

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И  
ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЮЖНО-КАЗАХСТАНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.АУЭЗОВА

ФЕРГАНСКИЙ МЕДИЦИНСКИЙ ИНСТИТУТ ОБЩЕСТВЕННОГО  
ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

МАТЕРИАЛЫ

Международной научной конференции

**“ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ  
СРЕД”**

Фергана, 24-май, 2024 год.

STATISTIKASI Tahlili. PEDAGOGICAL SCIENCES AND TEACHING METHODS, 2(20), 235-237.

11. Yavkachovich, R. R., Umidaxon, R., Adhamovna, M. M., Arabbojevich, N. I., & Arabbojevich, M. I. (2019). To the theory of current-voltage characteristics of the three-layer structure of semiconductors in diode switching. European science review, (11-12), 74-76.

12. Rasulov, V. R., Mo'minov, I. M., & Maqsdova, G. N. (2023). Phenomenological Analysis of the Current of the Single-Photon Polarization Photovoltaic Effect. Best Journal of Innovation in Science, Research and Development, 2(5), 40-44.

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НА ВАХ ДИОДА С ДВОЙНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

В.Р.Расулов, М.А.Маматова

Ферганский государственный университет

**Аннотация:** рассчитана вольт-амперная характеристика трехслойной полупроводниковой структуры, база которой изготовлена из компенсированного полупроводника. При этом учтена поверхностная рекомбинация свободных носителей тока.

**Ключевые слова:** компенсированный полупроводник, вольтамперная характеристика, поверхностная рекомбинация,  $S$ - диод.

Вольт – амперная характеристика (ВАХ) диода, база которого изготовлена из компенсированного полупроводника, рассмотрены в ряде работ (см., например, и цитируемые там литературы).

Ниже перечислим ряд явлений, объясняющих появление участка отрицательного сопротивления (ОС) в ВАХ  $S$  – диодов: а) изменение с током коэффициента инжекции  $p$ - $n$  перехода; б) возрастание времени жизни неосновных носителей при инжекции; в) декомпенсация объемного заряда в базе диода; г) излучательная рекомбинация дальнейшей реасорбций фотонов; д) увеличение амбиполярной и дрейфовой подвижности; е) изменение радиуса экранирования заряженных примесных центров при инжекции носителей.

В этих работах пренебрегается влияние на ВАХ поверхностной рекомбинации. Можно доказать, что изменение эффективной рекомбинации

приводит к изменению формы ВАХ. В данной работе этот случай рассматривается для  $S$  – диодов.

В настоящем сообщении, покажем, что изменение эффективной скорости поверхностной рекомбинации эмиттерного и коллекторного переходов диода двойной инжекцией приводит к изменению ВАХ. В стационарном случае распределение носителей заряда в базе  $S$ -диодов, которая изготовлена из полупроводника, компенсированного примесями, создающими глубокие уровни в запрещенной зоне, описываются следующими уравнениями:

$$I_p = e\mu_p(p + p_0)E - gD_p \frac{dp}{dx}, \quad (1)$$

$$I_n = e\mu_n(n + n_0)E - gD_n \frac{dn}{dx}, \quad (2)$$

$$-\frac{1}{2} \frac{dj_p}{dx} = \frac{p}{\tau_p}. \quad (3)$$

Здесь  $\tau_p, \tau_n$  – время жизни,  $\mu_p, \mu_n$  – подвижности,  $D_p, D_n$  – диффузионные коэффициенты,  $n_0, n$  и  $p_0, p$  – равновесные и неравновесные концентрации электронов и дырок.  $J_p$  и  $J_n$  – дырочный и электронные составляющие полного тока  $J$

$$J = J_p + J_n. \quad (4)$$

Зависимость между концентрациями электронов и дырок определяются решением уравнения Пуассона, и легко можно получить, используя условия квазинейтральности

$$-\frac{\varepsilon}{4\pi e} \frac{dE}{dx} = n + n_0 \quad (5)$$

и считая, глубокие уровни уровнями прилипания для дырок связь между концентраций электронов и дырок можем записать в виде [2]:

$$n = p \frac{p + N_1}{p + N_2}, \quad (6)$$

где

$$N_1 = \frac{\theta N f_0^0 + \theta(1+\delta)p_0 + (1+\delta^{-1})n_0}{\theta+1}, \quad (7)$$

