

Yarimo'rkazgich diodlarining p-n-uch nuqtali zaryadlangan nuqsonlar parametrlarini hisoblash.

Mamatkarimov Odiljon Oxundedayevich¹.

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

²*Namangan muhandislik-texnologiya instituti.*

Fazliddinov Solohiddin Baxriddin o'g'li²

Namangan davlat universiteti doktoranti

Turg'unov Muslim Omonboyevich³.

³*Milliy universitet huzuridagi yarim o'rkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy tadqiqot institute maqsadli tayanch doktoranti*

Tel: +998972510051

E-mail: bxquchqarov@mail.ru

Annotatsiya: Ilmiy va amaliy qiziqish yarimo'rkazgich materiallarini o'rganishdir va aralashmali atomlarining tor qatlami va kristall panjaraning ichki nuqta nuqsonlari bo'lgan qurilmalar, ushbu ishning maqsadi simmetrik kremniy diodining elektr parametrlarini hisoblashdan iborat bo'ladi. Uning p-n birikmasida nuqta uch marta zaryadlangan t nuqsonlarning δ -qatlamli hosil bo'ladi. Bunday diyot p-i-n diodasiga o'xshash p-t-n diodasi deb ataladi. Har bir t-defekt uchta zaryad holatidan birida bo'lishi mumkin (-1,0,+1; elementar zaryad birliklarida). Xona haroratida p-mintaqadagi barcha vodorodga o'xshash qabul qiluvchilar va n-qatlamda vodorodga o'xshash donorlar ionlanadi, deb qaraldi. t-nuqsonlar bilan ushlar uchun kesma c-tasmasi elektronlarni t-nuqsonlar tutib olish kesimidan kattaroq deb taxmin qilingan. Statsionar nochiziqli differentsial tenglamalar tizimi raqamli ravishda yechiladi, bu drift-diffuziya yaqinlashuvida yarimo'rkazgichlardagi elektronlar va teshiklarning migratsiyasini tavsiflaydi. p va n tipidagi elektr o'tkazuvchanligining degenerativ bo'lmagan hududlari bo'lgan silikon diodaning statik sig'im-kuchlanish va oqim kuchlanish xarakteristikalarini to'g'ridan-to'g'ri va teskari kuchlanishlari uchun hisoblanadi. Hisoblash orqali ko'rsatilgandek, δ -qatlamli t-nuqsonlarni o'z ichiga olgan p-t-n dioda, oldinga egilish bilan, oqim zichligi barqarorligi bo'limi mavjud. Teskari moyillik bilan bunday diodadagi oqim zichligi t-nuqsonlarsiz p-n diodasiga qaraganda ancha yuqori. Teskari yo'nalish ortishi bilan p-t-n diodining sig'imi, p-n diodidan farqli o'laroq, avval ortadi, keyin esa kamayadi.

Kalit so'zlar: kremniy, p-n o'tish, nuqta nuqsonlari δ -qatlami, oqim-kuchlanish xarakteristikasi, sig'im-kuchlanish xarakteristikasi, degenerativ, migratsiyasi, doping, ejeksiyon, drift, diffuziya, diapazon, drift-diffuziya, differentsial tenglamalar, implantatsiya, konvertatsiya, rekombinatsiyasi tezligi, diapazon, konstruksiya, ejeksiyon.

**Расчет параметров р-п-трехточечных заряженных дефектов
полупроводниковых диодов.**

Маматкаримов Одилжон Охундедаевич¹.

Доктор физика-математических наук, профессор.

¹*Наманганский инженерно-технологический институт*

Фазлиддинов Солохиддина Бахриддин угли²

²*Докторант Наманганского государственного университета.*

Тургунов Муслим Омонбоевич³.

³*Докторант НИИ физики полупроводников и микроэлектроники*

Национального университета им.

[Тел:+998972510051](tel:+998972510051)

E-mail: bxquchqarov@mail.ru

Аннотация: научный и практический интерес представляет исследование полупроводниковых материалов и устройств с узким слоем примесных атомов и внутренних точечных дефектов кристаллической решетки, цель данной работы - расчет электрических параметров симметричного кремниевого диода. В его р-п переходе образуется точечный трехзарядный т-слой. Такой диод называется р-т-п-диодом, подобно р-т-п-диоду. Каждый т-дефект может находиться в одном из трех зарядовых состояний (-1,0,+1; в элементарных единицах заряда). При комнатной температуре все водородоподобные акцепторы в р-области и водородоподобные доноры в п-слое считались ионизированными. Сечение захвата т-дефектами предполагается большим, чем сечение захвата электронов с-зоны т-дефектами. Численно решается система стационарных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая миграцию электронов и дырок в полупроводниках в дрейфово-диффузионном приближении. Рассчитаны статические вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики кремниевого диода с невырожденными областями электропроводности р- и п-типа при прямом и обратном напряжении. Как показал расчет, р-т-п-диод, содержащий т-дефекты δ -слоя, при прямом смещении имеет стабильный участок плотности тока. Плотность тока в таком диоде с обратным смещением значительно выше, чем в р-п-диоде без т-дефектов. При увеличении обратного смещения емкость р-т-п-диода, в отличие от р-п-диода, сначала увеличивается, а затем уменьшается.

