

Odatda qizish ham to'g'rilanish ham rekombinasiya toklarini oshishi bilan bog'liq bo'lganligi sababli ularning hosil qilgan toklari va EYKlari bir xil yo'nalishda bo'ladi.

Bundan O'YCH maydon har doim p-n o'tishli diodda to'g'ri yo'nalishdagi toklarni hosil qiladi degan xulosaga kelamiz.

Adabiyotlar

1. Хелмут Спилер "Introduction to radiation detectors and Electronics", 30 – map – 99. IX.
2. A semiconductor device primer – doping and diodes. 2. S. Zi "Physics of Semiconductor Devices" volume - 1. Page (91 - 100).
3. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S. G. "Physics of Semiconductors", –Moscow: Nauka, 1977
4. Azizov M.A. "Yarimo'tkazgichlar fizikasi". –Toshkent: 1974. –P. 208 - 210.
5. Tetsuo Soga Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion © 2006 Elsevier B.V. All rights reserved. Chapter 1 Fundamentals of Solar Cell p (8-20).
6. G Gulyamov, UI Erkaboev, N Yu Sharibaev, AG Gulyamov. EMF Induced in a p– n Junction under a Strong Microwave Field and Light. Semiconductors 2019 53 (3), 375- 378. <https://doi.org/10.1134/S1063782619030060>
7. Гулямов Г., Гулямов А.Г., Мажидова Г.Н. Влияние деформации на фототоки в p-n-переходах // «Альтернативная энергетика и экология». – Россия, г.Саров, 2016. №15-16. -С. 24–30. (01.00.00, №9)
8. Gulyamov G. and Gulyamov A. G. On the Tensosensitivity of a p–n Junction under Illumination // Semiconductors, 2015, Vol. 49, No. 6, pp. 819–822. (№11. Springer, IF:0.701). DOI:<https://doi.org/10.1134/S1063782615060111> 9.
9. Gulyamov G., Majidova G.N., Shaxobiddinov B.B., Muxitdinova F.R. "Kremniy yarimo'tkazgichli p-n o'tishli diodlarning Fermi kvazisatxi va volt-amper xarakteristikasining vorug'lik va deformasiya ta'sirida o'zgarishi". NamDU ilmiy axborotnomasi. 2020. № 8.
10. Gulyamov G., Gulyamov A., Shahobiddinov B., Majidova G. "Relation of quasi-level fermi of hot electrons and holes with the current-voltage characteristics of the p-n junction. Scientific Bulletin of Namangan State University 2 (4), 8-15.

РЕЗЮМЕ

Odatda qizish ham to'g'rilanish ham rekombinasiya toklarini oshishi bilan bog'liq bo'lganligi sababli ularning hosil qilgan toklari va EYKlari bir xil yo'nalishda bo'ladi. Bundan O'YCH maydon har doim p-n o'tishli diodda to'g'ri yo'nalishdagi toklarni hosil qiladi.

РЕЗЮМЕ

Обычно и нагрев, и выпрямление связаны с увеличением рекомбинационных токов, поэтому их токи и ЭДС имеют одинаковое направление. Отсюда можно сказать, что поле СВЧ всегда генерирует токи в правильном направлении в диоде p-n перехода.

SUMMARY

Usually, both heating and rectification are associated with an increase in recombination currents, so their currents and EMF have the same direction. From this we can say that the microwave field always generates currents in the correct direction in the p-n junction diode.

ТУННЕЛЬ ДИОДЛАРИДА ХОСИЛ БЎЛУВЧИ ОРТИКЧА ТОКНИНГ ТУРЛИ МОДЕЛЛАРДАГИ КЎРИНИШИ

Г.Гулямов – физика-математика фанлари доктори, профессор
М.Ғ.Дадамирзаев – физика-математика фанлари доктори, профессор
НамМҚИ

М.К.Ўктамova – докторант
ЎЗМУ ҳузуридаги ЯФМИТИ

Таянч сўзлар: Чайновет модели, барернинг шаффофлик коэффициенти, ортикча ток, Нотт ва Де Масс назарияси, Франц-Кельдеш эффекти.

Ключевые слова: Модель Чайновета, коэффициент прозрачности барьера, избыточный ток, теория Нотта и Де Масс, эффект Франца-Кельдеша.

