

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.

Adabiyotlar

1. Einstein, A. "On the Movement of Small Particles Suspended in Stationary Liquids Required by the Molecular-Kinetic Theory of Heat." *Annalen der Physik*, 1905.
2. Ergashev, E. A. U. (2023). THE STRUCTURE OF THE PROTEIN MOLECULE AND THE FORCES GENERATED IN IT. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*, 3(4), 816-819.
3. Karabayev, M., Onarkulov, K., & Ergashev, E. (2024, March). Kinetics of dehydration of NaCl solutions of different concentrations. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3045, No. 1). AIP Publishing.
4. Karabayevich, K. M., Abdusattor-ugli, E. E., & Muxtorovna, G. N. (2021). Evaluation of the degree of crystallization of biological fluid (Saliva). *ACADEMICIA: AN INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY RESEARCH JOURNAL*, 11(1), 1032-1036.
5. Karabayevich, K. M., Abdusattor-ugli, E. E., & Muxtorovna, G. N. (2021). Evaluation of the degree of crystallization of biological fluid (Saliva). *ACADEMICIA: AN INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY RESEARCH JOURNAL*, 11(1), 1032-1036.
6. Broun, R. "A Brief Account of Microscopical Observations on the Particles Contained in the Pollen of Plants." *Philosophical Magazine*, 1828.
7. Karabayevich, K. M., Abdusattor-ugli, E. E., & Muxtorovna, G. N. (2021). Evaluation of the degree of crystallization of biological fluid (Saliva). *ACADEMICIA: AN INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY RESEARCH JOURNAL*, 11(1), 1032-1036.
8. Smoluchowski, M. von. "Zur kinetischen Theorie der Brounschen Molekularbewegung und der Suspensionen."
9. Karabayevich, K. M., Abdusattor-ugli, E. E., & Muxtorovna, G. N. (2021). Evaluation of the degree of crystallization of biological fluid (Saliva). *ACADEMICIA: AN INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY RESEARCH JOURNAL*, 11(1), 1032-1036.

К ТЕОРИИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В ДИОДНОМ ВКЛЮЧЕНИИ

Маматова Махлиёхон Адхамовна

Старший преподаватель, ФГУ

Аннотация. Предложена обобщенная теория вольт-амперной характеристики трехслойной полупроводниковой структуры в диодном включении. При этом считается, что база этой структуры изготовлена из компенсированного полупроводника. Полученные результаты обобщены для различных по проводимости структур.

Ключевые слова: Вольт-амперная характеристика, трехслойная полупроводниковая структура, диод, компенсированный полупроводник.

Вольт – амперная характеристика (ВАХ) трехслойной структуры полупроводников в диодном включении, в которой база изготовлена из

компенсированного полупроводника, рассмотрены в ряде работ (см., например, [1-4] и цитируемые там литература). В [4], в частности, перечислены ряд явлений, объясняющих появление участка отрицательного сопротивления (ОС) в ВАХ в пропускном направлении в p-n-p структурах.

В данной работе, следуя по [2]¹, получено выражения для распределения плотностей тока и концентраций носителей тока по длине базы. Для определения связи между этими параметрами учтены уравнения Пуассона, условия электронейтральности и непрерывности потоков для носителей тока в стационарном случае [1-3]. Тогда распределение плотностей тока по длине базы трехслойной структуры описывается уравнением (в одномерном приближении, т.е. по оси Ox):

$$L_n^2 \frac{2n + \delta\theta p_0 + n_0}{(1 + b\delta\theta)p + \delta\theta(p_0 + bn_0)} \frac{d^2 j_n}{dx^2} - j_n + \frac{b(n + n_0)}{\left(b + \frac{1}{\delta\theta}\right)p + n_0 b + p_0} j = 0 \quad (1)$$

где использованы обозначения работы [1, 2], $j = j_n + j_p$ плотность суммарного тока электронов и дырок. Здесь считается, что база структуры изготовлена из полупроводника, компенсированного примесями, создающими глубокие уровни в запрещенной зоне. Тогда в области сильной инжекции (1) принимает вид

$$\frac{2L_n^2}{1 + b\delta\theta} \frac{d^2 j_n}{dx^2} - j_n + \frac{b}{\left(b + \frac{1}{\delta\theta}\right)} j = 0 \quad (2)$$

