

В работе использовались треугольные, трапециевидные методы для определения соответствующих функций. Мамдани и Сугино использовались для подведения итогов и принятия решений. Результаты вычислительных экспериментов, выполненных на основе неустойчивой модели мониторинга подземных вод, представлены в 2D, 3D графическом виде с использованием таблицы и среды FLT пакета Matlab.

SUMMARY

Triangular, trapezoidal methods were used in the work to determine the corresponding functions. Mamdani and Sugino's indeterminate inference algorithm was used for summing up and making decisions. The results of computational experiments performed on the basis of a neurostable groundwater monitoring model are presented in 2D, 3D graphical form using a table and the FLT environment of the Matlab package.

**FOTOELEMENT VOLT-AMPER XARAKTERISTIKALARIGA
ELEKTROMAGNIT TO'LQINNING TA'SIRI**

G.G'ulomov – *fizika-matematika fanlari doktori, professor*

G.N.Majidova – *doktorant*

F.R.Muxitdinova – *doktorant*

Namangan muhandislik-qurilish instituti

S.O. Mamarizayeva – *magistrant*

Namangan davlat universiteti

Tayanch so'zlar: Fermikvazi sath, fotoelektr yurituvchi kuch, o'ta yuqori chastotali maydon, rekombinatsiya, generatsiya.

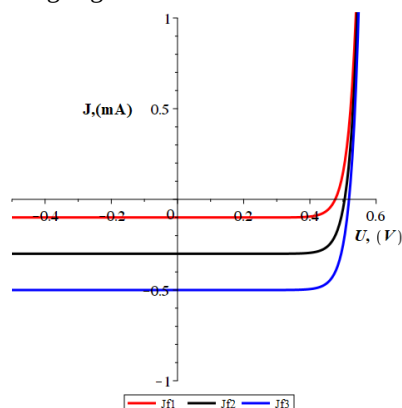
Ключевые слова: уровень квазиФерми, фотоэлектр движущая сила, сверх высокочастотное поле, рекомбинация, генерация.

Key words: quasi-Fermi level, photoelectron motive force, microwave, recombination, generation.

Fotoelementga yorug'lik tushganda aynimagan yarimo'tkazgichda Fermikvazi sathlari elektronlar gazi uchun o'tkazuvchanlik zonasi tomonga, kovaklar gazi uchun valent zonasiga qarab siljiydi [1;2]. Buning sababi generatsiya rekombinatsiyadan ustun kelib asosiy va asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyalari muvozanat paytidagiga nisbatan ortadi. Fotoelementga elektron va kovaklarning Fermi kvazisatxlari fotoelementning turli sohalarida turlicha o'zgarishi hisobiga p-n o'tishda fotoEYuK paydo bo'ladi. Bu foto EYuK yorug'ik energiyasi hisobiga hosil bo'ladi. Bunda dioddan teskari yo'nalishda tok oqadi.

Qizish mavjud emas turli fototoklar uchun $e := 1.6 \cdot 10^{-19}$; $k := 1.38 \cdot 10^{-23}$; $T := 300$; $J_s := 10^{-9}$; $J_{f1} := 0.1$; $J_{f2} := 0.3$; $J_{f3} := 0.5$; $E_g := 1.1$; $\varphi := 0.6$;

$T_e := 300$; $U_1 := 0$ qiymatlarni (3) ifodaga qo'yib quyidagi VAXga ega bo'lamiz.



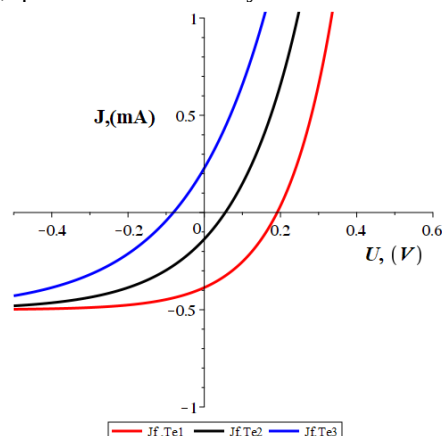
1-rasm. Turli fototoklar ta'sirida VAXni o'zgarishi.

Bir xil fototok ta'sirida turlicha temperaturalarda VAXni $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$; $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$; $T = 300$; $J_s = 10^{-9}$; $J_{f3} = 0.5$; $E_g = 1.1$; $\varphi = 0.6$; $T_{e1} = 1500$; $T_{e2} = 2000$; $T_{e3} = 2500$; qiymatlarni qo'yib olishimiz mumkin.

