

QUANTUM TUNNELLING EFFECT IN TEACHING THE FUNDAMENTALS OF  
NANOPHYSICS IN HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

Savurova Shahrizoda Abdumalik qizi

PhD student at the Center for the Development of Nanotechnology at the

National University of Uzbekistan

[ORCID:0000-0002-1245-6908](https://orcid.org/0000-0002-1245-6908)E-mail [savurovashahrizoda95@gmail.com](mailto:savurovashahrizoda95@gmail.com)**Annotation**

This article examines the specific aspects of the quantum tunneling effect in teaching the basics of nanophysics in higher education institutions.

**Key words**

Surface plasmons, electric charge, refractive index, metal film, electron plasma, quasiparticle, wave vector, intensity, refractometer.

**Annotatsiya**

Ushbu maqolada Oliy ta'lim muassasalarida Nanofizika asoslari fanini o'qitishda kvant tunnellanish effekti o'ziga xos jihatlari ko'rib chiqilgan.

**Kalit so'zlar**

Sirt plazmonlari, elektr zaryadi, sindirish ko'rsatkichi, metall plyonka, elektron plazma, kvazizarra, to'lqin vektori, intensivlik, refraktometr.

**Kirish.**

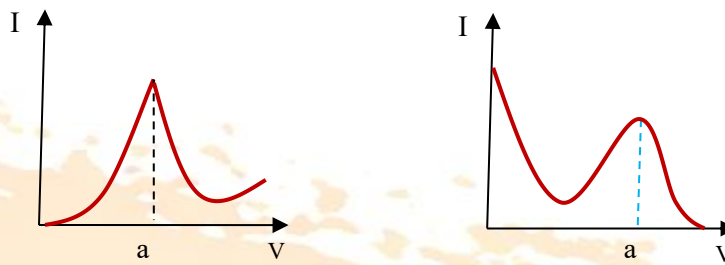
Past o'lchamli strukturada elektronlarning tunnel orqali o'tishi nafaqat uning tarkibiy potensial to'siqlarining xususiyatlari bilan, balki strukturaning o'zida elektronlar uchun ruxsat etilgan energiya holatlari bilan ham belgilanadi. Ikki potensial to'siq bilan chegaralangan past o'lchamli strukturada, elektron ko'chishi diskret darajaga mos kelganda, u orqali o'tadigan tunnel oqimining keskin o'zgarishi (o'sishi) kuzatiladi. Ushbu hodisa rezonansli tunnel deb ataladi. Bu oqim kuchlanish xarakteristikasi bo'yicha manfiy differensial qarshilikka ega bo'lgan holatning paydo bo'lishiga olib keladi. Ushbu ta'sirni kuzatish uchun kvant quduqlari tuzilmalari qo'llaniladi. Kvant quduqdagi energiya darajasini kvantlash quyidagi formula orqali ifodalanadi

$$E_1 = \frac{p^2 \hbar^2}{2m_e a^2}.$$

Tashqi kuchlanish bo'limasi, energiya darajasi (sathi) to'siqlar bilan ajratilgan elektrolarda Fermi darajasidan yuqorida joylashgan bo'ladi. Elektronlar yuboriladigan elektrod emitter, yig'uvchi elektrod esa kollektor deb ataladi. Strukturaga kichik tashqi kuchlanish qo'llanilganda, asosiy kuchlanish pasayishi to'siq yaqinida sodir bo'ladi, chunki ularning elektr qarshiligi quduqning qarshiligidan ancha katta bo'ladi. Kuchlanishning kuchayishi bilan quduqdagi sath energiyasi pasayib, emitter to'sig'i orqali tunnel oqimi paydo bo'ladi. Tunnel oqimining kattaligi emitterdagi Fermi darajasi va quduqdagi energiya  $E_1$  darajasi bir biriga mos kelgandagina maksimal qiymatga ega bo'ladi. Bunday holda, elektronlar o'zlarining energiyasi va impulsini saqlagan holda kollektor orqali o'ta boshlaydilar, ya'ni rezonansli tunnel effekti sodir bo'ladi. Rezonansli tunnelling hodisasi chastotasi ( $10^{12}$  Gs) gacha bo'lgan diapazonda ishlaydigan diodlar va tranzistorlarni yaratishga imkon beradi.

