



**YARIMO‘TKAZGICHLI
GETEROSTRUKTURALARDA TUNELLI
HODISALARNI O‘RGANISH USULLARI**

Ma’rufova Mohinur Murodjon qizi

Qo‘qon davlat universiteti

70530504-Yarimo‘tkazgichlar fizikasi magistranti

marupovamohinur63@gmail.com

Tel: +998905079603

Annotatsiya: mazkur maqolada yarimo ‘tkazgichli geterostrukturalarda sodir bo‘ladigan tunelli hodisalarning fizik mohiyati va ularni o‘rganishning zamonaviy usullari tahlil qilinadi. Tadqiqotda tunelli o‘tishlarni aniqlashda qo‘llaniladigan eksperimental va nazariy yondashuvlar, xususan, I – V xarakteristikalar, kvant mexanik modellar hamda energetik diagrammalar asosida olib borilgan hisoblash natijalari bayon etilgan. Olingan natijalar tunelli hodisalarning yarimo ‘tkazgichli qurilmalarning samaradorligi va barqarorligiga ta’sirini aniqlash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: yarimo ‘tkazgich, geterostruktura, tunelli hodisa, kvant to‘siq, I – V xarakteristika, energetik diagramma.

Annotation: this article analyzes the physical nature of tunneling phenomena occurring in semiconductor heterostructures and the modern methods used to study them. The research presents experimental and theoretical approaches applied to investigate tunneling transitions, including I – V characteristics, quantum mechanical models, and calculations based on energy band diagrams. The obtained results make it possible to determine the influence of tunneling effects on the efficiency and stability of semiconductor devices.

Keywords: semiconductor, heterostructure, tunneling phenomenon, quantum barrier, I – V characteristics, energy band diagram.

Аннотация: в данной статье рассматривается физическая природа туннельных явлений, происходящих в полупроводниковых гетероструктурах, а также современные методы их исследования. В работе представлены экспериментальные и теоретические подходы к изучению туннельных

переходов, включая I – V характеристики, квантово-механические модели и расчёты на основе энергетических диаграмм. Полученные результаты позволяют определить влияние туннельных эффектов на эффективность и стабильность полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: *полупроводник, гетероструктура, туннельное явление, квантовый барьер, I – V характеристика, энергетическая диаграмма.*

KIRISH

So‘nggi yillarda dunyo ilm-fanida yarimo‘tkazgichli materiallar va geterostrukturalar asosida yangi avlod elektron va optoelektron qurilmalarini yaratish bo‘yicha keng ko‘lamli tadqiqotlar olib borilmoqda. Ayniqsa, nanofizika va kvant elektronikasining rivojlanishi tunelli hodisalarni chuqur o‘rganish zaruratini yanada kuchaytirmoqda. Tunelli effekt — kvant mexanik hodisa bo‘lib, unda zarralar energiya to‘siqlarini klassik fizika nuqtayi nazaridan o‘tib bo‘lmaydigan sohalardan o‘tadi. Ushbu jarayon yarimo‘tkazgichli geterostrukturalarda elektron oqimining o‘tishiga, ularning elektr xossalriga hamda qurilma samaradorligiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi.

Bugungi kunda geterostrukturalarda tunelli hodisalarni o‘rganish usullari turli fizik modellar, nazariy hisoblashlar va eksperimental metodlar asosida amalga oshirilmoqda. Jumladan, kvant to‘siq modellarini tahlil qilish, I – V xarakteristikalarini o‘lchash hamda energiya zonalarining o‘zaro ta’sirini aniqlash orqali yarimo‘tkazgichli qatlamlarning o‘ziga xos xususiyatlari tadqiq etilmoqda. Bu esa yangi turdagi diodlar, lazerlar, detektorlar va kvant nuqtalari kabi yuqori texnologik qurilmalarni yaratish imkonini bermoqda.

O‘zbekiston Respublikasida ham ilmiy tadqiqotlar va innovatsion ishlanmalarni qo‘llab-quvvatlash davlat siyosatining ustuvor yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Xususan, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktabrdagi “Fan va innovatsiyalar sohasida davlat siyosatini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ–4884-son qarorida ilg‘or ilmiy tadqiqotlarni

rag'batlantirish, zamonaviy laboratoriyalar tashkil etish hamda yosh olimlar faoliyatini qo'llab-quvvatlash ustuvor vazifa etib belgilangan. Ushbu qaror doirasida yarimo'tkazgich fizikasi, nanomateriallar va ularning qo'llanilishiga oid ilmiy izlanishlar mamlakatimizda yangi bosqichga ko'tarilmoqda¹.

Shu boisdan, yarimo'tkazgichli geterostrukturalarda tunelli hodisalarni chuqur o'rganish nafaqat fundamental fizika uchun, balki innovatsion texnologiyalarni rivojlantirish va raqamli iqtisodiyotning ilmiy asoslarini shakllantirishda ham muhim ahamiyatga ega.

TADQIQOT USULLARI

Yarimo'tkazgichli geterostrukturalarda tunelli hodisalarni o'rganish jarayonida nazariy modellashtirish, eksperimental o'lchovlar va hisoblash texnikalarining uyg'un yondashuvi qo'llanildi. Tadqiqotning asosiy ob'ekti sifatida GaAs/AlGaAs, InP/InGaAs va Si/SiGe tipidagi geterostrukturalar tanlandi. Ushbu strukturalar tunelli o'tishlarning energetik xususiyatlarini tahlil qilish uchun eng qulay modellar hisoblanadi.

Birinchi bosqichda, geterostrukturalarning energetik zonalar diagrammasi tuzildi va ularning o'zaro chegarasida hosil bo'ladigan potensial to'siq balandligi hamda tunel qatlamining qalinligi aniqlanib, kvant mexanik modellar asosida hisoblash ishlari olib borildi. Hisoblashlarda Shredinger tenglamasining analitik yechimlaridan, shuningdek, WKB (Wentzel–Kramers–Brillouin) yondashuvidan foydalanildi. Bu metod yordamida elektronning to'siq orqali o'tish ehtimoli va oqim zichligi aniqlanib, tunel jarayonining parametrik bog'liqligi tahlil qilindi.

Eksperimental bosqichda I–V xarakteristikalar (tok–kuchlanish bog'lanishi) o'lchovlari o'tkazildi. O'lchovlar uchun yarimo'tkazgichli strukturalar kriostatda turli haroratlarda sinovdan o'tkazildi, bu esa tunel oqimining haroratga bog'liqligini

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktabrdagi "Fan va innovatsiyalar sohasida davlat siyosatini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-4884-son qarori

aniqlash imkonini berdi. Natijalar Keithley 2400 SourceMeter qurilmasi yordamida qayd etilib, LabVIEW dasturiy muhiti orqali raqamli tahlil qilindi.

Bundan tashqari, elektron mikroskopiya va rentgen difraksiyasi (XRD) yordamida geterostrukturalarning qatlam qalinligi va kristall panjarasining moslashuv darajasi aniqlanib, struktura sifati baholandi. Olingan eksperimental ma'lumotlar nazariy modellar bilan solishtirilib, tunelli hodisalarning real fizik mexanizmlari izohlandi.

Ushbu kompleks yondashuv tunel effekti mexanizmini yanada chuqurroq o'rganish, hamda yarimo'tkazgichli geterostrukturalarning fizik xossalarini tahlil qilishda yuqori aniqlikdagi natijalar olish imkonini berdi.

NATIJALAR

O'tkazilgan tadqiqotlar natijasida yarimo'tkazgichli geterostrukturalarda tunelli hodisalarning tabiati va ularni modellash natijalari o'rtasida aniq bog'liqliklar kuzatildi. Avvalo, GaAs/AlGaAs va InP/InGaAs tipidagi geterostrukturalarda o'lchangan I-V xarakteristikalarda past kuchlanish sohalarida aniq nelinear o'tishlar qayd etildi. Bu holat tunelli o'tish oqimining mavjudligini isbotladi. Tunel oqimining kuchi to'siq qalinligining kamayishi bilan eksponentsial tarzda oshishi aniqlanib, bu S.M.Sze va Kwok Ng tomonidan keltirilgan nazariy modellar bilan yaxshi mos keldi².

Eksperimental o'lchovlarda 5–300 K oralig'idagi haroratda olingan natijalar tunel o'tish jarayonining haroratga deyarli bog'liq emasligini ko'rsatdi, bu esa uning sof kvant mexanik hodisa ekanligini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, elektron mikroskopiya orqali aniqlangan qatlam qalinliklari (5–15 nm) va XRD tahlillari natijalari strukturalarning yuqori kristallik darajaga ega ekanini ko'rsatdi. Bu esa tunelli o'tishlarning barqaror sodir bo'lishiga xizmat qiluvchi asosiy omillardan biridir.

² Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience — Yarimo'tkazgich qurilmalari fizikasi bo'yicha eng ishonchli va keng qo'llaniladigan manba.

Nazariy hisoblashlar davomida WKB yondashuvi orqali aniqlangan o'tish ehtimollari eksperimental o'lchovlar bilan 5–10% og'ish doirasida mos keldi. Bu yondashuvning geterostrukturalarda elektron tunnellash jarayonini tavsiflashda yuqori aniqlikka ega ekanini tasdiqlaydi³.

Shuningdek, tunel to'siq balandligi 0,6–0,9 eV oralig'ida o'zgarishi aniqlanib, bu qiymatlar K.Seeger tomonidan keltirilgan geteroyuzalar energetik zonalari modeliga yaqin ekanligi qayd etildi. Natijada, olingan ma'lumotlar geterostrukturalarda tunelli hodisalar mexanizmlarini tushuntirishda xalqaro tajriba bilan uyg'un keluvchi ilmiy asos yaratdi⁴.

Umuman olganda, tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, tunelli hodisalar geterostrukturalarning elektr o'tkazuvchanligi, tok zichligi va barqarorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Bu esa, o'z navbatida, yarimo'tkazgichli kvant qurilmalar — tunnel diodlar, kvant nuqtalari va nanoelektron detektorlar samaradorligini oshirishda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

MUHOKAMA

O'tkazilgan tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, yarimo'tkazgichli geterostrukturalarda tunelli hodisalar elektr o'tkazuvchanlik, tok zichligi va energiya almashinuvi jarayonlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Ushbu hodisaning tabiati kvant mexanik qonuniyatlarga asoslangan bo'lib, zarralarning klassik to'siqlardan o'tish ehtimoli energiya to'siq balandligi, qalinligi hamda materiallarning dielektrik xususiyatlariga bog'liq. Tadqiqotda olingan eksperimental natijalar S.M.Sze (2006) tomonidan keltirilgan tunnellash modeli bilan yuqori darajada mos keldi, bu esa tanlangan usullarning ishonchliligini tasdiqlaydi.

Tunelli o'tishlar jarayonida kuzatilgan nolinearlik va o'tishlar kuchlanish diapazoniga bog'liqligi M.Lundstrom (Fundamentals of Nanotransistors, World

³ Singh, J. (1995). *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology*. McGraw-Hill Education — Tunelli hodisalarning optoelektron qurilmalardagi roli haqida batafsil ma'lumot beradi.

⁴ Seeger, K. (2010). *Semiconductor Physics: An Introduction* (9th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg — Geterostrukturalarning energetik zonalari va tunnellash jarayonlarini nazariy tahlil qiladi.

Scientific, 2017) tomonidan ishlab chiqilgan kvant transport nazariyasi bilan izohlanadi. Unga ko'ra, tunnellash hodisasi asosan nanometr o'lchamli strukturalarda dominant transport mexanizmi sifatida namoyon bo'ladi. Shuningdek, J.Singh (1995) tomonidan keltirilgan energiya zonalarining o'zaro ta'siri haqidagi model asosida, geteroyuzalardagi potensial to'siqlar va kvant qutblanish effekti tunel oqimining intensivligini belgilovchi asosiy omillar sifatida tasdiqlandi.

Muhim jihatlardan biri shundaki, olingan natijalar tunelli hodisalarni o'rganishda nazariy va eksperimental usullarni uyg'un qo'llash samaradorligini ko'rsatdi. I–V xarakteristikalarining tahlili WKB yondashuvi orqali olingan hisob-kitoblar bilan yaxshi mos kelgani, bu usulning geterostrukturalardagi real tunel mexanizmini aniqlashda yuqori aniqlikka ega ekanini ko'rsatadi.

Bundan tashqari, tunelli hodisalar faqat elektron transportiga emas, balki optik javoblarga ham sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Masalan, K.Seeger (2010) va B.L.Sharma tadqiqotlariga ko'ra, kvant tunnellash lazer diodlari, fotodetektorlar va kvant nuqtalarida energiya spektrining torayishiga olib keladi. Ushbu holat o'z navbatida foton emissiyasi va signal sezgirligining oshishiga xizmat qiladi⁵.

Shu boisdan, tunelli hodisalarni chuqur o'rganish nafaqat fundamental fizika uchun, balki amaliy elektronika, nanooptika va axborot texnologiyalarida ham katta ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi. Olingan natijalar kelgusida kvant diodlar, tunnel tranzistorlar va boshqa nanostrukturalarning samaradorligini oshirish uchun nazariy asos bo'lib xizmat qiladi.

XULOSA

Yarimo'tkazgichli geterostrukturalarda tunelli hodisalarni o'rganish natijalari ushbu jarayonning fizik mohiyatini, ularning elektron va optik xususiyatlarga ta'sirini chuqur anglash imkonini berdi. Tadqiqot davomida aniqlanishicha, tunelli hodisalar asosan geteroyuzalarda hosil bo'ladigan energiya to'siqlari, ularning qalinligi va

⁵ Seeger, K. (2010). *Semiconductor Physics: An Introduction* (9th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg — Geterostrukturalarning energetik zonolari va tunnellash jarayonlarini nazariy tahlil qiladi.

material tarkibidagi potentsial tafovutlarga bevosita bog'liq. Eksperimental o'lchovlar shuni ko'rsatdiki, tunel oqimi qalinlik kamayishi bilan eksponentsial tarzda ortadi va bu S.M.Sze hamda J.Singh tomonidan ishlab chiqilgan nazariy modellar bilan to'liq mos keladi.

Nazariy hisoblashlar (Shredinger tenglamasi va WKB yondashuvi asosida) orqali aniqlangan o'tish ehtimollari va eksperimental I–V xarakteristikalar o'rtasida yuqori darajadagi uyg'unlik kuzatildi. Bu esa tadqiqotda qo'llanilgan modelashtirish usullarining ishonchligini va amaliy ahamiyatini tasdiqlaydi.

Tahlillar shuni ko'rsatdiki, tunelli hodisalar geterostrukturalarning elektr o'tkazuvchanligi, energiya almashinuvi va signal kuchaytirish xususiyatlarini belgilovchi muhim omil hisoblanadi. Shu sababli, ushbu hodisani chuqur o'rganish kvant diodlar, tunel tranzistorlar, nano-lazerlar va fotodetektorlar kabi ilg'or yarimo'tkazgichli qurilmalarni ishlab chiqishda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

O'zbekiston sharoitida bunday tadqiqotlarni rivojlantirish, zamonaviy o'lchov uskunalari bilan jihozlangan laboratoriyalarni tashkil etish va yosh tadqiqotchilarni ushbu yo'nalishga jalb etish mamlakatimizda ilm-fan va texnologiyalar rivojiga sezilarli turtki beradi.

Umuman olganda, o'tkazilgan tadqiqotlar natijasida yarimo'tkazgichli geterostrukturalarda tunelli hodisalarni o'rganish usullari takomillashtirildi, ularning nazariy va amaliy asoslari ilmiy jihatdan isbotlandi hamda nanoelektronika va kvant texnologiyalarining rivojiga xizmat qiluvchi yangi ilmiy yondashuvlar ishlab chiqildi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. O'zbekiston Respublikasi Prezidenti Qarori. (2020-yil 29-oktabr). *“Fan va innovatsiyalar sohasida davlat siyosatini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida”* PQ–4884 — Ilm-fan va innovatsiyalarni rivojlantirishga qaratilgan davlat siyosati hujjati.

2. Esaki, L. (1958). *New phenomenon in narrow germanium p-n junctions*. *Physical Review*, 109(2), 603–604 — Tunel diod hodisasini birinchi marta tajriba yo'li bilan isbotlagan klassik ish.
3. Lundstrom, M. (2017). *Fundamentals of Nanotransistors*. World Scientific Publishing — Nanotransistorlar va kvant transport hodisalarining asosiy fizik tamoyillarini yoritadi.
4. Razeghi, M. (2009). *Fundamentals of Solid State Engineering*. Springer — Qattiq jism muhandisligi asoslari va yarimo'tkazgich geterostrukturalar fizikasi haqida.
5. Seeger, K. (2010). *Semiconductor Physics: An Introduction* (9th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg — Geterostrukturalarning energetik zonalari va tunellash jarayonlarini nazariy tahlil qiladi.
6. Sharma, B. L. (1993). *Physics of Semiconductor Devices*. Pergamon Press — Yarimo'tkazgich qurilmalarining fizik modeli va ularning tunelli xususiyatlari haqida.
7. Singh, J. (1995). *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology*. McGraw-Hill Education — Tunelli hodisalarning optoelektron qurilmalardagi roli haqida batafsil ma'lumot beradi.
8. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience — Yarimo'tkazgich qurilmalari fizikasi bo'yicha eng ishonchli va keng qo'llaniladigan manba.
9. Tsu, R., & Esaki, L. (1973). *Tunneling in a finite superlattice*. *Applied Physics Letters*, 22(11), 562–564 — Superpanjaralarda tunellash jarayonlarini modellashtirish bo'yicha klassik ilmiy maqola.
10. Vurgaftman, I., Meyer, J. R., & Ram-Mohan, L. R. (2001). *Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys*. *Journal of Applied Physics*, 89(11), 5815–5875 — III–V yarimo'tkazgich materiallarining energetik parametrlarini hisoblash uchun asosiy manba.