Key words: Chynovez model, barrier transparency coefficient, excess current, Knott and Demass theory, Franz-Keldesh effect.

Кўплаб мавжуд адабиётларда келтирилган тажриба натижаларида айнан туннель диодларидаги энг юкори ток кийматини кучли гетероўтишлар ёки кучли легирланган яримўтказгичлар асосида ҳосил қилинганлигини кўришимиз мумкин [1,2]. Туннель диодларида энг юкори ва энг қуйи соҳалардаги тоқлар нисбати бу туннель диодга берилган талабга боғлиқ. Эпитаксия усули билан олинган Si элементи асосидаги туннель диоди ёрдамида 320°C-550°C ҳарорат ораллиғида 3минут вақт ичида туннель диоднинг энг юкори нуктадаги ток зичлиги $J = 2.6 \frac{kA}{cm^2}$ га, шунингдек энг қуйи ва юкори нуктадаги туннель тоқнинг зичликлари нисбати 1.7 қийматга тенглиги [3] ишда аниқланган. Si/SiGe элементи асосида тайёрланган туннель диодида эса энг юкори нуктадаги ток зичлиги $J = 151 \frac{kA}{cm^2}$ га, энг қуйи ва юкори нуктадаги туннель тоқнинг зичликлари нисбати 2 қийматга тенглиги [4] ишда кўрсатиб ўтилган. GaN/AlN асосидаги резонанс туннель диодида эса энг юкори нуктадаги ток зичлиги $J = 431 \frac{kA}{cm^2}$ га, энг қуйи ва юкори нуктадаги туннель тоқнинг зичликлари нисбати 1.2-1.6 ораллиқда бўлгани кўрилган [5].

Энди Чайновет тақдим этган модели [6] бўйича туннель диодидаги ортикча ток учун олинган қуйидаги:

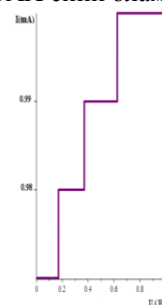
$$I_{CH} = D * P = \int \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT}\right) + 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}\right) + 1} (1 - \exp\left(-\frac{E_1}{E_g - qV + \mu_n + \mu_p}\right)) (1 - \exp\left(-\frac{E_2}{E_g - qV + \mu_n + \mu_p}\right)) dE * \exp\left(-\frac{\theta \sqrt{2me}}{3qh} (E_g - qV + \mu_n + \mu_p)^{\frac{3}{2}}\right) \quad (1)$$

ифода билан (бу ерда D ҳолатлар зичлиги учун Кан тақдим этган моделдан фойдаландик, P-шаффофлик коэффициенти) Нотт ва Де Масс назарияси асосидаги туннель диоднинг қуйидаги умумий формуласи [7]:

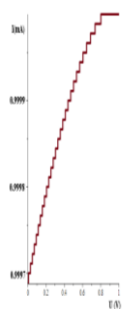
$$I = I_t + I_x + I_{\text{диф}} = I_p \left(\frac{V}{V_p}\right) \exp\left(1 - \frac{V}{V_p}\right) + I_V \exp(A_2 (V - V_V)) + I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right) \quad (2)$$

даги ортикча тоқга тегишли бўлган ҳади $I_x = I_V \exp(A_2 (V - V_V))$ билан солиштириб чиқамиз (бу ерда, $A_2 = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{m_x \varepsilon_s}{N}}$; ε_s – яримўтказгичларда электр ўтказувчанлик, N – концентрация, m_x – эффектив масса, I_V – туннель тоқнинг энг қуйи нуктасидаги қиймати V_V – туннель тоқнинг энг қуйи нуктасидаги қийматига тўғри келувчи қучланиш тушуви).

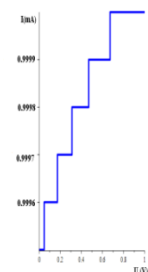
Даставвал, турли қийматдаги электр майдонлари учун (1) ифодадан фойдаланган ҳолда туннель диоди учун Чайновет модели бўйича ортикча тоқларнинг ВАХ сини оламиз (1, 2, 3-расмлар).