Ключевое слово: кремний, р-п переход, точечные дефекты δ -слоя, вольт-амперная характеристика, вольт-фарадная характеристика, дегенерация, миграция, легирование, выброс, дрейф, диффузия, пробег, дрейф-диффузия, дифференциальные уравнения, имплантация, преобразование, скорость рекомбинации, ассортимент, конструкция, выброс.

Calculation of parameters of p-n-three-point charged defects of semiconductor diodes.

Mamatkarimov Odiljon Oxundedaevich¹.

Doctor of physical and mathematical sciences.

¹*Namangan Engineering and Technology Institute.*

Fazliddinov Solokhiddin Bakhriiddin o'g'li²

Doctoral student of Namangan State University.

Turg'unov Muslim Omonboyevich³.

³*Target-based doctoral student of the Scientific Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics under the National University*

[Tel:+998972510051](tel:+998972510051)

E-mail: bxquchqarov@mail.ru

Annotation: scientific and practical interest is the study of semiconductor materials and devices with a narrow layer of impurity atoms and internal point defects of the crystal lattice, the purpose of this work is to calculate the electrical parameters of a symmetric silicon diode. In its p-n junction, a dot triple-charged t layer is formed. Such a diode is called a p-t-n diode, similar to a p-t-n diode. Each t-defect can be in one of three charge states ($-1, 0, +1$; in elementary charge units). At room temperature, all hydrogen-like acceptors in the p-region and hydrogen-like donors in the n-layer were assumed to be ionized. The cross-section for trapping by t-defects is assumed to be larger than the cross-section for trapping c-band electrons by t-defects. A system of stationary nonlinear differential equations is solved numerically, which describes the migration of electrons and holes in semiconductors in the drift-diffusion approximation. The static capacitance-voltage and current-voltage characteristics of a silicon diode with non-degenerate regions of p- and n-type electrical conductivity are calculated for forward and reverse voltages. As shown by calculation, a p-t-n diode containing d-layer t-defects, with forward bias, has a stable current density section. The current density in such a diode with a reverse bias is much higher than in a p-n diode without t-defects. As the reverse bias increases, the capacitance of the p-t-n diode, unlike the p-n diode, first increases and then decreases.

Keyword: silicon, p-n junction, point defects δ -layer, current-voltage characteristic, capacitance-voltage characteristic, degenerative, migration, doping, ejection, drift, diffusion, range, drift-diffusion, differential equations, implantation, conversion, speed of recombination, range, construction, ejection.

Изучение полупроводниковых материалов и приборов с узким слоем легированных атомов и внутренними точечными дефектами кристаллической решетки имеет научное и практическое значение. Цель работы – расчет

электрических параметров симметричного кремниевого диода. δ -слой p–n-перехода состоит из трехзарядных т-дефектов [1–2]. Такие диоды называются трехслойными диодами и представлены как диод p–t–n или диод p–t–n. Т-дефект может существовать в одном из трех зарядовых состояний ($-1, 0, +1$; в элементарных единицах заряда). Считается, что при комнатной температуре все водородоподобные акцепторы принадлежат к p-областям, а водородоподобные доноры к группе ионизированных областей n-областям. Предполагается, что сечение захвата дырки больше, чем сечение захвата т-электрона для активированных ν -зон. Численно решается система стационарных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая миграцию электронов и дырок в полупроводниках в дрейфово-диффузионном приближении. Рассчитаны статические вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики кремниевого диода с невырожденными областями. Вид электропроводности при p-и n- прямом и обратном электрическом напряжении расчеты показывают, что диодные т-дефекты, содержащие p-t-n-д-слой, при прямом смещении указывают на наличие области стабилизации плотности потока [3]. Плотность тока в таком диоде с обратным смещением намного выше его, α т-дефекты без p–n-диода малы. При увеличении обратного смещения емкость p–t–n-диода, а не p–n-диода, сначала увеличивается, а затем уменьшается.