$J_{f1} = J_{f2} = J_{f3}$ $T_{e1} < T_{e2} < T_{e3}$ foto ta'sir bo'lganda ham qizish hisobiga VAXni siljishlari 1,3,4 kvadrantidan 1,2,4 kvadrantlarga ko'chishi namoyon bo'lar ekan.

O'YuCh to'lqin vositasida elektron kovak gazi qizdirilganda Fermi kvazi sathlari o'zlarining zonalaridan uzoqlashadilar. Buning oqibatida fotoelementning p=n sohasida qizigan elektron va kovaklarning diffuziya toklari kuchaydi. Bu esa o'z navbatida dioddagi rekombinatsiya

toklarini ko'payishiga sabab bo'ladi. Rekombinatsiya toklari dioddan to'g'ri yo'nalishdagi toklarni hosil qiladi [3,4]. Generatsiya kuchli bo'lib, qizish kuchsiz bo'lganda dioddan teskari yo'nalishda fototok oqadi. Bu fototok qizish bo'lmagandagi fototokdan kichik bo'ladi. Boshqacha qilib aytganda, qizish fototokni kamaytiradi.



2-rasm. Bir xil fototok ta'sirida turlicha temperaturalarda VAXni o'zgarishi.

Elektronlarning qizishi kuchli bo'lganda rekombinatsiya toklari generatsiya toklaridan katta bo'lib ketadi. Bunda diod energiyani asosan mikroto'lqindan oladi. Bunda rekombinatsiya toklari p-n o'tish sohasida (hajmiy zaryad sohasida) diodning n- va p- sohalariga p-n o'tishning qarama-qarshi tomonidan injeksiya hisobiga sodir bo'ladi. Qizdirish hisobiga rekombinatsiya toklarini oshishi asosiy zaryad tashuvchilarning qizishi va ularni qarama-qarshi sohadagi injeksiyasi hisobiga asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi oshib boradi. Rekombinatsiya toklarining oshishi p-n o'tishdagi diffuziya toklarining o'sishi bilan bog'liqdir. Elektronlar injeksiyasi electron xarorati va p-n o'tish potensial to'sig'ining balandligini o'zgartirish orqali amalga oshiriladi [5;6].

Kuchli O'YuCh to'lqin ta'sirida fotoelementning elektron va fononlari qattiq qiziya. O'YuCh to'lqin ta'sirida elektron va kovaklar qiziganda ular p-n o'tish hajmiy zaryad sohasida yoki p-n o'tishdan o'tib kvazineytral sohada rekombinatsiyalanadi [7;8]. Dioddan o'tuvchi tok maydon toki va diffuziya toklarining yig'indisidan iborat

Diodda to'g'ri kuchlanish berilganda elektrokimyoviy potensial o'zgarishi natijasida diffuziya toklari ko'payib, maydon toklari kamayadi. P-n o'tishdan o'tayotgan tok tashqi kuchlanish orqali boshqarilganda qo'yilgan

kuchlanish asosan p-n o'tishning hajmiy zaryad sohasiga tushadi. Tashqi kuchlanish p-n o'tish potensial to'sig'i balandligini kamaytirganda p-n otishdagi maydon toki kamayadi. To'la tok maydon va diffuziya toklarining yig'indisi bo'lganligi sababli quyidagicha bo'ladi:

$$J_n = e\mu_n n E + eD_n \frac{dn}{dx} = -e\mu_n n \nabla \varphi + eD_n \nabla n$$

Bu ifodada birinchi had elektr maydon toki, ikkinchi had esa diffuziya tokidir. Xuddi shunday ifoda kovaklar toki uchun ham o'rinli bo'ladi. Termodinamik muvozanat paytida to'la tok maydon bilan diffuziya toklari yig'indisiga teng:

$$e\mu_n n_0 \nabla \varphi_0 + eD_n \nabla n_0 = 0$$

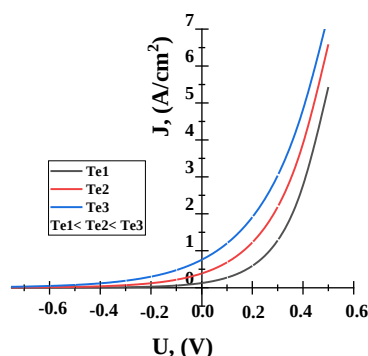
p-n o'tishga tashqi kuchlanish berilganda $\nabla \varphi$ o'zgaradi. To'g'ri yo'nalishdagi kuchlanish $\nabla \varphi$ ni kamaytiradi va diffuziya toki maydon tokidan ustunlik qiladi. Diffuziya tokini kompensatsiya qilib turgan maydon toki kamayadi va to'g'ri yo'nalishda tok og'a boshlaydi. Agrda diffuziya tokini o'zgarimas deb olib, tashqi (elektr maydoni) faqat potensial to'siq balandligi va kengligini o'zgartiradi deb faraz qilsak:

$$e\mu_n n_0 \nabla E_0 + eD_n \nabla n_0 = 0$$

Shartdan $eD_n \nabla n_0 = -e\mu_n n_0 E_0$ ekanini hisobga olib, p-n o'tishdagi elektron toki zichligi uchun quyidagi ifodaga ega bo'lamiz.

$$j_x = e\mu_n (E(x) - E_0(x)) = e\mu_n (E(x) - E_0(x))$$

Tashqi maydon o'zgarganda $E(x)$ o'zgaradi va p-n o'tishning har bir nuqtasida tok zichligi o'zgaradi. Tashqi ta'sir yordamida $E(x)=0$ qilinsa p-n o'tishdagi tok to'la diffuziya tokiga aylanadi. (diod to'la ochiq holatga o'tadi) Demak tashqi kuchlanish birinchi navbatda maydon tokini o'zgartirar ekan. Diod nazariyasi va diffuziya nazariyasi bo'yicha elektronlar qiziganda va panjara qiziganda diodning VAXni olish mumkin.



3-rasm Elektronlar qiziganda diodning VAXni o'zgarishi.

Kuchli elektromagnit maydonda erkin zaryad tashuvchilarning o'rtacha kinetik energiyalari oshib ketadi. Termodinamik muvozanat buziladi. Elektron va kovaklarning kristall panjara nuqsonlari va fononlar bilan ta'sirlashuvi kvazielastik bo'lganda erkin zaryad tashuvchilarning taqsimot funksiyasini elektron harorati bolsman taqsimot funksiyasi orqali ifodalash mumkin. Bunday sharoitda elektron va kovaklar uchun Fermi kvazi sathlarini kiritish mumkin. Dioddagi toklar va EYKlar elektron va kovak gazining haroratiga bog'liq bo'ladi.

Tashqi ta'sir natijasida elektron gazida p-n o'tishdagi elektronlar toki nolga teng bo'ladi. Termodinamik muvozanat buzilib, $\nabla \mu = \nabla(\mu_0 + e\varphi)$ Elektrokimyoviy potensialning gradiyenti noldan farqli boladi. Agar μ_0 koordinataga bog'liq bo'lsa, elektron va kovaklarning konsentratsiyalari ham koordinataga bog'liq bo'ladi. Zaryad

tashuvchilar harorati butun namuna bo'ylab o'zgarganda haroratning har qanday o'zgarishi elektron va kovaklarning kimyoviy potensiallarini turlicha ajralishiga sabab bo'ladi. Buning hisobiga zaryad tashuvchilar konsentratsiyalari turlicha bo'lgan nuqtalar orasida kvazipotensiallar farqi vujudga keladi. Bu esa diodni EYuK manbaiga aylantiradi.

Dioddagi zaryad tashuvchilar qiziganda φ o'zgarmaydi, μ esa o'zgaradi. Ana shu sabab, tok tashuvchilarning namuna bo'ylab bir jinsli qizishi ham tokni yuzaga keltiraveradi. Zaryad tashuvchilar qizishi bilan bog'liq tok rekombinatsiya jarayonini tezlashtiradi. P-n o'tishdagi zaryad tashuvchilarning qizishi diodda rekombinatsiya toklarini ko'paytiradi.

Qizish diffuziya tokini oshiradi. Diffuziya tokidagi elektronlar

$$-eD_n \frac{dn}{dx} = -eD \nabla n$$

Konsentratsiya gradienti o'zgarmagan taqdirda

$$D_n = \frac{kT_e}{e} \mu_n$$

Elektronlar haroratining ko'tarilishi diffuziya koeffitsientini oshishiga sabab bo'ladi. Bu esa qizigan zaryad tashuvchilar konsentratsiya gradient hisobiga EYuK hosil qiladi. Qizish va yoritish bo'lmaganda EYuK hosil bo'lmaydi. EYuK xosil bo'lishi uchun namunaga kuchlanish berilmagan holda elektron va kovaklar gazini muvozanatdan chiqarish kerak. O'YuCh maydon va yorug'lik ta'sirida p-n o'tishdagi elektron kovak gazi muvozanatdan chiqadi.

Elektron va kovaklarning haroratlari kristall panjara haroratidan farq qilsa namunada termodinamik muvozanat buziladi va natijada EYuK va toklar paydo bo'ladi. Dioddagi rekombinatsiya va generatsiya toklarini vujudga kelishiga ayni ana shu muvozanatning buzilishi sabab bo'ladi.