1-расм. Кучли айниган ҳолат учун ҳона ҳароратида германий асосли туннель диодида электр майдон $E_1 = 4 * 10^4 \left(\frac{V}{m}\right)$



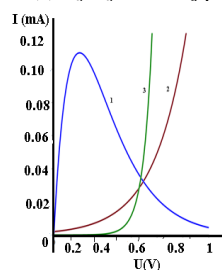
2-расм. Кучли айниган ҳолат учун ҳона ҳароратида германий асосли тун-нел диодида электр майдон

$$E_2 = 2 \cdot 10^3 \left(\frac{V}{m} \right)$$


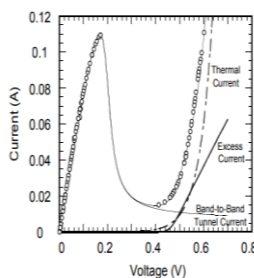
3-расм. Кучли айниган ҳолат учун ҳона ҳароратида германий асосли туннел диодида электр майдон

$$E_3 = 3.5 \cdot 10^3 \left(\frac{V}{m} \right)$$

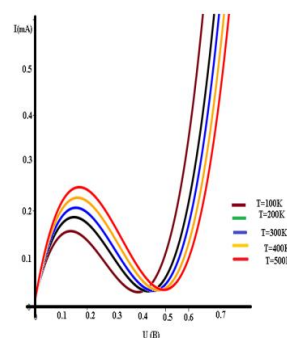
2-расмдаги графикдан фойдаланган ҳолда туннел токининг I_V ва V_V қийматларини топамиз ва (2) ифода ёрдамида туннел диодидаги ортиқча ток ВАХ сини ҳосил қиламиз (4-расмда) ва [3] ишдаги тажриба натижалари билан солиштирамиз (5-расм). Нотт ва Де Масснинг назариясидаги (2) ифодага асосан турли ҳароратлар учун вольт-ампер характеристикани олишимиз мумкин (6-расм). Юқорида келтирилган Чайновез модели асосидаги (1) ифодадан фойдаланиб, кучли айниган ҳолат учун ҳона ҳароратида германий асосли туннел диодида турли электр майдонлар учун 7-расмда умумий кўринишини олишимиз мумкин [8].



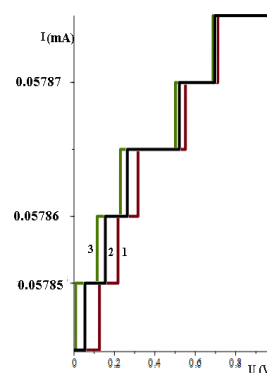
4-расм. Ҳона ҳароратида (4) ифода ёрдамида кучли айниган ҳолатда германий асосли туннел диоди учун; 1- туннел ток, 2- ортиқча ток ($F=\dot{u}$ згармас) ва 3-диффузия токи графиклари келтирилган.



5-расм. Oqimning uchta komponenti, tarmoqlararo tunnel oqimi, vodik oqimiga ortiqcha va termal diffuziya oqimi [8].



6-расм. Нотт ва Демасснинг назариясига кўра 2-расмдаги тажрибага асосан турли ҳароратларда олинган туннел диоднинг вольт-ампер характеристикаси



7-расм. Кучли айниган ҳолат учун ҳона ҳароратида германий асосли туннел диодида $E_1 = 2 \cdot 10^4 \left(\frac{V}{m} \right)$, $E_2 = 2.5 \cdot 10^4 \left(\frac{V}{m} \right)$, $E_3 = 2.8 \cdot 10^4 \left(\frac{V}{m} \right)$, турли электр майдон натижасида (2) ифода ёрдамида олинган Чайновез моделидаги туннел диоддаги ортиқча токнинг вольт-ампер характеристикаси

Юқорида олиб борилган тадқиқотлардан қуйидаги умумий мулоҳаза ва натижалар таҳлилларини келтириш мумкин: ишда туннел диодидаги ортиқча токнинг ўзгариши бўйича Франц-Кельдеш эффекти асосида турли электр майдонлари учун вольт-ампер характеристикаси олинди.

Хулоса.

