor bands. *J. Phys. Commun.*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 015013 (14 p.).
doi: 10.1088/2399-6528/aa8e26

15. Mnatsakanov T.T., Levinshtein M.E., Pomortseva L.I., Yurkov S.N. Universal analytical approximation of the carrier mobility in semiconductors for a wide range of temperatures and doping densities. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, no. 1, pp. 56–60. **doi:** 10.1134/1.1641133

16. Volovichev I.N., Gurevich Yu.G. Generation-recombination processes in semiconductors. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, no. 3, pp. 306–315.
doi: 10.1134/1.1356153

17. Poklonski N.A., Kovalev A.I., Vyrko S.A. [Drift and diffusion of electrons via two-level (triplecharged) point defects in crystalline semiconductors]. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2014, vol. 58, no. 3, pp. 37–43.

18. Bleichner H., Jonsson P., Keskitalo N., Nordlander E. Temperature and injection dependence of the Shockley–Read–Hall lifetime in electron irradiated *n*-type silicon. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, no. 12, pp. 9142–9148. **doi:** 10.1063/1.362585
19. L'vov V.S., Strikha V.I., Tretyak O.V., Shmatov A.A. Intercenter carrier transitions in partly disordered silicon: experiments and discussion of results. *Sov. Phys. Solid State*, 1989, vol. 31, no. 11, pp. 1953–1958.
20. Berezin Yu.A., Yanenko N.N. Method of splitting for solution of problems in semiconductor physics. USSR Rept. Phys. Math., 1984, JPRS-UPM-84-006, pp. 117.
21. Rzhevkin K.S. [Physical principles of semiconductor device operation]. Moscow, MGU Publ., 1986, 256 p. (in Russian).
22. Rosado L. Electrónica física y microelectrónica. Madrid, Paraninfo, 1987, 502 p.
23. Korshunov F.P., Markevich V.P., Medvedeva I.F., Murin L.I. Acceptor levels of a divacancy in silicon. *Sov. Phys. Semicond.*, 1992, vol. 26, no. 11, pp. 1129–1131.
24. Schroder D.K. Carrier lifetimes in silicon. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 1997, vol. 44, no. 1, pp. 160–170. **doi:** 10.1109/16.554806
25. Muller R.S., Kamins T.I., Chan M. Device Electronics for Integrated Circuits. New York, Wiley, 2002, xx+528 p.
26. Komarov B.A. Special features of radiation-defect annealing in silicon *p–n* structures: The role of Fe impurity atoms. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, no. 9, pp. 1041–1046. **doi:** 10.1134/1.1797482
27. Abakumov V.N., Perel' V.I., Yassievich I.N. Nonradiative Recombination in Semiconductors. Amsterdam, North-Holland, 1991, xvi+320 p. **doi:** 10.1016/B978-0-444-88854-9.50002-3
28. Bourgoin J., Lannoo M. Point Defects in Semiconductors II. Experimental Aspects. Berlin, Springer, 1983, xvi+296 p. **doi:** 10.1007/978-3-642-81832-5
29. Emtsev V.V., Mashovets T.V. [Impurities and point defects in semiconductors]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981, 248 p. (in Russian).
30. Milnes A.G. Deep Impurities in Semiconductors. New York, Wiley, 1973, xviii+526 p.
31. Shekhovtsov N.A. Differential capacitance of a p^+-p junction. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, no. 1, pp. 56–66. **doi:** 10.1134/S1063782612010174
32. Murygin V.I., Fattakhidinov A.U., Loktev D.A., Gundyrev V.B. Anomalous dependences of the diode barrier capacitance on bias voltage and temperature. *Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 10, pp. 1189–1196. **doi:** 10.1134/S1063782607100120
33. Kyuregyan A.S., Yurkov S.N. Room-temperature avalanche breakdown voltages of *p–n* junctions made of Si, Ge, SiC, GaAs, GaP, and InP. *Sov. Phys. Semicond.*, 1989, vol. 23, no. 10, pp. 1126–1131.
34. Maes W., De Meyer K., Van Overstraeten R. Impact ionization in silicon: a review and update. *Solid-State Electron.*, 1990, vol. 33, no. 6, pp. 705–718. **doi:** 10.1016/0038-1101(90)90183-F
35. Ng K.K. Complete Guide to Semiconductor Devices. New York, Wiley, 2002, xxiv+740 p. **doi:** 10.1002/9781118014769