Свойства полупроводников, содержащих дефекты в кристаллической структуре, существенно зависят от типа дефектов, их концентрации и пространственного распределения. Исследование полупроводниковых материалов и устройств с узким слоем смешанных атомов и внутренними точечными дефектами кристаллической решетки имеет научное и практическое значение [4]. Это объясняется тем, что такие структуры мало изучены (с теоретической точки зрения) и иногда приводят к явным разногласиям в интерпретации экспериментальных результатов. Например, формирование слоя дефектов вблизи поверхностей увеличивает эффективность преобразования солнечного излучения диодом до 35% за счет имплантации p-n-протонов в кремниевый диод. Однако в [5] отвергают это утверждение и утверждают, что KPD такого диода не увеличивается. Наоборот, напряжение холостого хода уменьшается на 20% из-за увеличения скорости рекомбинации электронов и дырок, генерируемых светом, через энергетические уровни дефектов в области.

Как правило, создание структур полупроводниковых приборов и экспериментальное определение их параметров — длительный процесс, который не всегда позволяет добиться результатов в нужном диапазоне.

Поэтому для исследования таких структур используют математическое моделирование [6-7]. Целью данной работы является расчет статических электрических параметров кремниевого диода, содержащего в двойном электрическом слое δ -слой точечных трехзарядных двухуровневых (без учета возбужденных состояний) дефектов кристаллической матрицы.

Рассмотрим одномерную модель диода, сформированного в кристаллическом кремнии. Длина диода L , плоский «металлургический» р-п переход $N_a=N_d$ расположен в точке координат $x=0$ (рисунок 1). $x<-L/2$ связан с p^+ - областями, $x>L/2$ связан с n^+ - областями. В области пространственного заряда (двойного электрического слоя) р-п-перехода создается δ -слой с двумя уровнями т-дефектов, каждый из которых может находиться в одном из трех зарядовых состояний $(-1,0,+1)$.

Схема распределения координат x энергетических уровней с водородоподобными акцепторами N_a , донорами N_d и т-дефектами N_t $E_2^{(v)} > E_2^{(v)} > 0$ - полоса кремния; $x_a+x_d>0$ - ширина двойного электрического слоя по отношению к верхней части, необходимо учитывать р-п переход [8].

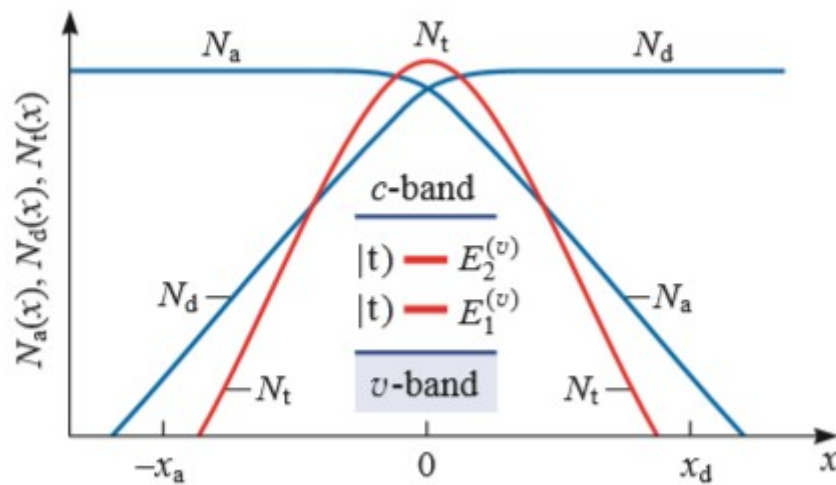


Рисунок 1– Схема координатного распределения водородоподобных акцепторов N_a , доноров N_d и т-дефектов N_t с уровнями энергии $E_2^{(v)} > E_2^{(v)} > 0$ V- кремния по потолочным зонам; $x_a+x_d>0$ - толщина двойного электрического слоя р-п-перехода.

Мы находим все водородоподобные акцепторы и доноры с концентрациями $N_a(x)$ и $N_d(x)$ иммобилизованными и полностью ионизированными, т.е.в зарядовом состоянии (-1) и $(+1)$ соответственно, и их координатное распределение. Можно определить, что X изменяется на диоде [9].

$$N_a(x) = \frac{Na}{1 + \exp(X/L)}; \quad N_d(x) = \frac{Nd}{1 + \exp(-X/L)}; \quad (1)$$

Где L —параметр профиля легирования, N_d и N_a —максимальные концентрации доноров и акцепторов в пределе $L \rightarrow 0$. т-дефекты стационарны и имеют нормальное (гауссово) распределение по диоду с максимумом в точке перехода электрона металла ($x=0$; рисунок 1):

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

Из приведенной формулы видно, что $N_t(x) = N_{t,-1}(x) + N_{t,0}(x) + N_{t,+1}(x)$ — это суммарная концентрация дефектов в т-трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$; Дефекты параметрического т-δ-слоя профиля D-распределения; $N_t(0)$ — концентрация дефектов т-центров р-т-п-диода ($\delta_a x = 0$). Понятно, что дефекты т-кремниевой матрицы должны быть термически стабильными вплоть до температур выше 500 К, чтобы обеспечить стабильные параметры диода в рабочем диапазоне температур [10-11]. Неподвижные зарядовые состояния становятся условно подвижными за счет обмена электронами между дефектами т-δ-слоя т-дефектами, а также за счет захвата электронов из зоны проводимости (с-зоны) и дырок из валентной зоны (v-зоны) и их термическая реверсия выброса [12]. Вероятность обнаружения дефектов в т-трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$ определяется соответствующими функциями:

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

где g_1, g_2 — вырожденные множители энергетических уровней и т-дефектов $\uparrow\downarrow$, (далее в тексте $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$ $\varphi(x)$ - распределение электрического потенциала вдоль диода (по координате x); K_B постоянная Больцмана; T - абсолютная температура. Знакомимся с символом:

$$\begin{aligned} N_{m,-1}(x, \varphi(x)) & \uparrow\downarrow N_{t,-1}(x) \\ N_{m,0}(x, \varphi(x)) & \uparrow\downarrow N_{t,0}(x); \\ N_{m,+1}(x, \varphi(x)) & \uparrow\downarrow N_{t,+1}(x); \end{aligned}$$

С учетом (1) и (2) формулы для концентраций дефектов в т-зарядовом состоянии $(-1, 0, +1)$ аналогичны [13]:

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

Энергетическая диаграмма диода, содержащего дефекты δ -слоя, представлена на рис. 2 Энергетические уровни т-дефектов $E_F^{(v)}(x) = -[E_g + E_F^{(c)}(x)]$ и уровень Ферми (для электрохимического потенциала электронов $E_F^{(v)} < 0$ вычисляется по v -зоне $E_v(x)$) Положение уровня Ферми с $E_2^{(v)} > 0, E_1^{(v)} > 0$ Определение комбинированного р-т-п-диод задается выражением.

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

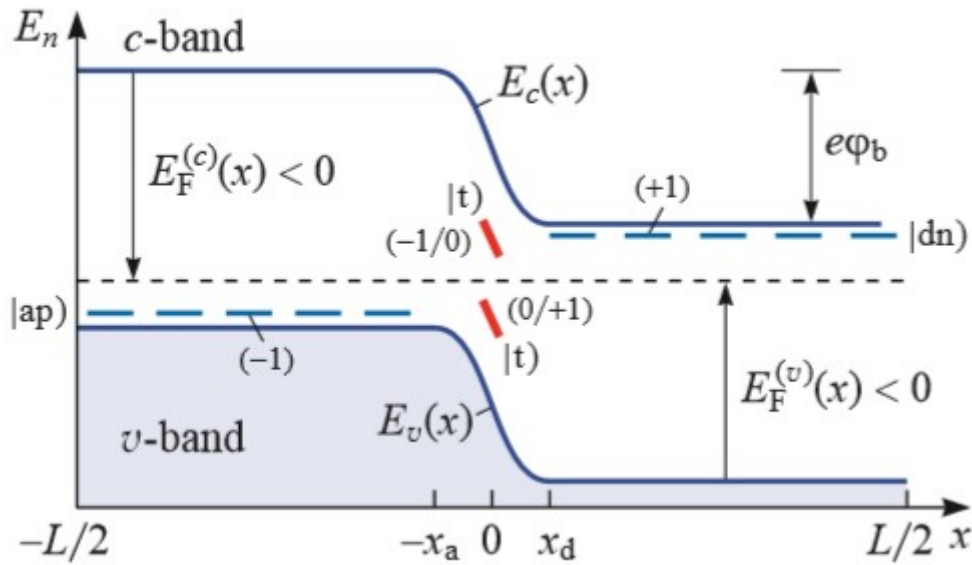


Рис. 2-зонная диаграмма (зависимость от одной-е) электронной энергии E_n от координаты x) р-т-п- равновесный диод: $E_c(x), E_v(x)$ нижние энергетические уровни с-зоны и потолка v -зоны; $E_g = E_c(x) - E_v(x)$ запрещенная зона; акцепторы зарядового состояния (-1); дн) доноры в заряженном состоянии (+1); Дефекты, связанные с т-энергетическим уровнем $E_1^{(v)}$ [созаряд стационарный (0, +1)] и $E_2^{(v)}$ [состояния заряда (-1, 0)]; $E_F^{(v)}(x) = -[E_g + E_F^{(c)}(x)]$ уровень Ферми; $e\phi_b > 0$ - энергетический барьер р-п- перехода L - длина диода энергетический барьер $e\phi_b$ с- зоны и дырки в диоде для электронов v - зоны дрейфа и диффузионные процессы носителей заряда в области перехода к металлургии о является результатом термодинамического равновесия между

Величина $e\phi_b$ определяется разностью уровней Ферми на границах диодов.