Туннель диодида ҳосил бўладиган ортиқча ток эса, Чайновез модели билан Нотт ва Де Масснинг назарияси асосида таҳлил қилиб чиқилди. Чайновез моделида ортиқча ток ифодаси P га тўғри пропорционал бўлганлиги учун унинг ВАХси электр майдон зичлигига (E) га боғлиқ равишда ўзгаради [9,10], Нотт ва Де Масснинг назариясидаги ортиқча ток ифодаси эса асосан тажриба натижалари графикларига боғлиқ равишда ўзгаради, шунинг учун бу ерда ортиқча ток деярли сезилмаган, диффузия токи ҳароратга боғлиқ равишда ортиқча токга нисбатан устунлик қилади. Демак, тажрибаларда олинган туннель диодида ҳосил бўладиган токни баҳолаш учун бошқа моделлерга нисбатан Франц-Кельдеш эффекти асосида қурилган Чайновез модели бўйича юқори аниқликда текшириш мумкинлиги кўрсатилди.

Адабиётлар

1. Messaadi Lotfi1 and Dibi Zohir1. A Spice Behavioral Model of Tunnel Diode: Simulation and Application. International Journal of Control and Automation Vol. 9, No. 4 (2016), pp. 3950. <http://dx.doi.org/10.14257/ijca.2016.9.4.05>.
2. Thompson P.E., Hobart, M.E. Twigg S.L., Rommel N. Jin P.R., Berger R. Lake, A.C. Seabaugh P.H., Chi D.S., Simon. Epitaxial Si-based tunnel diodes. *Thin Solid Films* 380, 145–150 (2000).
3. Yan Yan, Silicon-based tunnel diode technology. *Silicon-Based Tunnel Diode Technology (researchgate.net)*, 22-23 (2008).
4. Niu Jin, Sung-Yong Chung, Anthony T. Rice, and Paul R. Berger. 151 kA/cm² peak current densities in Si/SiGe resonant inter-band tunneling diodes for high-power mixed-signal applications. *Applied physics letters* 83, 3308–3310(2003).
5. Tyler A. Growden, Weidong Zhang, Elliott R. Brown, David F. Storm, Katurah Hansen, Parastou Fakhimi, David J. Meyer and Paul R. Berger. 431 kA/cm² peak tunneling current density in GaN/AlN resonant tunneling diodes. *Applied physics letters* 112, 033508 (2018); doi: 10.1063/1.5010794
6. N. Moulin, Mohamed Amara, F. Mandorlo, M. Lemiti. Tunnel junction I (V) characteristics: Review and a new model for p-n homojunctions. *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, 2019, 126 (3), pp.033105. ff 10.1063/1.5104314ff. ff hal-03035269ff
7. De Massa T.A. and Knott D.P., *Solid-St. Electron.* 13, 131(1970).
8. Abdulazizov B.T. „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), 32-37, dio:10.32523/ejpfm.2022060103.
9. Yury Turkulets and Ilan Shalish. Franz-Keldysh effect in semiconductor built-in fields. 22 April 2018.
10. Chynoweth A.G., Feldman W.L. and Logan R.A., *Phys. Rev.* 121,684 (1961).

РЕЗЮМЕ

Ушбу ишда туннель диодида ҳосил бўлаган ортиқча ток Чайновез модели билан Нотт ва Демассанинг назарияси асосида таҳлил қилиб чиқилди. Туннель диодидаги ортиқча токнинг ўзгариши бўйича Франц-Кельдеш модели асосида электр майдоннинг турли қийматларида туннель диоднинг вольт-ампер характеристикаси олинди.

РЕЗЮМЕ

В данной работе избыточный ток, генерируемый в туннельном диоде анализировался с моделью Чайновеза, на основании теории Нотта и Демасса. По изменению избыточного тока туннельного диода на основе модели Франца-Кельдеша при различных значениях электрического поля получена вольт-амперная характеристика туннельного диода.

SUMMARY

In this paper, the excess current generated in the tunnel diode was analyzed with the Chynowez model, based on the theory of Knott and Demass. Based on the Franz-Keldesh model for various values of the electric field, the current-voltage characteristic of the tunnel diode was obtained from the change in the excess current of the tunnel diode.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЛЛИЯ И СУРЬМЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕГИРОВАННОГО, ДИФФУЗИОННЫМ СПОСОБОМ В КРЕМНИИ

Б.О.Исаков – базовый докторант

Ташкентский государственный технический университет

Таянч сўзлар: кремний, галлий, сурьма, концентрация, диффузия, диффузия коэффициенти.

