

**Н. А. Поклонский, А. И. Ковалев, С. А. Вырко**

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

## **НИЗКОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА С ПРЫЖКОВОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ ПО ТРЕХЗАРЯДНЫМ ДЕФЕКТАМ**

*(Представлено академиком Н. М. Олехновичем)*

**Аннотация.** Впервые теоретически рассчитана емкость полупроводникового  $p^+n^+$ -диода, в котором и  $p^+$ -область, и  $n^+$ -область полностью компенсированы точечными радиационными дефектами ( $rt$ -дефектами) одного вида. Каждый  $rt$ -дефект вносит два уровня энергии в энергетическую щель (запрещенную зону) кристаллической матрицы и может находиться в одном из трех зарядовых состояний  $(-1, 0, +1)$ . Такой диод, в котором отсутствуют и электроны в  $c$ -зоне, и дырки в  $v$ -зоне, называется  $\zeta$ -диодом. Ток в  $\zeta$ -диоде осуществляется только посредством прыжков электронов между  $rt$ -дефектами. В дрейфово-диффузионном приближении численно решена система стационарных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая прыжковую миграцию электронов по  $rt$ -дефектам. Рассчитаны статические вольт-фарадные характеристики  $\zeta$ -диода на основе кристаллического кремния для интервала рабочих температур от 78 до 373 К. Отмечена возможность использования  $\zeta$ -диодов в качестве радиационно-стойких варикапов, работающих при низких (криогенных) температурах.

**Ключевые слова:** трехзарядные радиационные дефекты, прыжковая миграция электронов, дрейфово-диффузионное приближение, полупроводниковый диод, дифференциальная электрическая емкость

**Для цитирования:** Поклонский, Н. А. Низкочастотная электроемкость полупроводникового диода с прыжковой электропроводностью по трехзарядным дефектам / Н. А. Поклонский, А. И. Ковалев, С. А. Вырко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 4. – С. 52–59.

**Nikolai A. Poklonski, Alexander I. Kovalev, Sergey A. Vyrko**

*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

## **LOW-FREQUENCY ELECTRICAL CAPACITANCE OF SEMICONDUCTOR DIODE WITH HOPPING CONDUCTIVITY VIA TRIPLE-CHARGED DEFECTS**

*(Communicated by Academician Nikolai M. Olekhovich)*

**Abstract.** For the first time the capacitance of a semiconductor  $p^+n^+$ -diode is theoretically calculated, in which both the  $p^+$ -region and the  $n^+$ -region are completely compensated with point irradiation-induced defects ( $rt$ -defects) of one kind. Each  $rt$ -defect introduces two energy levels into a band gap of crystalline host matrix and can be one of three charge states  $(-1, 0, +1)$ . Such a diode, in which both electrons in the conduction band and holes in the valence band are absent, is called a  $\zeta$ -diode. The  $\zeta$ -diode current is performed by electron hopping via  $rt$ -defects only. In the drift-diffusion approximation, a system of stationary nonlinear differential equations for hopping migration of electrons via  $rt$ -defects is numerically solved. The static capacitance-voltage characteristics of the  $\zeta$ -diode based on crystalline silicon are calculated for the operating temperature ranging from 78 to 373 K. It is shown that the  $\zeta$ -diode can be used as radiation-resistant varicaps operating at low (cryogenic) temperatures.

**Keywords:** triple-charged irradiation-induced defects, hopping migration of electrons, drift-diffusion approximation, semiconductor diode, differential capacitance

**For citation:** Poklonski N. A., Kovalev A. I., Vyrko S. A. Low-frequency electrical capacitance of semiconductor diode with hopping conductivity via triple-charged defects. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 4, pp. 52–59 (in Russian).

**Введение.** Прыжковая электрическая проводимость в ковалентных полупроводниковых материалах – явление направленной миграции электронов (или дырок) вдоль напряженности внешнего электрического поля посредством их термически активированного туннелирования между атомными дефектами структуры (строения) в различных зарядовых состояниях [1]. Считается, что время прыжка электрона много меньше времени его локализации на дефекте [2].

В кристаллических полупроводниках прыжковая электропроводность проявляется в виде прыжковой миграции электронов по атомам примесей. Например, в [3] показано, что прыжковая миграция дырок по атомам бора и электронов по атомам фосфора в алмазе осуществляется даже при комнатной температуре (см. также [4]). Однако атомы примесей при увеличении их концентрации в кристаллической матрице образуют скопления (ассоциаты) [5]. Вообще, в кристаллах реализовать прыжковую электропроводность при комнатной температуре можно по *rt*-дефектам – радиационным точечным дефектам одного вида в трех зарядовых состояниях (–1, 0, +1). Такие радиационные дефекты позволяют существенно модифицировать свойства полупроводников, не изменяя их химического состава [6; 7]. В частности, достаточно большая объемная концентрация *rt*-дефектов ( $\sim 10^{19}$  см<sup>–3</sup>) приводит к стабилизации уровня Ферми в нижней половине запрещенной зоны кристаллов алмаза, карбида кремния и кремния [8].