$$N_1 - N_2 = \frac{\theta N(f_-^0 - f_0^0)}{\theta + 1}, \quad (8)$$

$\theta$  – отношение сечения захвата электронов и дырок на глубокий уровень,  $\delta$  – отношение минус  $f_-^0$  и ноль зарядных  $f_0^0$  атомов глубокой примеси в равновесной состоянии. Из уравнений (1 – 4), учитывая (5), (6) получим безразмерные выражения для  $E$  и  $J_p$  при высоком уровне инжекции. Тогда нетрудно получить систему уравнений, с помощью которых можно рассчитать ВАХ рассматриваемой структуры

$$E = \frac{2 \cdot j \cdot b}{y[1+b(a+1)]+b} - \frac{y'[b(a+1)-1]}{y[1+(a+b)b]+b}, \quad (9)$$

$$J_p = \frac{y}{y[1+b(a+1)]+b} J - \frac{y(a+1) + \frac{1}{2}}{y[1+b(a+1)]+b} y'. \quad (10)$$

There Здесь  $y = \frac{p}{n_0}$ ,  $a = \frac{N_1 - N_2}{N_2}$ ,  $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ ,  $J = \frac{I L_p}{2 e D_n n_0}$ .

Постановка (10) в (3) приводит к следующему уравнению при высоких уровнях инжекции для случая

$$y'' - 2y \cdot y' - y = 0 \quad (11)$$

При больших токах нужно учитывать не только свойства перехода, но и свойства контакта, что требует учета процесс рекомбинации на поверхности. Если учитываем, что у диода тыловой контакт имеет антизапорный характер, тогда пространственное распределения по длине базы структуры носителей тока определяется в виде

$$y = A e^{k_2 x} + B e^{-k_1 x}, \quad (12)$$

where где  $k_{1,2} = \sqrt{j^2 + 1} \mp j$ ,  $J = j \frac{\varepsilon a b}{2(a+1)[1+b(a+1)]}$ ,  $A$  и  $B$ - постоянные интегрирования, определяемые из следующих граничных условий

$$\begin{cases} j_p(d) = e s_p^* [p(d) - p_n] \approx e s_p^* n_0 y(d), \\ y'(0) = -b_1 \cdot j. \end{cases} \quad (13)$$

$$(14)$$

Для упрощения  $j_p(d)$  напишем в безразмерной форме

$$j_p(d) = \aleph \cdot y(d), \quad (15)$$

where где  $\aleph = \frac{e s_p^* L_p}{e D_p}$ ,

$$s_p^* = \frac{S_p}{e^{-\frac{e(V_m \pm V_k)}{kT}} + \frac{S_p}{D_p} \int e^{\frac{eV(x)}{kT}} dx} \quad (16)$$

-скорость поверхностного распределения,  $V_m$  – падение внешнего напряжения на контакте с металлом,  $\pm V_k$  – контактная разность потенциалов, “+” и “-” относятся к запиорному и антизапиорному слою соответственно.

Согласно (13), (14) и (12) имеем

$$A = \frac{\gamma + \left(\sigma - \frac{\aleph}{k_1}\right) \cdot m \cdot e^{-k_1 d}}{\left(\frac{\aleph}{k_2} + \sigma\right) \cdot e^{k_2 d} + \left(\frac{\aleph}{k_1} - \sigma\right) e^{-k_1 d}} \cdot \frac{1}{k_2}, \quad (16)$$

$$B = \frac{\gamma + \left(\sigma + \frac{\aleph}{k_2}\right) \cdot m \cdot e^{-k_1 d}}{\left(\frac{\aleph}{k_2} + \sigma\right) \cdot e^{k_2 d} + \left(\frac{\aleph}{k_1} - \sigma\right) e^{-k_1 d}} \cdot \frac{1}{k_1}, \quad (17)$$

где  $\sigma = \frac{a+1}{1+b(a+1)} \cdot \frac{e D_p n_0}{L_p}$ ,  $\gamma = \frac{I \cdot L_p}{e D_p n_0} \cdot \frac{1}{1+b(a+1)}$ . При  $\aleph = 0$

$$A = \frac{\frac{\gamma}{\sigma} + m \cdot e^{-k_1 d}}{e^{k_2 d} - e^{-k_1 d}} \cdot \frac{1}{k_2}, \quad (18)$$

$$B = \frac{\frac{\gamma}{\sigma} + m \cdot e^{k_2 d}}{e^{k_2 d} - e^{-k_1 d}} \cdot \frac{1}{k_1}. \quad (19)$$

если  $m=1$  (18) и (19) соответствует к результатам [2]. [2].