Для решения последнего удобно перейти к $y = j_n/j = j_n/(j_n + j_p)$. Тогда нетрудно получить

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{b\delta\theta + 1}{2} \left(y - \frac{b\delta\theta}{b\delta\theta + 1} \right) = 0 \quad (3)$$

решение которого ищем в виде

¹ В [2] рассмотрена структура $p^+ - n - n^+$.

$$y = \frac{b\delta\theta}{b\delta\theta + 1} + c_1 \operatorname{ch} x \sqrt{a} + c_2 \operatorname{ch} x \sqrt{a} \quad (4)$$

где $a = \frac{b\delta\theta + 1}{2}$; $L = \sqrt{\frac{2L_n}{b\delta\theta + 1}}$. Из условия $y(0) = j_n(0)/j = m_1$ (электронная доля полной плотности тока в $x = 0$) имеем

$$c_1 = \frac{(m_2 + 1)b\delta\theta + m_2 - [b\delta\theta(m_1 - 1) - m_1] \operatorname{ch} \frac{d}{L}}{(b\delta\theta + 1) \operatorname{sh} \frac{d}{L}} \quad (5)$$

Далее вводя электронную долю в полной плотности тока в $x = d$ (d - длина базы), т.е. $y(d) = j_n(d)/j = m_2$ получим выражение для j_n

$$\frac{j_n}{j} = \frac{b\delta\theta}{b\delta\theta + 1} + \frac{(m_1 + 1)b\delta\theta + m_1}{(b\delta\theta + 1) \operatorname{sh} \frac{d}{L}} \operatorname{sh} \frac{d - x}{L} + \frac{(m_2 + 1)b\delta\theta + m_2}{(b\delta\theta + 1) \operatorname{sh} \frac{d}{L}} \operatorname{sh} \frac{x}{L} \quad (6)$$

Тогда в диффузионном приближении распределение электронов по длине базы структуры имеет вид

$$n = \frac{jL_n \frac{1}{\operatorname{sh} \frac{d}{L}}}{eD_n \sqrt{2(1 + b\delta\theta)}} \left\{ [(m_2 - 1)b\delta\theta + m_2] \operatorname{sh} \frac{x}{L} - [(m_1 - 1)b\delta\theta + m_1] \operatorname{sh} \frac{d - x}{L} \right\}, \quad (7)$$

откуда концентрации электронов в контактах определяются соотношениями

$$n(0) = \frac{jL_n}{eD_n \sqrt{2(1 + b\delta\theta)} \operatorname{sh} \frac{d}{L}} \left\{ [(m_2 - 1)b\delta\theta + m_2] \tilde{n}h \frac{d}{L} - [(m_1 - 1)b\delta\theta + m_1] \right\},$$

$$n(d) = \frac{[(m_2 - 1)b\delta\theta + m_2] \tilde{n}h \frac{d}{L} - [(m_1 - 1)b\delta\theta + m_1]}{(m_2 - 1)b\delta\theta + m_2 - [(m_1 - 1)b\delta\theta + m_1] \tilde{n}h \frac{d}{L}} n(0) \quad (8)$$

Отсюда распределение электронов по толщине базы для структур типа $p^+ - n - n^+$, $n^+ - n - p^+$ и $n^+ - n - n^+$ запишется в виде

$$n(x) = \frac{j L_n}{e D_n \sqrt{2(1+b\delta\theta)sh \frac{d}{L}}} \left[ch \frac{x}{L} + b\delta\theta ch \frac{d-x}{L} \right],$$

$$n(x) = \frac{j L_n \left[ch \frac{d-x}{L} - b\delta\theta ch \frac{x}{L} \right]}{e D_n \sqrt{2(1+b\delta\theta)sh \frac{d}{L}}} \quad (9)$$

и

$$n(x) = \frac{j L_n \left[ch \frac{x}{L} + ch \frac{d-x}{L} \right]}{e D_n \sqrt{2(1+b\delta\theta)sh \frac{d}{L}}}.$$