$$e\phi_b = E_F^{(v)}\left(\frac{-L}{2}\right) - E_F^{(v)} = E_F^{(c)}L/2 - E_F^{(c)}(-L/2) > 0, \quad (6)$$

где $e\phi_b$ – контактная разность электрических потенциалов диода в отсутствие электрического тока (в термодинамическом равновесии). Находя положение уровня Ферми $E_F^{(v)}$ на границах по полям р- и п-ячеек для невырожденной зоны v -полупроводника, составим соответствующие уравнения электронейтральности:

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

где $n(x) = n_c \exp(\phi/k_B T)$ концентрация электронов в зоне проводимости $n_c = 2[\pi m_p k_B T / (2\pi\hbar)^2]^{3/2}$; $p(x) = p_v \exp(-E_F^{(v)}(x)/k_B T)$ концентрация дырок в валентной зоне;

$$p_v = 2[\pi m_p k_B T / (2\pi\hbar)^2]^{3/2}; m_n$$

эффективные массы плотности состояний для электронов в диапазоне m_p - с и дырок в диапазоне v , $\hbar = h/2\pi$ - постоянная Планка.

Соотношения (7) учитывают концентрацию дырок и электронов на границах диода. p^+ и n^+ омические контакты), определяемые концентрацией водородоподобных примесей и т-дефектов [13]. Соотношения (7) учитывают, что концентрация дырок и электронов на границах диода (p^+ и n^+ омические контакты) определяется концентрацией водорода, такого как примеси и т-дефекты.

Численное решение системы стационарных нелинейных уравнений (15) с граничными условиями (16) выполнялось без дополнительных устройств в программном комплексе MatLab 2015 [14]. Объектом исследования является легированный кремниевый диод длиной $L=10$ мкм. параметр профиля $L=0,2$ мкм, с акцепторами ар) и донорами dn), ширина δ -слоя т-дефектов $D=3l=0,6$ мкм и концентрация т-дефектов $N_t(0)=10^{16} \text{ см}^{-3}$, р-п при центр перехода (при $x=0$). В качестве водородоподобных примесных атомов выбраны бор (акцепторы) и фосфор (доноры) с концентрацией на границах диода: $N_a(-L/2)=N_d(L/2)=7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (т.е. диод). Возможные средние значения энергетических уровней т-дефектов в запрещенной зоне (энергетической щели) кремния оценивались из [15] следующим образом:

Время жизни электронов и дырок в кристаллическом кремнии после $E_1^{(v)}=210 \text{ мВ}$, $E_2^{(v)}=780 \text{ мВ}$ (ограничено их межзвездной рекомбинацией при концентрации атомов бора N_a и фосфора N_d менее 10^{16} см^{-3}) Предполагалось, что $\tau_i = 100$ мкс. При расчете использовались возможные значения гравитационных сечений, соответствующих дефектам типа дивакансий [16]: $S_n = 10^{-15} \text{ см}^2$ и $S_p = 10^{-14} \text{ см}^2$ [при отверстиях в - точка захвачена. по т-дефектам в зарядовых состояниях (-1) и (0)].

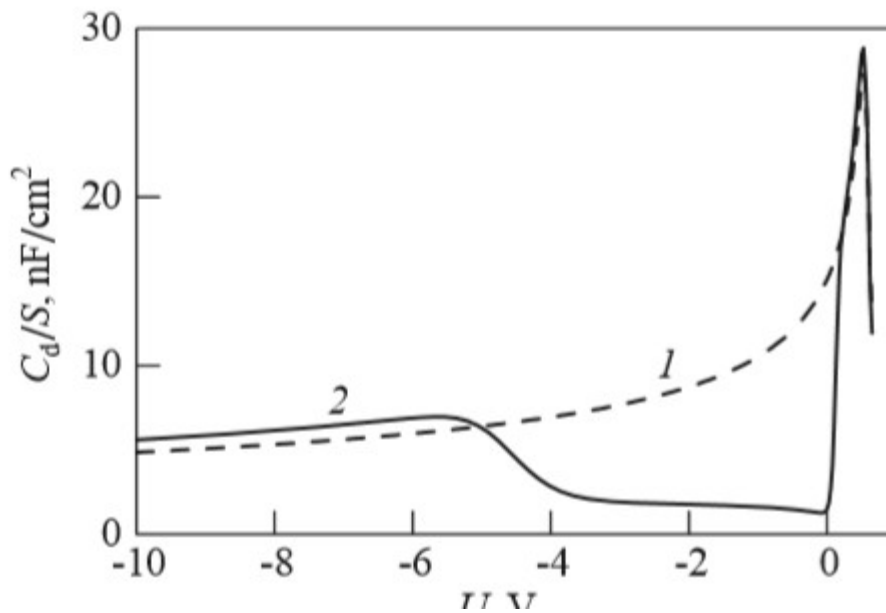


Рисунок 3 – Зависимость статической (низкочастотной) емкости C_d (площадь p-n-перехода S) от напряжения на диоде U : кривая 1-т-бездефектный p-n-диод; p-t-n-диод, содержащий d-слой с т-дефектами $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в области 2-p-n-перехода.

Для p-t-n-диода на рис. 4 показано распределение плотности напряжения $\tau(x, U)$ вдоль диода: $U=0; -2,5; +0,3 \text{ В}$. Зависимость $\tau(x)$ асимметрична относительно $x=0$ в основном связано с тем, что энергетические уровни асимметричны относительно центра запрещенной зоны кремния. Так как, согласно (13), расхождение полного стационарного тока электронов и дырок $d_j/dx = d(J_n + J_p)/dx$ равно нулю, то суммарный заряд диода между p^+ - и n^+ -контактами равен нулю:

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

Для p-t-n-диода на рисунок 4 показано распределение плотности напряжения $\tau(x, U)$ на диоде: $U=0; -2,5; +0,3 \text{ В}$. Зависимость $\tau(x)$ асимметрична относительно $x=0$, так как энергетические уровни $E_1^{(v)}$ и $E_2^{(v)}$ асимметричны относительно центра запрещенной зоны кремния. Так как согласно (13) расходимость суммарного стационарного тока электронов и дырок $d_j/dx = d(J_n + J_p)/dx$ равна нулю, то суммарный заряд диода между p^+ - и n^+ -контактами равен нулю [17]:

Низкочастотная дифференциальная емкость кремниевого p-n-диода C_d (без т-дефектов) была получена путем решения системы стационарных дифференциальных уравнений, описывающих процессы миграции электронов и дырок и межзонной рекомбинации в дрейфово-диффузионном приближении [18]. Зависимость объемной плотности электрического заряда τ от координаты x для p-t-n-диода При расчете в качестве добавок выбраны и

фосфор $[a_p)$ и $[d_n)]$, распределенные по формуле $[N_t(0)=10^{16} \text{ см} = \text{см}^{-3}; \Delta=3l=0.6 \text{ мкм}]$ В качестве добавок $[a_p)$ и $[d_n)]$ были выбраны бор и фосфор], распределенные по формуле Расчет показывает что зависимость барьерной емкости от обратного напряжения C_d в пределе $l \rightarrow 0$ ($U < 0$) соответствует классической формуле для р-п-диода с острым плоским р-п переходом [19].

$$\frac{C_d}{S} = \sqrt{\frac{e \epsilon_r \epsilon_0 N_a N_d}{2(\phi_b - U)(N_a + N_d)}},$$

где S -р-п переход; $\phi_b > 0$ – контактная разность электрических потенциалов. По сравнению с диодом без т-дефектов вольт-фарадная характеристика т-дефектного диода отличается немонотонной зависимостью дифференциальной емкости $C_d(U)$ от напряжения C_d [20] (при обратном смещении аномальная регион появляется «лади»). область усиления мощности). Это можно объяснить перераспределением зарядовых состояний т-дефектов по координате x в двойном электрическом слое при обратном смещении диода (рисунок 4). Емкость р-т-п-диода увеличивается до тех пор, пока т-дефекты не зарядятся полностью. После этого обратное смещение ($U < 0$) с ростом емкости также начинает уменьшаться. В диоде без т-дефектов (формулу 18). Такой тип вольт-фарадной характеристики наблюдался в кремниевом диоде, в котором путем имплантации ионов ксенона был сформирован слой компенсационных дефектов с максимальной концентрацией вблизи р-п-перехода.

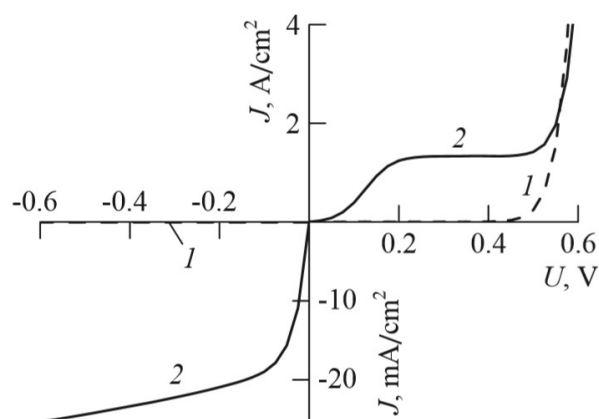


Рисунок 5. Зависимость стационарной плотности тока $J=J_n+J_p$ от напряжения U в р-п-диоде (кривая 1 при $N_t(0) = 0$) и р-т-п-диоде (кривая при $N_t(0)=10^{16} \text{ см}^{-3}$).