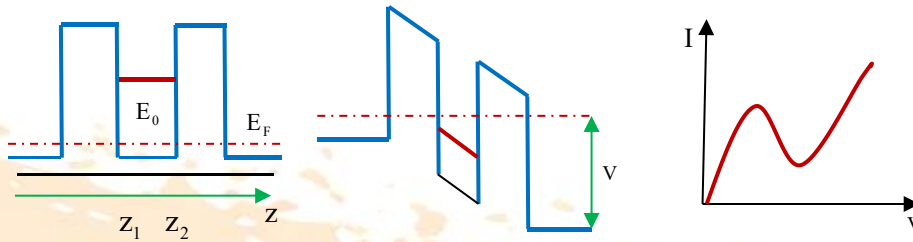
#### Rezonansli tunnelli diodlar

Umuman olganda, rezonansli tunnel diodi ketma-ket joylashtirilgan, potensial to'siqlar bilan ajratilgan, ikkita qarama-qarshi elektr kontaktlari bo'lgan kvant quduqlaridan iborat davriy tuzilmadir. Rezonansli tunnel diodi orqali o'tadigan elektr oqimi kuchlanish potensialining kattaligiga bog'liq. Agar qo'llaniladigan kuchlanish kichik bo'lsa va potensial to'siqdan o'tadigan elektronlarning energiyasi diskret darajadagi energiyadan kam bo'lsa, u holda to'siqning tiniqligi oshadi va o'tuvchi elektron oqimining qiymati o'zgaradi. Bunday kuchlanishlarda elektronlarning energiyasi diskret darajadagi Fermi energiyasiga teng bo'ladi va oqim o'zining maksimal qiymatiga erishadi. Yuqori kuchlanishlarda elektronlarning energiyasi diskret darajadagi energiyadan kattaroq bo'ladi va elektronlar uchun to'siqning tiniqligi pasayadi. Shu bilan birga, elektronlarning oqimi ham kamayadi. Rezonansli tunnel diodining oqim kuchlanishining xarakteristikasi 1-rasmda ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, oqim kuchlanishining xarakteristikasi maksimal hamda manfiy differensial qarshilikka ega bo'lgan alohida qismlarga ega.



**1-rasm. Rezonansli tunnel diodining belgisi (a), uning ekvivalent sxemasi (b), volt-ampere va sig‘im-kuchlanish**

Kvant mexanikasi potensial to‘siqlarga to‘g‘ri keladigan zarrachalarning mutlaqo kutilmagan xatti-harakatlarini bashorat qiladi. Agar zarraning umumiy energiyasi to‘siq mintaqasidagi potensial energiyadan kam bo‘lsa, u holda bu zarracha aks etadi va keyin teskari yo‘nalishda harakat qiladi. Agar umumiy energiya potensialdan oshib ketgan bo‘lsa, u to‘siqni yengib o‘tadi. Kvant zarrasi o‘zini boshqacha to‘lqin kabi tutadi va to‘siqni yengib o‘tadi. Zarraning umumiy energiyasi to‘siq potensial energiyasidan kam bo‘lsa ham, to‘siqni yengib o‘tish mumkin. U rezonansli tunnel diodida qo‘llaniladi. Ushbu qurilmaning energiya diagrammasi 2 rasmda ko‘rsatilgan. U past potensial energiya mintaqasi bilan ajratilgan ikkita to‘siqdan iborat. To‘siqlar orasidagi maydon potensial quduqqa o‘xshaydi, unda bir yoki bir nechta diskret darajalar mavjud. To‘siqlarning xarakterli kengligi va ular orasidagi masofa bir necha nanometr ga teng. Qo‘sh to‘siqning chap va o‘ng tomonidagi hududlar kontaktlar qo‘shni bo‘lgan o‘tkazuvchan elektronlar rezervuarlari rolini o‘ynaydi. Bu yerda elektronlar ancha tor energiya diapazonini egallaydi. Qurilma qo‘shaloq to‘siqning quyidagi xususiyatidan foydalanadi: uning tunnel tiniqligi va rezonanslik xarakterga ega ekanligi. Ma‘lum bo‘lishicha, to‘siqlarga tushgan elektronlarning energiyasi diskret sathning energiyasiga teng bo‘lsa, tunnel tiniqligi keskin ortadi. Rezonansli tunnellanish mexanizmi quyidagicha: to‘siqlar orasidagi hududga kirib borgan elektron chap va o‘ng to‘siqlardan ko‘p marta aks etishi natijasida u yerda uzoq vaqt saqlanib qoladi, tunnel qilish ehtimoli sezilarli darajada oshadi. Shu bilan birga, aytishimiz mumkinki, rezonans paytida to‘lqinlarning ichki mintaqadagi aralashuvi tufayli qo‘sh to‘siqdan aks ettirilgan to‘lqin susayadi. Shuning uchun, chap tomondagi to‘lqin hodisasi butunlay o‘ngga o‘tadi. E‘tibor bering, bizning qurilmamizdagi potensial asosan qo‘shaloq to‘siq hududida pasayadi, chunki uning chap va o‘ng tomonidagi hududlar yuqori o‘tkazuvchanlikka ega. Agar qo‘llaniladigan kuchlanish kichik bo‘lsa va chapdan to‘siqqa tushadigan elektronlarning energiyasi diskret sathning energiyasidan kam bo‘lsa, u holda to‘siqning tiniqligi va shuning uchun oqayotgan oqim kichik bo‘ladi.



2-rasm . Rezonansli tunnel diodining oqim kuchlanishining xarakteristikasi

Elektronlarning energiyasi diskret darajadagi energiyaga teng bo'lganda, oqim bunday kuchlanishlarda maksimal qiymatga etadi (3.7a-rasmga qarang). Yuqori kuchlanishlarda tushgan elektronlarning energiyasi diskret darajadagi energiyadan kattaroq bo'ladi va to'siqning tunnel tiniqligi pasayadi (3.7b-rasmga qarang). Shu bilan birga, oqim ham kamayadi. Rezonansli tunnel diodining oqim kuchlanishining xarakteristikasi 3.7v rasmda ko'rsatilgan. Biz oqim kuchlanishining  $I(V)$  xarakteristikasida maksimal qiymatlar mavjudligini ko'ramiz (agar to'siqlar orasidagi mintaqada bir emas, balki bir nechta diskret darajalar bo'lsa, u holda bir nechta maksimal bo'ladi). Maksimal qiymatning o'ng tomonida  $I(V)$  egri chizig'i tushadigan qismga ega, bu yerda kuchlanish kuchayishi bilan oqim kamayadi. Agar biz rezonansli diodning markaziy hududiga kontakti ulasak, u orqali diskret darajaning holatini nazorat qilishimiz mumkin va yangi qurilma - tranzistorni olamiz. Rezonansli tunnel diodi kvant quduqlari va to'siqlari bo'lgan birinchi haqiqiy qurilmadir. U 1974 yilda Leo Esaki va I. Chang tomonidan yaratilgan.

### Rezonansli tunnel qurilmalaridagi mantiqiy elementlar.

Bir elektronli tranzistorlar negizida mantiqiy elementlar yaratishning ikkita asosiy imkoniyati mavjud. Bu kuchlanish bilan boshqariladigan mantiqiy elementlar va zaryad bilan boshqariladigan mantiqiy elementlardir. Birinchisida, bitta elektronli tranzistorning o'ziga xos xususiyatlaridan kelib chiqib mantiqiy "1" va "0" ga mos keladigan yuqori yoki past chiqish kuchlanish darajasiga ega bo'lgan elektron qurilma sifatida ishlatiladi. Taklif etilayotgan mantiqiy elementlarda bitta elektron qurilma segmentlari orqali harakatlanishi mumkin va ularga ulangan tranzistorlar signalning bo'linishi va mantiqiy operatsiyalarning bajarilishini ta'minlaydi. Ma'lum bipolyar va maydon yarimo'tkazgichli tranzistorlar bilan solishtirganda bitta elektronli qurilmalarning asosiy afzalliklari ancha kichikroq o'lchamlar va kengaytirilgan funktsionallik bilan bog'liq. Biroq, ularning kamchiliklarini ham yodda tutish kerak. Birinchidan, bitta elektronli tranzistorlarning ishlashi odatda past haroratlar bilan chegaralanadi. Ikkinchidan, bitta elektronli tranzistorlar tunnel ulanishlarining yuqori qarshiligi tufayli past chastotalar bilan chegaralanganidir.

### Kvant nanostrukturalarini elektronikada qo'llash. Kvant quduqlarini ishlab chiqarish texnologiyasi.

Kvant mexanikasi materiyaning eng kichik zarrachalarining xossalarini o'rganadigan fundamental fandir. Uning qonunlari elektronlar, atomlar yoki molekulalarning harakatlarini. Yaqin vaqtgacha elektron qurilmalarni yaratuvchi muhandislar hisob-kitoblarida faqat klassik fizika qonunlaridan foydalanganlar. Va bu to'liq oqlandi, chunki, masalan, oddiy televizor ekran

trubkasida elektronlar klassik material nuqtalari - bilyard to'plari yoki to'plar bilan bir xil tarzda harakatlanadi. Eng murakkab kompyuter mikroprotessorida mikroskopik elektronlarning harakati ham klassik jismlarning harakatiga o'xshaydi. Biroq, vaziyat o'zgarmoqda. Zamonaviy yarimo'tkazgichli elektronikaning rivojlanish mantig'i shundan iboratki, integral mikrosxemalar tobora murakkablashib, ko'payib borayotgan elementlarni birlashtirmoqda. Hozirgacha integral mikrosxemalar ishlab chiqaruvchilari tranzistorlar, diodlar va boshqa elementlarning o'lchamlarini kamaytirish orqali ularning zichligini oshirishga muvaffaq bo'lishdi. Ehtimol, yaqin kelajakda bu o'lchamlar mikronning bir necha fraksiyalari tartibida bo'ladi. Bu sodir bo'lganda, klassik fizika tilidagi tavsif butun ma'nosini yo'qotadi va elektron qurilmalarni yaratuvchilar kvant mexanikasiga murojaat qilishga majbur bo'lishadi.

Fiziklar allaqachon kvant mexanikasi prinsiplariga asoslangan qurilmalarni yaratishda katta tajriba to'plashdi. Atomlarni bir yoki ikki qatlamgacha aniqlik bilan joylashtirish orqali ular sun'iy kristallar, molekulalar va hatto belgilangan xususiyatlarga ega atomlarni yaratishi mumkin. Bunday yarimo'tkazgichli tuzilmalar bir necha nanometr yoki bir necha o'nlab angstromlarning o'lchamlariga ega (esda tutingki, nanometr  $10^{-9}$  m ga teng va inson sochining qalinligidan o'n ming marta kam). Garchi bu o'lchamlar haqiqiy atomlarnikidan kattaroq bo'lsa ham, bu tuzilmalardagi elektronlar kvant obyektlari kabi harakat qiladi. Mikro tuzilmalarning uchta asosiy turini ajratish mumkin: kvant quduqlari, iplar va nuqtalar, ikkinchisi ba'zan sun'iy atomlar deb ataladi. Ushbu tuzilmalarni o'rganish nafaqat elektron muhandislikning yangi sahifalarini ochadi, balki fundamental xarakterdagi kashfiyotlar bilan hamroh bo'ladi.

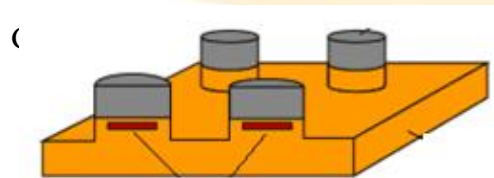
Kvant quduqlari bir tomonlama bo'shliqqa va boshqa tomondan qattiq sirtga ega bo'lgan ega bo'lgan ikki qatlamli material orasiga yupqa yarim o'tkazgich qatlamini joylashtirish orqali yaratiladi. Natijada, elektronning bitta yo'nalish bo'ylab harakati ta'minlanadi, bu esa uning harakat energiyasining kvantlanishiga olib keladi. Boshqa qolgan ikki yo'nalish bo'ylab elektronlar harakati sodir bo'lmaydi, shuning uchun kvant qudug'idagi elektron gaz ikki o'lchovli bo'ladi, deb aytishimiz mumkin. Xuddi shu tarzda, ikkita tor diapazonli yarim o'tkazgichlar orasiga yarim o'tkazgichning yupqa qatlamini qo'yish orqali kvant to'siqni o'z ichiga olgan kvant quduqlari tuzilmalarini tayyorlash mumkin.

Bunday tuzilmalarni ishlab chiqarish uchun bir qancha ilg'or texnologik jarayonlar ishlab chiqilgan. Kvant tuzilmalarini tayyorlashda eng yaxshi natijalar *molekulyar nurli epitaksiya usuli* yordamida erishildi. Ushbu usul yordamida yarimo'tkazgichning yupqa bir qatlamini yetishtirish uchun biz atomlar yoki molekulalar oqimini diqqat bilan tozalangan sirtga yo'naltirishimiz kerak. Bir vaqtning o'zida alohida isitiladigan manbalardan moddani bug'lash orqali olingan bir nechta atom oqimlari substratga uchib ketadi. Nuqsonlar yuzaga kelishining oldini olish uchun tuzilma yuqori vakuumda o'stiriladi. Butun jarayon kompyuter tomonidan boshqariladi va o'stirish jarayonida qatlamning kimyoviy tarkibi va kristall tuzilishi nazorat qilinadi. Molekulyar nurli epitaksiya usuli qalinligi atigi bir necha panjara davri bo'lgan mukammal bir kristalli qatlamlarni o'stirishga imkon beradi.

Har xil kimyoviy tarkibga ega bo'lgan ikkita o'zaro qatlamning panjara davrlari deyarli bir xil bo'lishi juda muhimdir. Bu esa o'stirilgan strukturaning kristall panjarasida nuqsonlar paydo bo'lmasligining kafolati hisoblanadi. Molekulyar nurli epitaksiya usulidan foydalanib, ikkita qo'shni qatlam o'rtasida juda keskin (bir qatlamgacha aniq) chegara olish mumkin va sirt atom darajasida silliq bo'lishiga erishiladi. Kvant tuzilmalari turli materiallardan o'stirilishi mumkin, ammo kvant quduqlarini yetishtirish uchun eng muvaffaqiyatli juftlik bu yarimo'tkazgich GaAs - galliy arsenid va  $Al_xGa_{1-x}As$  qattiq eritmasi bo'lib, unda galliy atomlarining ma'lum qismi alyuminiy atomlari bilan almashtiriladi. Alyuminiy atomlari bilan almashtirilgan galliy atomlarining

ulushi odatda 0,15 dan 0,35 gacha o'zgaradi. Galliy arsenidida tarmoqli bo'shliq oralig'i 1,5 eV ni tashkil qilganda,  $Al_xGa_{1-x}As$  qattiq eritmasida atomlarining ulushi  $x$  ga ortadi. Shunday qilib,  $x=1$  bo'lganda,  $AlAs$  birikmasida bo'shliq oralig'i 2,2 eV gacha yetadi. Kvant qudug'ini o'stirish jarayonida o'sayotgan qatlam atomlarining kimyoviy tarkibi o'zgarib boradi. Quduq chekli chuqurlikka ega (elektron voltning bir necha o'ndan bir qismi). U faqat ikkita diskret darajani o'z ichiga oladi va quduq chegarasida to'lqin funksiyalari noldan farqli bo'lishi kuzatiladi.

Texnologlar kvant nuqtalari va iplarini ishlab chiqarishning bundan boshqa bir necha usullarini ishlab chiqdilar. Ushbu tuzilmalar, masalan, ikki o'lchovli elektron gaz joylashgan ikkita yarim o'tkazgich orasidagi qatlamda hosil bo'lishi mumkin. Buni elektronlarning yana bir yoki ikkita yo'nalishda harakatlanishini cheklaydigan qo'shimcha to'siqlarni qo'shish orqali amalga oshirish mumkin. Yarimo'tkazgichli substratda hosil bo'lgan V shaklidagi pastki qismida kvant simlari hosil bo'ladi. Agar kichikroq tarmoqli bo'shlig'iga ega bo'lgan yarimo'tkazgich ushbu shaklning yonlamasiga yotqizilgan bo'lsa, unda bu yarim o'tkazgichning elektronlari ikki yo'nalishda qulflanadi.



### 3-rasm galliy arsenidi va alyuminiy galliy arsenidi orasidagi qatlamda yaratilgan kvant nuqtalari

3-rasmda galliy arsenidi va alyuminiy galliy arsenidi orasidagi qatlamda yaratilgan kvant nuqtalari ko'rsatilgan. O'sish jarayonida  $AlGaAs$  yarimo'tkazgichga qo'shimcha atomlar kiritildi. Bu atomlardan elektronlar  $GaAs$  yarimo'tkazgichga, ya'ni energiya kamroq bo'lgan mintaqaga kiradi. Deyarli barcha elektronlar  $GaAs$  tomonidagi getero qatlamda to'planadi va ikki o'lchovli gaz hosil qiladi. Kvant tuzilmalari lazerlarni yaratishda eng muvaffaqiyatli qo'llaniladi. Bugungi kunda samarali kvant quduqli lazer qurilmalari bozorga chiqdi va optik tolali aloqa liniyalarida qo'llanilmoqda. Birinchidan, har qanday lazerning ishlashi uchun energiya darajasining teskari davrini yaratish kerakligini eslaylik. Boshqacha qilib aytadigan bo'lsak, pastroq darajadan yuqori darajada elektronlar ko'proq bo'lishi kerak, termal muvozanat holatida esa vaziyat teskari bo'ladi. Ikkinchidan, har bir lazer uchun optik bo'shliq yoki ish hajmida elektromagnit nurlanishni bloklaydigan nometall tizimi kerak.

#### Vertikal transport tuzilmalari va kvant super panjaralari.

Yuqorida muhokama qilingan elementar past o'lchamli tuzilmalar ma'lum ma'noda ideallashtirilgan obyektlardir. Haqiqiy eksperimental namunalar ko'p sonli bir xil yoki deyarli bir xil kvant obyektlarini o'z ichiga oladi. So'nggi yillarda tadqiqotchilar, muhandislar va texnologlar o'rtasida turli yarim o'tkazgich (yarim o'tkazgichli super panjaralar) yoki magnit (magnit ko'p qatlamli) materiallardan tashkil topgan qatlamli konstruksiyalarga qiziqish ortib bormoqda. Yarimo'tkazgichli super panjaralar va magnit qatlamlar xarakterli o'lchamlarga ega va odatda nanostrukturalar deb ataladi. Yarimo'tkazgichli super panjaralar va magnit qatlamlardan tashqari, bir qator boshqa materiallar ham nanostrukturalar sifatida tasniflanishi mumkin: fullerenlar,

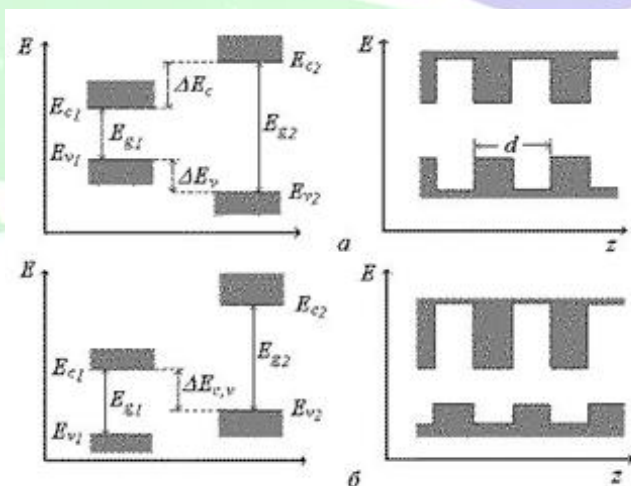
kremniy naychalari va ba'zi biologik obyektlar. Yarimo'tkazgichli super panjaralar, kompozit va qo'shimchali super panjaralar mavjud.

Super panjara - bir yo'nalishda almashinadigan yarim o'tkazgichlarning yupqa qatlamlaridan tashkil topgan davriy tuzilmadir. Super panjara davri kristall panjara doimiysidan ancha katta, lekin elektronning o'rtacha erkin yo'lidan kamroq. Bunday struktura kristall panjaraning davriy potensialiga qo'shimcha ravishda yarimo'tkazgichlarning o'zgaruvchan qatlamlari hisobiga qo'shimcha potensialga ega bo'lib, u super panjara potentsiali deb ataladi. Super panjara potentsialining mavjudligi dastlabki yarim o'tkazgichlarning tarmoqli energiya strukturasi sezilarli darajada o'zgartiradi. Yarimo'tkazgichli super panjaralar maxsus fizik xususiyatlarga ega, ularning asosiylari quyidagilardir:

- asosiy yarimo'tkazgichlarga nisbatan energiya spektrining sezilarli o'zgarishi;
- ko'p sonli energiya zonalarining mavjudligi;
- juda kuchli anizotropiya (ikki o'lchovlilik);
- elektron-teshik rekombinatsiyasi;
- super panjaradagi elektronlar va teshiklarning konsentratsiyasi o'zgarishi mumkin bo'lgan qiymatdir;
- tarmoq strukturasi qayta qurish uchun keng imkoniyatlar mavjud.