Актуальность исследования электрической емкости полупроводниковых материалов с прыжковой миграцией электронов по *rt*-дефектам обусловлена возможностью создания на их основе новых радиационно-стойких варикапов [9; 10], функционирующих при низких (криогенных) температурах [11]. В [12] показано, что на квазистатическую емкость кристаллических полупроводников (в режиме измерения на них эффекта поля) влияет концентрация и вид (тип) *rt*-дефектов, а также температура. Далее, в [13] была предложена схема  $\zeta$ -диода, который образован облучением быстрыми реакторными нейтронами исходного  $p^+n^+$ -диода с резким плоским  $p^+n^+$ -переходом. В результате последующего термического отжига в запрещенной энергетической зоне частично разупорядоченной кристаллической матрицы диода возможно формирование уединенных точечных двухуровневых трехзарядных *rt*-дефектов. В рамках дрейфово-диффузионного приближения прыжкового переноса электронов по *rt*-дефектам расчетным способом показана асимметрия статической вольт-амперной характеристики  $\zeta$ -диода даже при самых низких температурах (пока вообще существует прыжковая миграция электронов по *rt*-дефектам).

Цель работы – в рамках модели  $\zeta$ -диода рассчитать зависимость низкочастотной дифференциальной электрической емкости  $\zeta$ -диода от внешнего электрического напряжения и температуры в условиях прыжкового переноса электронов между *rt*-дефектами. Предполагается, что частота внешнего электрического поля много меньше, чем средняя частота прыжков электронов между *rt*-дефектами. В отличие от работ [14–16], электроемкость рассчитывается при возбуждении квазистационарного тока в  $\zeta$ -диоде.

**Модель  $\zeta$ -диода. Основные соотношения.** Напомним кратко основные свойства модели  $\zeta$ -диода с плоским  $p^+n^+$ -переходом из [13] (рис. 1). В кристаллическом полупроводнике длиной  $L$

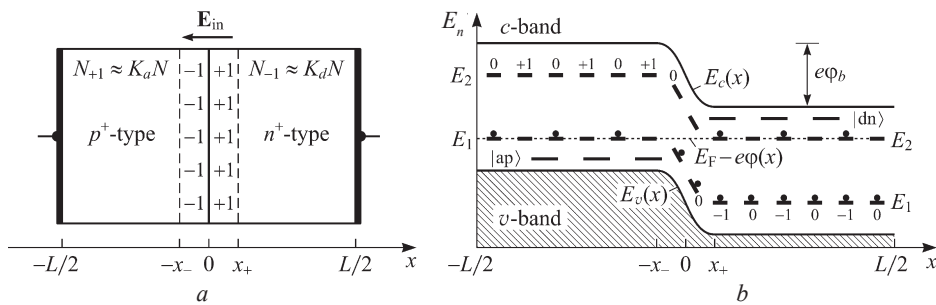


Рис. 1. *a* – Схема  $\zeta$ -диода; границы двойного электрического слоя толщиной  $x_- + x_+$  отмечены штриховыми линиями;  $E_{in}$  – напряженность внутреннего электрического поля в двойном электрическом слое; *b* – энергетическая зонная диаграмма  $\zeta$ -диода (зависимость одноэлектронной энергии  $E_n$  от координаты  $x$ ) в термодинамическом равновесии,  $E_1$  и  $E_2$  – уровни энергии *rt*-дефектов в зарядовых состояниях (+1, 0, –1), |ap> – уровни энергии акцепторов [все в зарядовом состоянии (–1)], |dn> – уровни энергии доноров [все в зарядовом состоянии (+1)],  $E_F - e\phi(x)$  – электрохимический потенциал для электронов,  $E_c(x)$ ,  $E_v(x)$  – энергии дна *c*-зоны и потолка *v*-зоны; начало отсчета  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_F - e\phi(x)$  – потолок *v*-зоны  $E_v(x)$ ;  $e\phi_b = E_2 - E_1$  – энергетический барьер;  $e$  – элементарный заряд

Fig. 1. (a) The scheme of the  $\zeta$ -diode; the boundaries of the electrical double layer of the width  $x_- + x_+$  are indicated by dashed lines;  $E_{in}$  is the strength of the internal electric field in the electrical double layer; (b) The energy band diagram of the  $\zeta$ -diode (dependence of the single-electron energy  $E$  on the coordinate  $x$ ) in thermodynamic equilibrium,  $E_1$  and  $E_2$  are the energy levels of *rt*-defects in the charge states (+1, 0, –1), |ap> are the energy levels of acceptors [all in the charge state (–1)], |dn> are the energy levels of donors [all in the charge state (+1)],  $E_F - e\phi(x)$  is the electrochemical potential for electrons, and  $E_c(x)$  and  $E_v(x)$  are the energies of the bottom of the *c*-band and the top of the *v*-band; the reference point of  $E_1$ ,  $E_2$  and  $E_F - e\phi(x)$  is the top of the *v*-band  $E_v(x)$ ;  $e\phi_b = E_2 - E_1$  is the energy barrier;  $e$  is the elementary charge

имеются «жесткие»  $rt$ -дефекты в трех зарядовых состояниях  $(-1, 0, +1)$  с концентрацией  $N = N_{-1}(x) + N_0(x) + N_{+1}(x)$ , где  $N_Z(x)$  – концентрация  $rt$ -дефектов в зарядовом состоянии  $Z = -1, 0, +1$  в точке с координатой  $x$ . Энергетические уровни  $rt$ -дефектов  $E_1 > 0$  и  $E_2 > 0$  формируют в запрещенной зоне  $\zeta$ -диода две энергетические зоны. Прыжковый механизм переноса электронов реализуется при частичном заполнении уровней энергии  $E_1$  и  $E_2$  электронами.