Подставляя (16) и (17) в (12) получим выражения для распределения тока по длине базы структуры

$$y(x) = \frac{\gamma/k_2}{\left(\frac{\aleph}{k_2} + \sigma\right) e^{k_2 d} + \left(\frac{\aleph}{k_1} - \sigma\right) e^{-k_1 d}} \left[ \left(1 + \left(\sigma - \frac{\aleph}{k_2}\right) \frac{m}{\gamma} e^{-k_1 d}\right) e^{k_2 x} + \left(1 + \left(\sigma + \frac{\aleph}{k_2}\right) \frac{m}{\gamma} e^{-k_1 d}\right) e^{-k_2 x} \right] \quad (22)$$

Принимая в внимание  $j_p(0) = j$  из последнего получим выражение для максимального значения тока, определяемого соотношением  $j = -\beta \frac{dy}{dx}$

$$y_0 = \frac{k_1 \left[ 1 + \left( \sigma - \frac{\aleph}{k_2} \right) \frac{m}{\gamma} \exp(-k_1 d) \right] + k_2 \left[ 1 + \left( \frac{\aleph}{k_2} + \sigma \right) \frac{m}{\gamma} \right] e^{k_2 d}}{k_1 \cdot k_2 \left[ \left( \frac{\aleph}{k_2} + \sigma \right) e^{k_2 d} + \left( \frac{\aleph}{k_1} - \sigma \right) e^{-k_1 d} \right]}, \quad (23)$$

где  $\beta = \frac{y_0(1+a)^{-\frac{1}{2}}}{b[y_0(1+a)+1]}$ . Тогда падение напряжения в  $p-n$  переходе определяется выражением

$$V_{pn} = \ln \left| \frac{\gamma k_1 \left[ 1 + \left( \sigma - \frac{\aleph}{k_2} \right) \frac{m}{\gamma} e^{-k_1 d} \right] + k_2 \left[ 1 + \left( \sigma + \frac{\aleph}{k_2} \right) \frac{m}{\gamma} e^{k_2 d} \right] \gamma}{y_n k_1 \cdot k_2 \left[ \left( \frac{\aleph}{k_2} + \sigma \right) e^{k_2 d} + \left( \frac{\aleph}{k_1} - \sigma \right) e^{-k_1 d} \right]} \right| \quad (24)$$

где учтено, что

$$y(a) = y_n e^{\frac{eV_{pn}}{kT}}, y_n = \frac{p_n}{n_0} y(a) e^{\frac{eV_{pn}}{kT}}. \quad (25)$$

Падение напряжения в толще определим по формуле

$$V_T = V_1 + V_2 = \int_0^d E dx \quad (26)$$

и подставляя (22) в (26) и произведя интегрирование получим

$$V_1 = \frac{1 - b(a+1)}{1 + b(a+1)} \ln \left| \frac{k_1 e^{k_2 d} + k_2 e^{k_1 d} + \frac{m}{\gamma} \sigma (k_2 - k_1) e^{(k_1 - k_2) d}}{k_1 + k_2 + \frac{m}{\gamma} \sigma (k_1 e^{-k_1 d} + k_2 e^{k_2 d}) + \frac{\aleph m}{\gamma} (e^{k_2 d} - e^{-k_1 d})} \right| \quad (27)$$

а  $V_2$  (для длинных диодов) принимает вид:

$$V_2 = \frac{1 - b(a+1)}{1 + b(a+1)} \cdot \frac{1}{B} \cdot \frac{\pi}{k_1 + k_2} \left( \frac{A}{B} \right)^{-\frac{k_1}{k_1 + k_2}} \cdot \operatorname{cosec} \frac{\pi k_1}{k_1 + k_2} \quad (28)$$

Если скорость поверхностной рекомбинации слишком мал, то выражения (24), (27), (28) перейдет результатам, полученным в<sup>2</sup>.

При бесконечно большой скорости поверхностной рекомбинации  $V_1$  и  $V_2$  стремится к нулю, а  $V_{pn}$  имеет вид

$$V_{pn} = \ln \frac{m(e^{k_2 d} - e^{-k_1 d})}{y_n(k_1 e^{k_2 d} + k_2 e^{-k_1 d})} \quad (29)$$

Таким образом, учет поверхностной рекомбинации носителей тока сильно изменить как характер изменения ВАХ структуры, так и распределения тока (также носителей тока) по длине базы трехслойной структуры, в диодном включении, база которой изготовлена из компенсированного полупроводника.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Осипов, В.А. Холоднов. ФТП. 1970. Т.4. 2241 с.
2. А.И. Бараненков, В.В. Осипов. ФТП. 1969. Т.3. 39 с.
3. Mamatova, M. A., Yavkachovich, R. R., Dilshodbek, M., & Forrukh, K. (2022). Relation between the concentration of nonequilibrium electrons and holes in long semiconductor diodes. *European science review*, (5-6), 29-32.
4. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Маматова, М. А., & Исомаддинова, У. М. (2022). К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ. КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ. *Universum: технические науки*, (10-5 (103)), 24-31.
5. Rustamovich, R. V., Yavkachovich, R. R., Adhamovna, M. M., Qizi, K. M. N., & Dovlatboyevich, M. D. (2022). VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF A THREE-LAYER SEMICONDUCTOR DIODE OF DOUBLE INJECTION. *European science review*, (5-6), 37-41.
6. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Eshboltaev, I. M. (2022). THEORETICAL INVESTIGATION OF ENERGY STATES IN A MULTILAYER SEMICONDUCTOR STRUCTURE IN THE QUASICLASSICAL APPROXIMATION. *Galaxy International Interdisciplinary Research Journal*, 10(12), 96-104.
7. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Qosimov, F. (2022, December). Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors. Part 1. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2388, No. 1, p. 012156). IOP Publishing.
8. Маматова, М. А., Исомаддинова, У. М., Кодиров, Н. У. О., & Обидова, М. И. (2022, December). КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ. In *The 12 th International scientific and practical conference "Eurasian scientific discussions" (December 18-20, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2022. 542 p.* (p. 226).
9. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Eshboltaev, I. M. (2022). THEORETICAL INVESTIGATION OF ENERGY STATES IN A MULTILAYER SEMICONDUCTOR STRUCTURE IN THE QUASICLASSICAL APPROXIMATION. *Galaxy International Interdisciplinary Research Journal*, 10(12), 96-104.
10. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Gofurov, S. Z. U. (2022). GENERALIZED MODEL FOR THE ENERGY SPECTRUM OF ELECTRONS IN TUNNEL-COUPLED SEMICONDUCTOR QUANTUM WELLS. *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR)*, 8(12), 1-5.

11. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Qosimov, F. (2022, December). Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors. Part 2. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2388, No. 1, p. 012158). IOP Publishing

## **Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> - Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> va Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> QOTISHMALARNING**

### **TERMOELEKTRIK XOSSALARI**

**T.M. Azimov, M.Z.Xayitoxunova**

**Farg'ona davlat universiteti**

**Annotatsiya:** Ushbu maqolada termoelektr vakuumda inert gaz bosimi ostida olingan. Bi, Sb Te va Se asosidagi termoelektrik materiallar  $10^{-2}$  mm.sim.ust 17 soat  $390^{\circ}\text{C}$  haroratda toblash orqali olindi. Olingan qotishmalardan tayyorlangan yarim elementlarda termoelektrik va elektrofizik xususiyatlari o'rganildi.

**Tayanch so'z va iboralar:** differensial, sublimasiya, xalkogen, legirlash, kompensasiya.

Olingan qotishmalardan tayyorlangan yarim elementlarda tyermoelektrik parametrlar o'Ichandi. Yarim elementlarni toblash  $390^{\circ}\text{C}$  haroratda 17 soat davomida vakuum darajasi  $10^{-2}$  mm.sim.ust. bo'lgan kvarts ampulalarda o'tkazildi. Olingan yarim elementlarning xarakteristikalari solishtirma elektr o'tkazuvchanligi  $\sigma$  ( $\text{Om}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ), termoelektr yurituvchi kuch koeffitsiyenti  $\alpha$  (mkV/K) va solishtirma issiqlik o'tkazuvchanligi  $\chi$  (kal/m·s·K) larni o'lchash bilan aniqlandi va ular asosida materialning asslligi topildi. Namunalarning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi kompensasiya usuli bilan doimiy tokda, orasidagi masofa aniq bo'lgan to'rt zond yordamida o'Ichandi. Termoeuyuk xona haroratida differensial usul bilan o'Ichandi. Bu holda, namunadagi  $8-15^{\circ}\text{C}$  bo'lgan harorat farqi namunaning pastki uchi xona haroratida bo'lganda, tashqi issiqlik manbai bilan isitilib hosil qilindi.

Doimiy tokda  $\alpha$  va  $\sigma$  larning haroratga bog'lanishi tekshirilayotgan namunalar joylashgan muhit (argon) haroratini bosqichma-bosqich o'lchash bilan kompensasiya sxemasi yordamida zond usulida aniqlandi. Yuqori haroratlardagi o'lchashlar ham, xona haroratida o'tkazilgan usullar kabi amalga oshirildi.  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\chi$  termoelektrik parametrlarni o'lchashning nisbiy xatoligi 3% dan 5% gacha qiymatni tashkil etdi.