O'YuCh maydon ta'sirida p-n o'tishli diodda rekombinatsiya toklarining oshishiga potensial to'siqdan elektronlarni p-soxaga, kovaklarni n-soxaga injeksiyasidir. Injeksiya natijasida elektron va kovakning konsentratsiyalari muvozanat holatidagi qiymatidan katta bo'ladi. Buning natijasida rekombinatsiya toklari generatsiya toklaridan katta bo'ladi va dioddan to'g'ri tok oqadi.

O'YuCh to'lqin rekombinatsiya toklarini diomo oshiradi. O'YuCh to'lqin past chastotali fotonlar oqimi deb qaralgan taqdirda ham fotonlar gazi o'z energiyasini erkin zaryad tashuvchilarga berish va elektron gazining o'rtacha tartibsiz kinetik energiyasini oshirishi mumkin. Agar elektronlarning bir-birlari bilan o'zaro to'qnashuvlari ularning panjara defektlari va fononlar bilan to'qnashuvidan kuchliroq bo'lsa elektron gazining taqsimot funksiyasi T_e haroratli Bolsman taqsimot funksiyasi bo'ladi. Bunda O'YuCh to'lqin ta'siridagi elektron o'tishlar zonalar ichidagi o'tishlar bo'ladi. Taqsimot funksiyasining muvozanatli holatdan muvozanatsiz holatga o'tishi natijasida diodda toklar va EYuKlar yuzaga keladi [9,10].

Xulosa. O'YCH maydon ta'sirida O'YCH tokni p-n o'tishdagi to'g'rilanishi ham o'z navbatida elektron va kovaklarning o'z zonalaridagi energetik jihatdan va fazoda qayta taqsimlanishi hisobiga sodir bo'ladi. O'YCH maydon ta'sirida p-n potensial to'siq balandligini davriy ravishda o'zgarib turishi zaryad tashuvchilarning konsentratsiyalarini ham davriy ravishda o'zgarishga olib keladi. P-n o'tish potensial to'siq balandligi tashqi kuchlanishga bog'liq ravishda o'zgarishi p-n o'tishdagi asosiy va asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyalarini davriy ravishda qayta taqsimlanishiga sabab bo'ladi. Bu qayta taqsimlanish natijasida rekombinatsiya toklari ortadi. Bu O'YCH tokning p-n o'tishli dioddagi to'g'rilanishidir.

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., Shakhobiddinov B.B., Muxitdinova F.R. "Kremniy yarimo'tkazgichli p-n o'tishli diodlarning Fermi kvazisatxi va volt-amper xarakteristikasining vorug'lik va deformatsiya ta'sirida o'zgarishi". NamDU ilmiv 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 юқори ток қийматини кучли гетероўтишлар ёки кучли легирланган яримўтказгичлар асосида ҳосил қилинганлигини кўришимиз мумкин [1,2]. Туннель диодларида энг юқори 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 оралиғида 3минут вақт ичида туннель диоднинг энг юқори нуктадаги ток зичлиги $J = 2.6 \frac{kA}{cm^2}$ га, шунингдек энг қуйи ва юқори нуктадаги туннель тоқининг зичликлари нисбати 1.7 қийматга тенглиги [3] ишда аниқланган. Si/SiGe элементи асосида тайёрланган туннель диодида эса энг юқори нуктадаги ток зичлиги $J = 151 \frac{kA}{cm^2}$ га, энг қуйи ва юқори нуктадаги туннель тоқининг зичликлари нисбати 2 қийматга тенглиги [4] ишда кўрсатиб ўтилган. GaN/AlN асосидаги резонанс туннель диодида эса энг юқори нуктадаги ток зичлиги $J = 431 \frac{kA}{cm^2}$ га, энг қуйи ва юқори нуктадаги туннель тоқининг зичликлари нисбати 1.2-1.6 оралиқда бўлгани кўрилган [5].

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

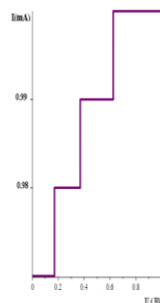
$$I_{CH} = D * P = \int \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT}\right) + 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}\right) + 1} (1 - \exp\left(-\frac{E_1}{E_g - qV + \mu_n + \mu_p}\right)) (1 - \exp\left(-\frac{E_2}{E_g - qV + \mu_n + \mu_p}\right)) dE * \exp\left(-\frac{\theta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

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 тоқининг энг қуйи нуктасидаги қиймати V_V – туннель тоқининг энг қуйи нуктасидаги қийматига тўғри келувчи кучланиш 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 хона ҳароратида германий асосли туннель диодида электр майдон $E_1 = 4 * 10^4 \left(\frac{V}{m}\right)$