Начало координат выбрано в металлургической границе  $p^+n^+$ -перехода ( $x = 0$ ), на которой концентрация легирующих водородоподобных акцепторов равна концентрации легирующих водородоподобных доноров. В  $\zeta$ -диоде эти доноры и акцепторы с концентрациями  $N_d = K_d N$ ,  $N_a = K_a N$ , где  $0 < K_d < 1$  и  $0 < K_a < 1$ , полностью ионизованы и находятся в зарядовых состояниях  $(+1)$  и  $(-1)$  соответственно. Распределение легирующих атомов примесей вдоль  $\zeta$ -диода (вдоль координаты  $x$ ) задается технологией его изготовления:

$$N_d(x) = K_d N / [1 + \exp(x / l)], \quad N_a(x) = K_a N / [1 + \exp(-x / l)], \quad (1)$$

где  $x$  – координата; параметр  $l$  задает профиль легирования акцепторами и донорами  $\zeta$ -диода.

В условиях термодинамического равновесия (т. е. в отсутствие электрического тока) зарядовые состояния  $rt$ -дефектов перераспределяются вдоль  $\zeta$ -диода таким образом, чтобы компенсировать заряды положительно заряженных водородоподобных доноров  $\langle dn \rangle$  и отрицательно заряженных акцепторов  $\langle ar \rangle$ . В этом случае вдали от области обеднения для  $|x| \gg l$  выполняются условия электрической нейтральности:  $N_{+1} \approx K_a N$  – для области  $p^+$ -типа и  $N_{-1} \approx K_d N$  – для области  $n^+$ -типа.

Если положить  $K_d = K_a = 0,5$ , то электрохимический потенциал  $E_F - e\varphi(x)$ , где  $E_F < 0$  – уровень Ферми;  $\varphi(x)$  – электрический потенциал в  $p^+$ -области совпадает с уровнем энергии  $E_1$ , а в  $n^+$ -области – с уровнем энергии  $E_2$ . Поскольку в равновесии электрохимический потенциал  $E_F - e\varphi(x)$  в  $\zeta$ -диоде постоянен, то контактная разность электрических потенциалов  $\varphi_b = \varphi(L/2) - \varphi(-L/2)$  определится разностью между уровнями энергии  $E_2$  и  $E_1$ , т. е.  $\varphi_b = (E_2 - E_1)/e$ , где  $e$  – элементарный заряд.

Как показано в [13], приложенное к находящемуся в термостате  $\zeta$ -диоду внешнее электрическое поле вызывает прыжковый ток, который не зависит от координаты и является суммой двух токов плотностью  $J_h = J_{-1,0}(x) + J_{0,+1}(x)$ . Ток плотностью  $J_{-1,0}$  обусловлен прыжками электронов между  $rt$ -дефектами в зарядовых состояниях  $(-1)$  и  $(0)$ , а ток плотностью  $J_{0,+1}$  – прыжками электронов между  $rt$ -дефектами в зарядовых состояниях  $(0)$  и  $(+1)$ . Если напряженность внешнего электрического поля направлена противоположно внутреннему полю  $\zeta$ -диода  $E_{in}$  (рис. 1,  $a$ ), то диод смещен в прямом направлении. При обратном электрическом смещении  $\zeta$ -диода напряженность внешнего электрического поля сонаправлена с напряженностью внутреннего электрического поля двойного электрического слоя.

Согласно [1], уравнения для квазистационарных плотностей прыжковых токов  $J_{-1,0}$  и  $J_{0,+1}$ , определяемых переходами электронов между  $rt$ -дефектами, имеют вид

$$\begin{aligned} J_{-1,0}(x) &= eN_{-1,0}(x) \left[ M_{-1,0} E(x) + D_{-1,0} \frac{d}{dx} \ln \frac{N_{-1}(x)}{N_0(x)} \right], \\ J_{0,+1}(x) &= eN_{0,+1}(x) \left[ M_{0,+1} E(x) + D_{0,+1} \frac{d}{dx} \ln \frac{N_0(x)}{N_{+1}(x)} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где индексы  $-1, 0, +1$  обозначают зарядовые состояния  $rt$ -дефектов;  $N_{-1,0}(x) = N_{-1}(x)N_0(x) / N$  и  $N_{0,+1}(x) = N_0(x)N_{+1}(x) / N$  – эффективные концентрации одиночных электронов, прыгающих между  $rt$ -дефектами в зарядовых состояниях  $(-1)$ ,  $(0)$  и в зарядовых состояниях  $(0)$ ,  $(+1)$  соответственно;  $E(x) = -d\varphi(x) / dx$  – напряженность электрического поля внутри  $\zeta$ -диода;  $M_{-1,0}$  и  $M_{0,+1}$  – дрейфовые подвижности электронов, прыгающих между  $rt$ -дефектами в зарядовых состояниях  $(-1)$ ,  $(0)$  и  $(0)$ ,  $(+1)$ ;  $D_{-1,0}$  и  $D_{0,+1}$  – коэффициенты диффузии электронов, прыгающих между дефектами в зарядовых состояниях  $(-1)$ ,  $(0)$  и  $(0)$ ,  $(+1)$ ;  $\sigma_{-1,0} = eN_{-1,0}M_{-1,0}$  и  $\sigma_{0,+1} = eN_{0,+1}M_{0,+1}$  – прыжковые электропроводности.