Yarimo'tkazgichli super panjaralarning barcha bu xususiyatlari bizga ushbu sun'iy tuzilmalarni yarim o'tkazgichlarning yangi turi sifatida ko'rib chiqishga imkon beradi.

Kompozit super panjara - yaqin panjara doimiylari bilan har xil tarkibdagi yarimo'tkazgichlarning epitaksial ravishda o'stirilgan muqobil qatlamlaridir. Tarixiy jihatdan GaAs - Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As yarimo'tkazgichlar tizimi uchun birinchi super panjaralar olingan. Bu super panjarani yaratishdagi muvaffaqiyat Ga bilan bir xil valentlik va ion radiusiga ega bo'lgan Al ning o'zaro birlashmasi bilan bog'liq.



4-rasm

Yarimo'tkazgichlarning energiya darajasiga ko'ra, kompozitsion super panjaralar bir necha turlarga bo'linadi. GaAs - Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As yarimo'tkazgich super panjarasi I turdagi super panjaralarga tegishli bo'lib, ularda yarim o'tkazgichning o'tkazuvchanlik zonasining minimal qiymati  $Y_{e_{c1}}$  va valentlik zonasining maksimal qiymati  $Y_{e_{v1}}$  bo'lgan energiya bo'shlig'ida joylashgan (4-rasm).

Ushbu turdagi super panjaralarda birinchi yarimo'tkazgichdagi tok tashuvchilar uchun davriy kvant quduqlari tizimi paydo bo'ladi, ular ikkinchi yarim o'tkazgichda yaratilgan potensial to'siqlar bilan bir-biridan ajralib turadi. Elektronlar uchun kvant quduqlarining chuqurligi ikkita yarim o'tkazgichning o'tkazuvchanlik zonalarini minimallari orasidagi farq bilan, teshiklar uchun kvant quduqlarining chuqurligi esa valentlik zonasining maksimalari orasidagi farq bilan aniqlanadi (4-rasm).

II turdagi kompozit super panjaralarda (4b-rasm) bitta yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanlik zonasining minimali ikkinchisining energiya bo'shlig'ida, ikkinchisining valentlik zonasining maksimali esa, ikkinchisining energiya bo'shlig'ida joylashgan. Ushbu turdagi super panjaraning energiya diagrammasi 4b-rasmda ko'rsatilgan. Ushbu super panjaralarda o'tkazuvchanlik zonasi va valentlik zonasi qirralarining modulyatsiyasi bir xil belgiga ega. Bunday energiya tuzilishiga ega bo'lgan super panjara namunasi  $In_xGa_{1-x}As - GaSb_{1-y}As_y$  tizimidir. Bu turga, shuningdek, yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanlik zonasining minimali boshqasining valentlik zonasining maksimalidan pastroq energiyada joylashgan kompozitsion super panjaralar (bir-birining ustiga chiqmaydigan tarmoqli bo'shliqlari bo'lgan II turdagi kompozitsion super panjaralar) kiradi. Bunday super panjara namunasi  $InAs - GaSb$  tizimidir.

Legirlangan o'ta panjaralarda davriy potensial bir xil yarim o'tkazgichning n- va p-tipli qatlamlarini almashtirish orqali hosil bo'ladi. Ushbu qatlamlarni bir-biridan o'zaro alohida qatlamlariga ajratish mumkin. GaAs ko'pincha qo'shimchali super panjaralarni yaratish uchun ishlatiladi. Legirlangan super panjara potentsiali faqat zaryadning fazoviy taqsimlanishi orqali hosil bo'ladi. Bu doplangan qatlamlarda ionlangan aralashmalarining potentsialiga bog'liq. Doplangan super panjaralardagi barcha donor markazlari musbat zaryadlangan va barcha qabul qiluvchi markazlar manfiy zaryadlangan.