На рис. 5 представлены расчетные CVC кремниевго диода без т-дефекта (кривая 1) и диода со слоем т-дефектов в области р-п-перехода (кривая 2). Отметим, что расчетная CVC (кривая 1) диода без Т-дефекта

хорошо согласуется с CVC реальных симметричных кремниевых диодов [21-22]. Для диода со слоем т-дефектов в области р-п-перехода (кривая 2) приведенная выше модель предсказывает существенное различие CVC. Таким образом, как видно из графика, обратный ток через диод, содержащий δ - слой т-дефектов, намного больше, чем обратный ток через диод без т-дефектов [23]. (Максимальная напряженность электрического поля E внутри кремниевого р-т-п-диода была на порядок меньше порогового значения (≈ 100 кВ/см) электрического пробоя р-п-диода при комнатной температуре. Область р-п-перехода (кривая 2) также т бездефектного диода отличается от CVC (кривая 1) и напоминает CVC инвертированного $p^+ - n^+$ диода. Ток через диод, содержащий δ -слой, в области р-п-перехода δ та линейно возрастает, после чего стабилизируется в диапазоне напряжений от 0,2 до 0,45 В. Это можно объяснить рекомбинацией электронов и дырок в т-дефектах в двойных электрических [24—25]. толщина слоя $x_a + x_d$ Из-за асимметрии сечений захвата для дырок и электронов ($S_p > S_n$) дырки, инжектированные из р-области в область двойного электрического слоя, захватываются отрицательно заряженными т-дефектами и нейтрализуют их. при дальнейшем увеличении напряжения электроны в с-зоне и v -дырки в диапазоне не успевают рекомбинировать на т-дефектах, что приводит к резкому (экспоненциальному) росту тока двусторонней инжекции, а для кривой

2 . Диод р-т-п для р-п-диода (без т-дефектов) практически соответствует кривой Впервые построена модель симметричного кремниевого р-т-п-диода, содержащего δ -слой двухуровневых т-точечных дефектов, которые могут существовать в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$. В дрейфово-диффузионном приближении наблюдались статическая емкость и плотность тока для невырожденного р-т-п-диода в полях проводимости р- и п-типа при прямом и обратном напряжении смещения. Расчеты показывают, что ток в р-т-п-диоде с прямым смещением ($U > 0$) в диапазоне напряжений от 0,2 до 0,45 В для комнатной плотности значительно выше, чем у диода без т-дефектов и слабо зависит от напряжения U (стабилизация тока область). Плотность обратного тока в р-т-п-диоде в несколько раз выше, чем у обычного р-п-диода (без т-дефектов). Таким образом, р-т-п-диод с прямым смещением имитирует $p^+ - n^+$ -диод с обратным смещением. В обратном направлении ($U < 0$) емкость низкочастотного барьера т-дефектного диода немонотонно зависит от U . При малых смещениях емкость р-т-п-диода значительно меньше. Емкость диода без т-дефектов.

Использованная литература:

1. O.O. Mamatkarimov, B.H. Kuchkarov, N.Yu. Sharibaev, A.A. Abdulkhayev “Influence Of The Ultrasonic Irradiation On Characteristic Of The Structures Metal-Glass-Semiconductor” European Journal of Molecular & Clinical Medicine 2021/1/1 8/01 str 610-618.
2. B.Kh.Kuchkarov, O.O.Mamatkarimov. “Influence of ultrasonic action on the rate of charge formation of the inversion layer in metal-glass-semiconductor structures” Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki 2019 y 29/4 str 125-134.
3. S.I. Vlasov, A.V. Ovsyannikov, B. Kh. Kuchkarov “Influence of thermo cyclic treatments on SiO₂-Si interface properties in Al-SiO₂-n-Si structures” Uzbekiston Fizika Zhurnali 2012 y 14/1 str 20-22.
4. Б.Х. Кучкаров “Влияние ультразвукового воздействия на скорость формирования заряда инверсионного слоя в структурах метал-стекло-полупроводник Вестник КРАУНЦ” Физико-математические науки 2019y 29/4 стр 125-134.
5. B.Kh. Kuchkarov, O.O Mamatkarimov, A.A. Abdulkhayev “Relaxation dependence of the capacity of a three-layer structure in the process of charge formation of an inversion layer” Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology 2019 y 1/6 str 26-33.
6. S. Zaynobiddinov, B.Kuchqarov “Development of effective methods of teaching theoretical electrotechnics Web of Scientist” International Scientific Research Journal 14/4/2022 y 3/4 str 431-437.
7. B. Kuchkarov, A. Abdulkhayev “Factors providing the efficiency of semiconductor lasers” Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology 2022 y 3/5 str 48-52.
8. SI Vlasov, FA Saparov, B Kh Kuchkarov “ Effect of the semiconductor-insulator interface on the characteristics of the metal-insulator-semiconductor structures ” Uzbekiston Fizika Zhurnali 2009 y 11/3 str 203-206.
9. B.H. Kuchkarov, O.O. Mamatkarimov, A.A. Abduraimov, A. Khalmirzayev, and D.M. Mirtojyeva “Influence of All-Round Compression on Formation of the Mobile Charge in Lead-Borosilicate Glass Structure” AIP Conference Proceedings 2432, 030039 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0089980> 2432, 030039 © 2022 Author(s)..
10. Б.Х. Кучкаров, М. Кахаров “МДП-структура и ультразвук” Экономика и социум 2019 г. 12/ (67) стр 623-626.
11. D.E. Nazirov, S.I. Vlasov, B. Kh. Kuchkarov, K.U. Bobokhuzhaev “Influence of gadolinium on the electric properties on the interphase boundary of silicon–silicon oxide” Science and world 9/2013y 12/88 str 26-28.
12. О.О. Маматкаримов, Р.Х. Хамидов, Р.Г. Жабборов, У.А. Туйчиев, Б.Х. Кучкаров “Релаксационные изменения подвижности и концентрации носителей заряда в Si с глубокими примесными уровнями при воздействии импульсного давления” Физическая инженерия поверхности 2012.
13. B. X. Qo'chqarov, A. Nishonov, X.O. Qo'chqarov “The effect of tunneling current on the speed surface generation of charge carriers” Scientific Bulletin of Namangan State University 2019y 1/7 str 3-6.
14. B.Kuchkarov. O. Mamatkarimov, A. Abdulkhayev, ICECAE IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 012027 “Influence of the ultrasonic irradiation on characteristic of the structures metal-glass-semiconductor”, (2020) y. Paper ID 116.