Напряженность электрического поля внутри  $\zeta$ -диода  $E(x)$  удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{e}{\varepsilon} [N_{+1}(x) - N_{-1}(x) + N_d(x) - N_a(x)] \equiv \frac{\rho(x)}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$  – статическая диэлектрическая проницаемость кристаллической матрицы;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\rho(x)$  – плотность объемного заряда.

Здесь отметим, что полная концентрация  $rt$ -дефектов в  $\zeta$ -диоде не зависит от координаты, т. е.  $N = N_{-1}(x) + N_0(x) + N_{+1}(x)$ , поэтому справедливо уравнение  $dN_{-1}/dx + dN_0/dx + dN_{+1}/dx = 0$ .

Генерационно-рекомбинационные процессы в  $\zeta$ -диоде при прыжковом механизме переноса электронов по  $rt$ -дефектам, обусловленные переходами  $(0) \rightarrow (0)$  в процессе генерации с образованием двух ионов с зарядами и  $(-1) \rightarrow (+1)$  в процессе рекомбинации с образованием двух электрически нейтральных  $rt$ -дефектов, описываются уравнениями непрерывности [1]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{e} \frac{dJ_{-1,0}(x)}{dx} &= \alpha N_{-1}(x) N_{+1}(x) - \beta N_0^2(x), \\ \frac{1}{e} \frac{dJ_{0,+1}(x)}{dx} &= -\alpha N_{-1}(x) N_{+1}(x) + \beta N_0^2(x), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $J_{-1,0}(x)$  и  $J_{0,+1}(x)$  – плотности прыжковых токов, определяемые по формулам (2);  $\alpha$  – коэффициент «прыжкового захвата» одного электрона с дефекта в зарядовом состоянии  $(-1)$  на дефект в зарядовом состоянии  $(+1)$ , который заканчивается нейтрализацией двух дефектов  $[(-1) + (+1) \rightarrow 2(0)]$ ;  $\beta$  – коэффициент тепловой ионизации двух электрически нейтральных  $rt$ -дефектов  $[2(0) \rightarrow (-1) + (+1)]$ ;  $dJ_{-1,0}/dx + dJ_{0,+1}/dx = dJ_h/dx = 0$ .

Связь между коэффициентами прыжковой диффузии  $D_{-1,0}$ ,  $D_{0,+1}$  и дрейфовыми прыжковыми подвижностями  $M_{-1,0}$ ,  $M_{0,+1}$  электронов по  $rt$ -дефектам устанавливается соотношением Нернста–Эйнштейна–Смолуховского (см., напр., [4]):

$$\frac{D_{-1,0}}{M_{-1,0}} = \xi_{-1,0} \frac{k_B T}{e}, \quad \frac{D_{0,+1}}{M_{0,+1}} = \xi_{0,+1} \frac{k_B T}{e}, \quad (5)$$

где  $\xi_{-1,0} \geq 1$ ,  $\xi_{0,+1} \geq 1$  – безразмерные параметры, которые определяются отношением флуктуационного разброса уровней энергии  $rt$ -дефектов (со средним значением  $E_1$  и  $E_2$ ) к тепловой энергии  $k_B T$ ; далее полагаем  $\xi_{-1,0} = \xi_{0,+1} = 1$ .

Коэффициенты диффузии  $D_{-1,0}$  и  $D_{0,+1}$  прыгающих между  $rt$ -дефектами электронов в ковалентной кристаллической матрице (см. (2) и (5)) можно оценить как [13]

$$D_{-1,0} = \Gamma_{-1,0} R_h^2 / 6, \quad D_{0,+1} = \Gamma_{0,+1} R_h^2 / 6,$$

где  $\Gamma_{-1,0} = v_{it} \exp[-(R_h/a_{-1} + \varepsilon_{h2}/k_B T)]$  и  $\Gamma_{0,+1} = v_{it} \exp[-(R_h/a_0 + \varepsilon_{h1}/k_B T)]$  – частота прыжков электронов между  $rt$ -дефектами в зарядовых состояниях  $(-1)$ ,  $(0)$  и  $(0)$ ,  $(+1)$ ;  $v_{it} \approx 10$  ТГц – характерная частота фононов кристаллической матрицы;  $R_h \approx N^{-1/3}$  – средняя длина прыжка электрона между  $rt$ -дефектами;  $a_{-1}$  и  $a_0$  – радиусы локализации электрона на  $rt$ -дефекте в зарядовых состояниях  $(-1)$  и  $(0)$  соответственно;  $\varepsilon_{h1}$  и  $\varepsilon_{h2}$  – энергии термической активации прыжковой миграции электронов между дефектами с уровнями энергии  $E_1$  и  $E_2$  соответственно;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Согласно [13], коэффициент  $\alpha$  в уравнениях (4) имеет вид  $\alpha = v_{it} / N$ , где  $v_{it} \approx 10$  ТГц. Связь между коэффициентами тепловой ионизации  $\beta$  и «прыжкового захвата»  $\alpha$  для  $rt$ -дефектов можно записать в виде  $\beta / \alpha = \exp[(E_1 - E_2) / k_B T] / (\gamma_1 \gamma_2)$ , где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – факторы вырождения уровней энергии  $E_1$  и  $E_2$  (далее принято  $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$ ).

Учитывая соотношения (1) и (5), уравнения (2)–(4) можно представить [13] в виде системы стационарных нелинейных дифференциальных уравнений относительно пяти неизвестных  $[N_{-1}(x), N_{+1}(x), \varphi(x), J_{-1,0}(x)$  и  $J_{0,+1}(x)]$  с граничными условиями (рис. 1):

$$\begin{aligned}
 N_{-1}(L/2) &= \frac{K_d N}{1 + \exp(-L/2l)} - \frac{K_a N}{1 + \exp(L/2l)}, \\
 N_{+1}(-L/2) &= \frac{K_a N}{1 + \exp(-L/2l)} - \frac{K_d N}{1 + \exp(L/2l)}, \\
 \varphi(-L/2) &= 0; \varphi(L/2) = \varphi_b - U, \\
 J_{-1,0}(-L/2) &= 0; J_{0,+1}(L/2) = 0,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $U$  – электрическое напряжение, приложенное к электродам  $\zeta$ -диода от внешнего источника ( $U > 0$  соответствует прямому смещению диода,  $U < 0$  – обратному).

В медленно меняющемся электрическом поле удельная дифференциальная емкость  $\zeta$ -диода  $C_d$  с площадью  $p^+n^+$ -перехода  $S$  определяется

$$\frac{C_d}{S} = \frac{1}{S} \left| \frac{dQ}{dU} \right|, \tag{7}$$

где  $Q/S$  – электрический заряд, приходящийся на единицу площади, который определяется интегрированием плотности объемного заряда  $\rho(x)$  по координате  $x$  от 0 до  $L/2$  (рис. 1, а):

$$\frac{Q}{S} = \int_0^{L/2} \rho(x) dx. \tag{8}$$

Зная решение стационарной системы нелинейных дифференциальных уравнений (2)–(4) с граничными условиями (6), можно найти распределение электростатического потенциала  $\varphi(x)$ . Тогда, согласно (3), распределение плотности объемного заряда определяется так:

$$\rho(x) = -\varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{d^2 \varphi}{dx^2}. \tag{9}$$

Таким образом, изменяя напряжение  $U$  на  $\zeta$ -диоде и решая систему уравнений (2)–(4) с новыми граничными условиями (6) можно, используя (8) и (9), построить зависимость индуцированного в  $p^+n^+$ -переходе заряда  $Q$  от напряжения смещения  $\zeta$ -диода  $U$ . Численно дифференцируя полученную зависимость  $Q(U)$ , можно по (7) определить удельную дифференциальную емкость  $\zeta$ -диода  $C_d/S$ .

**Численные расчеты.** Численное решение системы (2)–(4) с граничными условиями (6) проводилось для следующих значений параметров:  $\varepsilon = 11,5\varepsilon_0$  (кристаллический кремний); длина  $L = 3$  мкм диода с параметром профиля его легирования  $l = 100$  нм водородоподобными акцепторами и донорами; полная концентрация  $rt$ -дефектов  $N = 10^{19}$  см $^{-3}$ ;  $K_d = K_a = 0,5$  (симметричный  $\zeta$ -диод). Средние значения энергетических уровней  $rt$ -дефектов в Si принимались равными [14]:  $E_1 = 250$  мэВ,  $E_2 = 550$  мэВ. Для таких параметров  $rt$ -дефектов равновесная (при  $J_h = 0$ ) контактная разность потенциалов в  $\zeta$ -диоде есть  $\varphi_b = (E_2 - E_1)/e = 300$  мВ; начало координат выбрано в середине  $\zeta$ -диода, т. е.  $x = 0$  (металлургическая граница  $p^+n^+$ -перехода). Энергия термической активации прыжкового переноса электронов между  $rt$ -дефектами  $\varepsilon_{n1} = \varepsilon_{n2} = 15$  мэВ; отношение длины прыжка электрона к радиусу его локализации  $R_h/a_{-1} = R_h/a_0 = 3$ .

На рис. 2, а представлены рассчитанные по предложенной модели распределения напряженности электрического поля  $E = -d\varphi/dx$  внутри  $\zeta$ -диода для напряжений смещения  $U = -300, 0, +300$  мВ при температуре  $T = 78$  К. Видно, что при прямом смещении  $\zeta$ -диода ( $U > 0$ ) величина напряженности электрического поля  $E$  в диоде уменьшается, а при обратном ( $U < 0$ ) – увеличивается. [Напряженность электрического поля пробоя собственного (нелегированного) кремния составляет  $\approx 300$  кВ/см.] На рис. 2, б представлены распределения плотности объемного заряда  $\rho$  внутри  $\zeta$ -диода при напряжениях смещения  $U = -300, 0, +300$  мВ для  $T = 78$  К. Видно, что при прямом смещении  $\zeta$ -диода ( $U > 0$ ) происходит уменьшение плотности объемного заряда и ширины области обеднения ( $x_- + x_+$ ), а при обратном ( $U < 0$ ) – увеличение. При прямом смещении внутреннее электрическое поле, обусловленное ионизованными водородоподобными примесями и  $rt$ -дефектами, частью компенсируется внешним электрическим полем. При обратном смещении внешнее поле усиливает внутреннее поле, что приводит к увеличению объемного заряда и соответственно к увеличению ширины двойного электрического слоя. Зависимость удельного заряда  $|Q/S|$  от напряжения смещения  $\zeta$ -диода представлена на рис. 3, а.



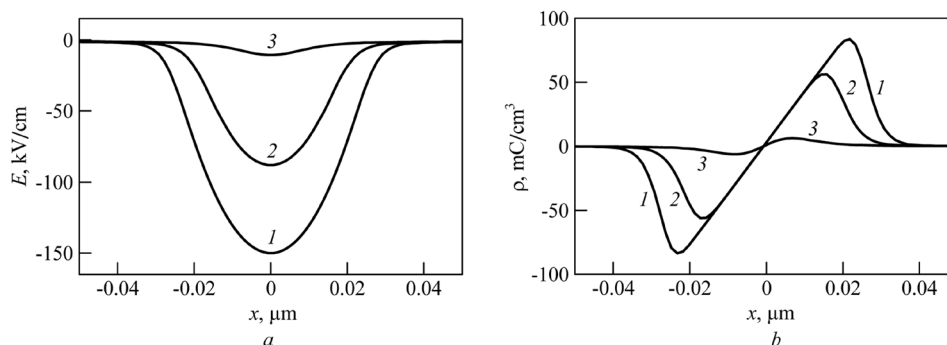


Рис. 2. Зависимости от координаты  $x$  (вдоль  $\zeta$ -диода) величины напряженности электрического поля  $E = -d\phi / dx$  (a) и плотности объемного заряда  $\rho$  (b) в окрестности металлургической границы  $p^+n^+$ -перехода при температуре  $T = 78$  К и напряжении электрического смещения  $\zeta$ -диода  $U$ , мВ: 1 –  $-300$ ; 2 – 0; 3 –  $+300$

Fig. 2. Dependences on coordinate  $x$  (along  $\zeta$ -diode) of electric field strength value  $E = -d\phi / dx$  (a) and volume charge density  $\rho$  (b) in the vicinity of the metallurgic boundary of  $p^+n^+$ -junction at temperature  $T = 78$  K and bias voltage across  $\zeta$ -diode  $U$ , mV: 1 –  $-300$ ; 2 – 0; 3 –  $+300$

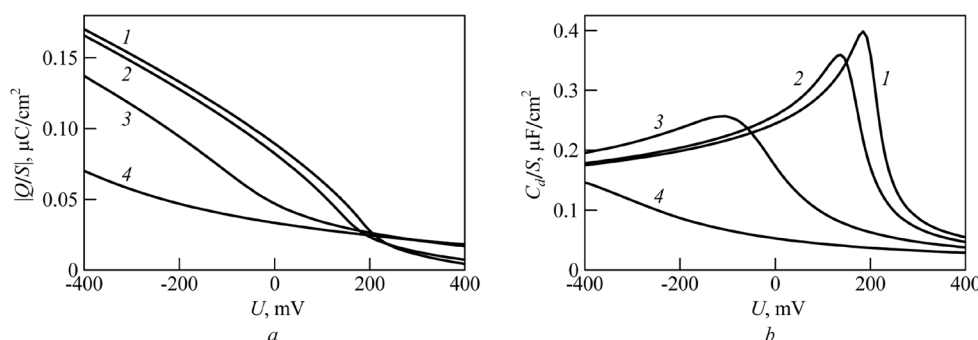


Рис. 3. Зависимости величины удельного заряда  $|Q / S|$  (a) и удельной дифференциальной емкости  $C_d / S$  (b) от напряжения электрического смещения  $\zeta$ -диода  $U$  при температурах  $T$ , К: 1 – 78, 2 – 120, 3 – 300, 4 – 373

Fig. 3. Dependences of specific charge value  $|Q / S|$  (a) and specific differential capacitance  $C_d / S$  (b) on bias voltage across  $\zeta$ -diode  $U$  at temperatures  $T$ , К: 1 – 78, 2 – 120, 3 – 300, 4 – 373

На рис. 3, *b* представлен расчет зависимости дифференциальной емкости  $\zeta$ -диода от напряжения смещения при температурах  $T = 78, 120, 300$  и  $373$  К. Видно, что дифференциальная емкость  $C_d$  имеет нелинейную зависимость от внешнего напряжения смещения  $U$ . При повышении температуры пик на зависимости  $C_d(U)$  уменьшается, уширяется и смещается в сторону обратных напряжений на  $\zeta$ -диоде. Это происходит вследствие уменьшения диффузионной емкости  $\zeta$ -диода (при  $U > 0$ ) на фоне его барьерной емкости (при  $U < 0$ ). Здесь отметим, что барьерная емкость полупроводникового диода с  $p^+n^+$ -переходом в отсутствие *rt*-дефектов уменьшается при понижении температуры вследствие захвата электронов из *s*-зоны на доноры и дырок – на акцепторы.

**Заключение.** В рамках дрейфово-диффузионного приближения прыжкового переноса электронов по *rt*-дефектам в  $\zeta$ -диоде рассчитаны зависимости его низкочастотной дифференциальной емкости  $C_d$  от напряжения электрического смещения  $U$  и температуры. Принято, что в диоде наряду с водородоподобными акцепторами и донорами содержатся полностью компенсирующие их двухуровневые трехзарядные радиационные дефекты. Показано, что емкость  $\zeta$ -диода  $C_d$  несимметрична относительно прикладываемого напряжения смещения и нелинейно зависит от  $U$ . При понижении температуры пик дифференциальной емкости увеличивается и смещается в область прямого напряжения смещения  $\zeta$ -диода (рис. 2, *b*). Полученные результаты показывают возможность использования  $\zeta$ -диода в качестве радиационно-стойкого низкотемпературного варикапа с прыжковым механизмом электрической проводимости по *rt*-дефектам.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках программы Республики Беларусь «Маттех».

**Acknowledgements.** The work is supported by the Belarusian National Research Program “Mattekh”.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поклонский, Н. А. Ионизационное равновесие и прыжковая электропроводность в легированных полупроводниках / Н. А. Поклонский. – Минск: Изд. центр БГУ, 2004. – 195 с.
2. Pollak, M. Hopping – past, present and future(?) / M. Pollak // *Phys. Status Solidi B*. – 2002. – Vol. 230, N 1. – P. 295–304. doi.org/10.1002/1521-3951(200203)230:1<295::AID-PSSB295>3.0.CO;2-C
3. Carrier transport of diamond  $p^+i-n^+$  junction diode fabricated using low-resistance hopping  $p^+$  and  $n^+$  layers / K. Oyama [et al.] // *Phys. Status Solidi A*. – 2011. – Vol. 208, N 4. – P. 937–942. doi.org/10.1002/pssa.201026490
4. Ionization equilibrium at the transition from valence-band to acceptor-band migration of holes in boron-doped diamond / N. A. Poklonski [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2016. – Vol. 119, N 24. – P. 245701. doi.org/10.1063/1.4954281
5. Булярский, С. В. Термодинамика комплексообразования и кластеризации дефектов в полупроводниках / С. В. Булярский, В. В. Светухин, П. Е. Львов // *Физика и техника полупроводников*. – 2000. – Т. 34, № 4. – С. 385–388.
6. Zangenberg, N. On-line DLTS investigations of the mono- and di-vacancy in  $p$ -type silicon after low temperature electron irradiation / N. Zangenberg, J.-J. Goubet, A. N. Larsen // *Nucl. Instrum. Meth. B*. – 2002. – Vol. 186, N 1–4. – P. 71–77. doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00876-X
7. Radiation effects in semiconductors / ed. by K. Iniewski. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 420 p.
8. Брудный, В. Н. Зарядовая нейтральность в полупроводниках: дефекты, границы раздела, поверхность / В. Н. Брудный // *Изв. вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56, № 7. – С. 27–29.
9. Liou, J. J. Capacitance of semiconductor  $p$ - $n$  junction space-charge layers: an overview / J. J. Liou, F. A. Lindholm // *Proc. IEEE*. – 1988. – Vol. 76, N 11. – P. 1406–1422. doi.org/10.1109/5.90112
10. Sarjeant, W. J. Capacitive components for power electronics / W. J. Sarjeant, I. W. Clelland, R. A. Price // *Proc. IEEE*. – 2001. – Vol. 89, N 6. – P. 846–855. doi.org/10.1109/5.931475
11. Johnston, A. H. Radiation damage of electronic and optoelectronic devices in space / A. H. Johnston // *Proc. of 4th Int. Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application*, Tsukuba, Japan, October 11–13, 2000. – P. 1–9 [Electronic resource]. – Mode of access: hdl.handle.net/2014/16123.
12. Поклонский, Н. А. Эффект поля и электрическая емкость кристаллов кремния при прыжковой проводимости по точечным радиационным дефектам, «локализирующим» уровень Ферми / Н. А. Поклонский, С. А. Вырко, А. Г. Забродский // *Физика и техника полупроводников*. – 2007. – Т. 41, № 11. – С. 1317–1323.
13. Полупроводниковый диод с прыжковой миграцией электронов по точечным дефектам кристаллической матрицы / Н. А. Поклонский [и др.] // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*. – 2017. – Т. 61, № 3. – С. 30–37.
14. Поклонский, Н. А. Распределение электростатического потенциала и зарядовых состояний неподвижных дефектов при прыжковой миграции электронов между ними в полупроводниковой пленке / Н. А. Поклонский, С. А. Вырко, А. И. Ковалев // *Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. IX Междунар. конф., Санкт-Петербург, 7–10 июля 2014 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 93–94.*
15. Интегральная электрическая емкость полупроводникового диода с трехзарядными радиационными точечными дефектами / Н. А. Поклонский [и др.] // *Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2016): сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 нояб. 2016 г.: в 3 т. / редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]*. – Минск: Ковчег, 2016. – Т. 2. – С. 135–138.
16. Дифференциальная емкость полупроводникового диода с прыжковой проводимостью по радиационным дефектам / Н. А. Поклонский [и др.] // *Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф., Минск, 12–13 окт. 2016 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]*. – Минск: БГУ, 2016. – С. 178–181.