Toplangan super panjaralarning muhim xususiyati shundaki, elektronlar va teshiklarning to'liq funksiyalarining ekstremal qismi super panjara davrining yarmiga nisbatan siljiy oladi. Super panjaralarning parametrlarini tanlash orqali, joriy tashuvchilarning rekombinatsiya muddatini uzaytirish mumkin. Ushbu holat super panjaralardagi oqim tashuvchilarning konsentratsiyasini osongina o'zgartirishga imkon beradi. Kompozit va qo'shimchali super panjaralarga qo'shimcha ravishda, modulyatsiya potentsialini yaratish usuli bilan farq qiladigan materiallarning boshqa turlari ham mavjud. Spin super panjaralari yarimo'tkazgich materialning magnit aralashmalar bilan o'zaro rekombinatsiya natijasida amalga oshiriladi. Bunday super panjaralarda davriy potensial tashqi magnit maydon qo'llanilishi bilan paydo bo'ladi. Yuqori panjara potentsialini kuchli ultratovush to'liqini yoki doimiy yorug'lik to'liqini sohasida namunaning davriy deformatsiyasi orqali ham yaratish mumkin.

#### Adabiyotlar ro'yxati:

1. Komil Muqimov. Mitti bunyodkorlar yoxud nanotexnologiyalar nima?, "Kamalak" nashriyoti, Toshkent-2017.
2. K.M.Muqimov, Sh.A.Savurova, Features of studying a nanophysics course in higher educational institutions, "Ta'lim transformatsiyasi" ilmiy-nazariy va metodik jurnal; 2023.
3. K.M.Muqimov, Sh.A.Savurova, Methodological aspects of organizing nanophysics training in higher educational institutions, "Ta'lim, fan va innovatsiya" Ma'naviy-ma'rifiy, ilmiy-uslubiy jurnal; 2024.

4. Sh.A.Savurova, Олий таълим муассасаларида нанофизика курсини ташкил этишнинг ўзига хос хусусиятлари, “Fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni” Respublika ilmiy-amaliy konferensiya (RIAK-XVII-2024) materiallari to‘plami: O‘zMU; 2024.
5. K.M.Muqimov, Sh.A.Savurova, Нанофизика курсининг фундаментал билимлари, “PEDAGOGS” international research journal; 2024.
6. K.M.Muqimov, Sh.A.Savurova, Нанотехнологияларларнинг ривожланиш тарихи ва асосий йўналишлари ҳақида айрим масалалар, “O‘quvchilarda tabiiy-ilmiy savodxonlikni rivojlantirish va raqamli dunyoni o‘rganishlarini tashkil etishning istiqbollari” mavzusidagi ilmiy-amaliy konferensiya materiallari: Surxondaryo viloyati Pedagogik mahorat markazi, Termiz; 2024.
7. K.M.Muqimov, Sh.A.Savurova, Шредингер тенгламаси, квант ҳолатлари ва энергиялари, тўсиқни туннел қилиш, “Ilm-fan taraqqiyoti: ilmiy innovatsion yondashuvlar va strategik tahlillar” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman SAMBHRAM To‘plam-1: 2-sho‘ba. aniq va tabiiy fanlarda innovatsion tadqiqotlar (240-244 betlar); 2024.
8. Sh.A.Savurova, R.R.Burxonov, Nanotexnologiya rivojlanish bosqichlari, “Ilm-fan taraqqiyoti: ilmiy innovatsion yondashuvlar va strategik tahlillar” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman SAMBHRAM To‘plam-2: 1-sho‘ba. it sohasida muammolar, yechimlar va istiqbollar (20-23 betlar); 2024.
9. Ш.А.Савурова, Заррача (квант) модданинг табиати: фотонлар, электронлар, атомлар, молекулалар, “Journal of Physics and Technology Education” <https://phys-tech.jdpu.uz> ( Online ) “Физика ва технологик таълим” журналі: Жиззах – 2025, Volume 1, Issue 1(20), 2025 25 феврал (66-69- бетлар)
10. Sh.A.Savurova, Kovalent bog‘lanish va kovalent bog‘lanishga qarshi, sof nanofizik effektlar, “Journal of Physics and Technology Education” <https://phys-tech.jdpu.uz> ( Online ) “Физика ва технологик таълим” журналі: Жиззах – 2025, Volume 1, Issue 1(20), 2025 25 феврал (70-73- бетлар)
11. Suzdalev, I.P. Nanotexnologiyalar: nanoklasterlar, nanostrukturalar va nanomateriallarning fizikasi va kimyosi. M.: KomKniga, 2006.- 592 b.
12. Gusev, A.I. Nanokristalli materiallar. M.: Fizmatlit, 2000. - 224 b.
13. R.A. Andriyevskiy, A.V. Ragulya. Nanostrukturali materiallar. Kiyev: Akademiya, 2005, 185 b.