15. B.X. Qo'chqarov, A.Nishonov, X.O. Qochqarov, Scientific bulletin of Namangan State University, "The effect of tunneling current on the speed surface generation of charge carriers", (2020)y. 1(7), 3-6.
16. S. I. Vlasov, D. N. Nazirov, B.K. Kuchkarov, K.U. Bobokhujayev, "Influence of all-round compression on formation of the mobile charge in lead-borosilicate glass structure". "Uzbekiston Fizika Zhurnali", (2014) y. 3(16), 231-233.
17. B.Kh. Kuchkarov, O.O. Mamatkarimov, "Influence of ultrasonic action on the rate of charge formation of the inversion layer in metal-glass-semiconductor structures" Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki, (2019) y. 4(29), 125-134.
18. S.I. Vlasov, A.V. Ovsyannikov, B.K. Ismailov, B.H. Kuchkarov, Effect of pressure on the properties of $\text{Al-SiO}_2\text{-n-Si<Ni>}$ structures. "Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics", (2012) y. 2(15), 166-169.
19. S.I. Vlasov, D.E. Nazyrov, B. Kh. Kuchkarov, K.U. Bobokhujayev "Influence of all-round compression on formation of the mobile charge in lead-borosilicate glass structure" Uzbekiston Fizika Zhurnali 16/3 стр 231-233.
20. S.I. Vlasov, F.A. Saparov, B. Kh. Kuchkarov "Effect of the semiconductor-insulator interface on the characteristics of the metal-insulator-semiconductor structures" Uzbekiston Fizika Zhurnali 2009 y. 11/3 стр. 203-206.
21. B.T.Abdulazizov, G.Gulyamov, P. J. Baymatov, Sh. T. Inoyatov, M. S. Tokhirjonov and Kh. N. Juraev//Peculiarities of the Temperature Dependence of the Chemical Potential of a Two-dimensional Electron Gas in Magnetic Field// SPIN Vol. 13, No. 1 (2022) .pp (2-7), <https://doi.org/10.1142/S2010324722500023>.
22. B.T. Abdulazizov/Cyclotron mass of an electron in strong magnetic fields in a wide InAs quantum well/ *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials* (2022), 6(1), pp 32-37, doi.org/10.32523/ejpfm.2022060103.
23. G.Gulyamov, B.T.Abdulazizov, P.J.Baymatov.Three-band simulation of the g-factor of an electron in an InAs quantum well in strong magnetic fields .Journal of Nanomaterials ,Volume (2021), Article ID pp (559-563), <https://doi.org/10.1155/2021/5542559>.
24. P.J. Baymatov, B.T. Abdulazizov. Concentration dependences of the electron effective mass , Fermi energy, and filling of subbands in doped InAs/AlSb quantum wells.Украинский Физический Журнал. Ukr. J. Phys.2017. Vol. 62, No. 1, стр 46-50 , <https://doi.org/10.15407/ujpe62.01.0046>.
25. G Gulyamov, BT Abdulazizov. On the thermodynamics of a two-dimensional electron gas with non-parabolic dispersion. World Journal of Condensed Matter Physics.pp 294-299. doi: [10.4236/wjcmp.2016.64028](https://doi.org/10.4236/wjcmp.2016.64028).