Вольт-амперная характеристика трехслойной полупроводниковой структуры, определяемой падением напряжения на базу структуры, в диффузионном приближении имеет вид

$$V = \int_0^d E dx = V_1 + V_2 \quad (10)$$

где

$$V_1 = -\frac{kT}{e} \cdot \frac{b\delta\theta - 1}{b\delta\theta + 1} \cdot \ln \left| \frac{ch \frac{d}{L} - \aleph_1}{1 - ch \frac{d}{L} \cdot \aleph_1} \right|, \quad \aleph_1 = \frac{(m_1 - 1)b\delta\theta - m_1}{(m_2 - 1)b\delta\theta + m_2},$$

$$V_1 = \frac{\varphi_{T1}}{\left\{ \left(1 - \aleph \cdot \exp \frac{d}{L} \right) \left[1 - \aleph \cdot \exp \left(-\frac{d}{L} \right) \right] \right\}} \left\{ \arctg \left[\sqrt{\frac{1 - \aleph \cdot \exp \left(-\frac{d}{L} \right)}{1 - \aleph \cdot \exp \frac{d}{L}}} \cdot e^{d/L} \right] - \arctg \sqrt{\frac{1 - \aleph \cdot \exp \left(-\frac{d}{L} \right)}{1 - \aleph \cdot \exp \frac{d}{L}}} \right\} \quad (11)$$

$$\aleph = \frac{(m_1 - 1)b\delta\theta - m_1}{(m_2 - 1)b\delta\theta + m_2}, \quad \varphi_{T1} = \frac{kT}{e} \cdot \frac{4 \cdot sh \frac{d}{L}}{\alpha(1+b\delta\theta)}.$$

Например, для структуры $n^+ - n - p^+$ имеем

$$V_1 = \frac{kT}{e} \cdot \frac{4 \cdot sh \frac{d}{L}}{1 + b\delta\theta} \cdot \frac{\eta_1 \cdot b\delta\theta}{\left\{ \left[1 + b\delta\theta \exp \frac{d}{L} \right] \cdot \left[1 + b\delta\theta \exp \left(-\frac{d}{L} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}, \quad (12)$$

$$\text{где } \eta_1 = \arctg \left\{ \frac{\left[\left(b\delta\theta + e^{\frac{d}{L}} \right) \left(b\delta\theta + e^{-\frac{d}{L}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{1 + b\delta\theta} \cdot th \frac{d}{2L} \right\}.$$

Тогда напряженность электрического поля в структуре имеет вид

$$E = \frac{j \cdot L_n}{e D_n} \cdot \frac{(m_2 - 1)b + m_2}{\sqrt{2(1+b)ch \frac{d}{L}}} \left[ch \frac{x}{L} - \aleph \cdot ch \frac{d-x}{L} \right] \quad (13)$$

а для минимального значения падения напряжения на базе

$$V_{\min} = \frac{kT}{e} \cdot \frac{\frac{4b}{b+1} \cdot sh \frac{d}{L}}{\left[\left(1 - \aleph \cdot e^{\frac{d}{L}} \right) \left(1 - \aleph \cdot e^{-\frac{d}{L}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot ((m_2 - 1)b + m_1)} \cdot \left[\arctg \left\{ \frac{\left[\left(1 - \aleph \cdot e^{\frac{d}{L}} \right) \left(1 - \aleph \cdot e^{-\frac{d}{L}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{(1 - \aleph) cth \frac{d}{L}} \right\} \right] \eta_i + \frac{b-1}{b+1} \cdot \frac{kT}{e} \ln \frac{1 - \aleph \cdot ch \frac{d}{L}}{ch \frac{d}{L} - \aleph} \quad (14)$$

В заключении отметим, что обсуждение полученных нами теоретических результатов к конкретным трехслойным полупроводниковым структурам в диодном включении требует отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Маматова, М. А., & Исомадинова, У. М. (2022). К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ

СТРУКТУРЕ. КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ. *Universum: технические науки*, (10-5 (103)), 24-31.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Маматова, М. А., Исомадинова, 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).

7. 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.

8. 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.

9. 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 Publishi

TO THE THEORY OF VOLT-AMPER CHARACTERISTICS OF THE THREE-LAYER STRUCTURE OF SEMICONDUCTORS IN DIODE SWITCHING

Mamatova Mahliyo Adhamovna

Senior teacher at the Department of Physics, Fergana State University

Annotation. A generalized theory of the current-voltage characteristics of a three-layer semiconductor structure in a diode inclusion is proposed. It is believed that the base of this structure is made of compensated semiconductor. The results obtained are generalized for structures with different conductivities.