### References

1. Poklonski N. A. *Ionization equilibrium and hopping conductivity in doped semiconductors*. Belarusian State University Publ., 2004. 195 p. (in Russian).
2. Pollak M. Hopping – past, present and future(?). *Physica Status Solidi (B)*, 2002, vol. 230, no. 1, pp. 295–304. doi.org/10.1002/1521-3951(200203)230:1<295::AID-PSSB295>3.0.CO;2-C
3. Oyama K., Ri S.-G., Kato H., Takeuchi D., Makino T., Ogura M., Tokuda N., Okushi H., Yamasaki S. Carrier transport of diamond  $p^+i-n^+$  junction diode fabricated using low-resistance hopping  $p^+$  and  $n^+$  layers. *Physica Status Solidi A*, 2011, vol. 208, no. 4, pp. 937–942. doi.org/10.1002/pssa.201026490
4. Poklonski N. A., Vyrko S. A., Poklonskaya O. N., Kovalev A. I., Zabrodskii A. G. Ionization equilibrium at the transition from valence-band to acceptor-band migration of holes in boron-doped diamond. *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, no. 24, pp. 245701. doi.org/10.1063/1.4954281
5. Bulyarskii S. V., Svetukhin V. V., L'vov P. E. Thermodynamics of complex formation and defect clustering in semiconductors. *Semiconductors*, 2000, vol. 34, no. 4, pp. 371–375. doi.org/10.1134/1.1187990
6. Zangenberg N., Goubet J.-J., Larsen A. N. On-line DLTS investigations of the mono- and di-vacancy in  $p$ -type silicon after low temperature electron irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, vol. 186, no. 1–4, pp. 71–77. doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00876-X
7. Iniewski K., (ed). *Radiation effects in semiconductors*. CRC Press, 2011. 420 p.
8. Brudnyi V. N. Charge neutrality in semiconductors: defects, interfaces, surface. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 754–756. doi.org/10.1007/s11182-013-0095-4
9. Liou J. J., Lindholm F. A. Capacitance of semiconductor  $p$ - $n$  junction space-charge layers: an overview. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 76, no. 11, pp. 1406–1422. doi.org/10.1109/5.90112

10. Sarjeant W. J., Clelland I. W., Price R. A. Capacitive components for power electronics. *Proceedings of the IEEE*, 2001, vol. 89, no. 6, pp. 846–855. doi.org/10.1109/5.931475
11. Johnston A. H. Radiation damage of electronic and optoelectronic devices in space. *Proceedings of 4th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application*, Tsukuba, Japan, October 11–13, 2000, pp. 1–9. Available at: hdl.handle.net/2014/16123.
12. Poklonski N. A., Vyrko S. A., Zabrodskii A. G. Field effect and capacitance of silicon crystals with hopping conductivity over point radiation defects pinning the Fermi level. *Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 11, pp. 1300–1306. doi.org/10.1134/S1063782607110048
13. 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).
14. Poklonski N. A., Vyrko S. A., Kovalev A. I. Distribution of electrostatic potential and charge states of immobile defects at hopping migration of electrons between them in semiconductor film. *Amorfnye i mikrokristallicheskie poluprovodniki: sbornik trudov IX Mezhdunarodnoi konferencii* [Proceedings IX International Conference Amorphous and Microcrystalline Semiconductors]. Saint-Petersburg, 2014, pp. 93–94 (in Russian).
15. Poklonski N. A., Kovalev A. I., Vyrko S. A., Vlassov A. T. Integral capacitance of semiconductor diode with triple-charged irradiation-induced point defects. *Aktual'nye problemy fiziki tverdogo tela (FTT-2016): sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferencii* [Proceedings International Conference Actual Problems of Solid State Physics (SSP-2016)]. Minsk, 2016, vol. 2, pp. 135–138 (in Russian).
16. Poklonski N. A., Kovalev A. I., Vyrko S. A., Vlassov A. T. Differential capacitance of semiconductor diode with hopping conduction via irradiation-induced defects. *Materialy i struktury sovremennoj elektroniki: sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferencii* [Proceedings VII International Conference Materials and Structures of Modern Electronics]. Minsk, 2016, pp. 178–181 (in Russian).

#### Информация об авторах

*Поклонский Николай Александрович* – д-р физ.-мат. наук, профессор. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: poklonski@bsu.by.

*Ковалев Александр Игоревич* – аспирант. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kovalev.aleksand@gmail.com.

*Вырко Сергей Александрович* – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vyrko@bsu.by.

#### Information about the authors

*Poklonski Nikolai Alexandrovich* – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: poklonski@bsu.by.

*Kovalev Alexander Igorevich* – Postgraduate student. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kovalev.aleksand@gmail.com.

*Vyrko Sergey Alexandrovich* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vyrko@bsu.by.