Ключевые слова: кремний, галлий, сурьма, концентрация, диффузия, коэффициент диффузии.

Key words: silicon, gallium, antimony, concentration, diffusion, diffusion coefficient.

Введение. Основные источники энергии для производства электроэнергии были признаны неустойчивыми. Например, при сжигании ископаемого топлива (угля, нефти и природного газа) в атмосферу выбрасывается большое количество CO₂, что может привести к серьезным изменениям климата, таким как глобальное потепление, повышение уровня моря и изменение количества осадков. Атомные электростанции более экологичны (нулевые выбросы CO₂). Однако эти станции могут быть чрезвычайно опасными, если они не будут использоваться так безопасно, как во время Чернобыльской катастрофы 1986 года, или если произойдут стихийные бедствия, такие как Фукусима. По причинам, упомянутым выше, очень важно более широко использовать чистые и возобновляемые источники энергии. Возобновляемые источники энергии, в частности, могут быть решены путем преобразования солнечной энергии в электричество. Солнечная энергия преобразуется непосредственно в электрическую посредством фотогальванического (ФЭ) эффекта, открытого и продемонстрированного Нобелевским лауреатом Бекерелем [1-3].

Солнечные панели традиционно делятся на три разных поколения: солнечные панели на основе кремния, тонкопленочные солнечные панели и солнечные панели на основе нанокристаллов. Невозможность контролировать ключевые параметры, такие как подвижность носителей зарядов в кремнии, ограниченная энергия поля и структура энергетических зон ограничивает возможности кремния. Однако кремний составляет 26-27% земной поверхности, а промышленная технология производства кремния дешевле и распространеннее, чем другие полупроводниковые материалы. Поэтому кремний по-прежнему является ведущим материалом в полупроводниках, используемых в электронике и солнечных панелях. Поэтому во всем мире ведутся как теоретически, так и практически научные исследования по контролю основных параметров кремния и повышению эффективности кремниевых солнечных панелей.

Теоретические расчеты. В работе Ахмада Мостафы и Мамуна Медраса [Бинарные фазовые диаграммы и термодинамические свойства кремния и основных легирующих элементов (Al, As, B, Bi, Ga, In, N, P, Sb и Tl)] показана параметры диффузии галлия и сурьмы в кремнии.

$$D_i = A \cdot e^{\left(\frac{B[\text{eV}]}{kT}\right)} \left[\frac{cm^2}{s} \right] \quad (1)$$

Где А – величина, равная коэффициенту диффузии при бесконечной температуре [2].; В – энергия активации; D_i – коэффициент диффузии.

Таблица 1.

Элементы	A	B
Al	0.317	-3.023
As	8.85	-3.97
B	3.79	-3.645
Bi	1.08	-3.85
Ga	3.81	-3.552
In	3.13	-3.668
N	200000	-3.24
P	1.03	-3.507
Sb	40.9	-4.158
Tl	1.37	-3.7

Используя данные в табл.1 и выражение (1), можно рассчитать коэффициент диффузии при заданной температуре.

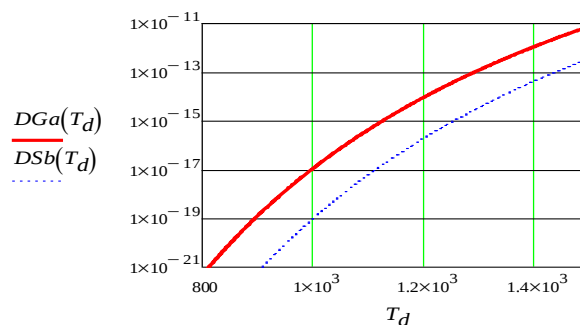


Рис. 1. График температурной зависимости коэффициентов диффузии элементов галлия и сурьмы.

График глубины проникновения концентрации элементов определяется следующим выражением (2):

$$C(x) = C_0 \cdot \text{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D(T) \cdot t}} \right) \quad (2)$$

Здесь C(x) – концентрация элемента, C₀ – максимальная растворимость элемента в кремнии, x – глубина проникновения, D(T) – коэффициент диффузии, t – время диффузии.

Максимальную растворимость галлия и сурьмы в кремнии можно определить по следующему графику [4-5]: