IQRO JURNALI , IQRO JOURNAL, ИКРО ЖУРНАЛИ
ISSN:2181-4341| wordlyknowledge.uz/index.php/iqro
Volume 24. Issue 01. Oktabr, 2026

TASHQI BOSIM TA'SIRIDA INAS/INP KVANT O'RALARINING ENERGETIK SATHLARI VA ULARNING OPTIK XUSUSIYATLARINI NAZARIY TADQIQ ETISH

Abdumanopova Kibriyo O'rinboy qizi
NamDu Fizika -matematika fakulteti
Fizika yo'nalishi M.Fiz-AU-25
2- kurs magistrantiman
https://doi.org/10.5281/zenodo.23812336

Annotatsiya

Mazkur maqolada tashqi gidrostatik bosim ta'sirida InAs/InP yarimo'tkazgich geterotuzilmalaridagi kvant o'ralarining energetik spektri va optik xususiyatlarining o'zgarish qonuniyatlari nazariy jihatdan tahlil qilinadi. Kvant o'ralarida elektron va kovaklarning fazoviy chegaralanishi, energetik sathlarning kvantlashuvi, taqiqlangan zona kengligining bosimga bog'liqligi hamda optik o'tish energiyalarining o'zgarish mexanizmlari ko'rib chiqiladi. Tadqiqotning nazariy asosini effektiv massa yaqinlashuvi, bir o'lchamli Shredinger tenglamasi, deformatsion potensial nazariyasi va kvant-mexanik optik o'tishlar modeli tashkil etadi. Tashqi bosimning yarimo'tkazgich kristall panjarasi parametrlariga, elektronlarning effektiv massasiga, potensial to'siqlar balandligiga va elektron-kovak holatlarining energetik joylashuviga ta'siri tahlil qilinadi. Nazariy tahlil InAs/InP kvant o'ralarining optik javobini boshqarishda bosim muhim tashqi parametr bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Olingan nazariy xulosalar infraqizil optoelektronika, yarimo'tkazgich lazerlari va bosimga sezgir optik qurilmalarni loyihalashda ahamiyat kasb etishi mumkin.

Kalit so'zlar: InAs/InP, kvant o'rasi, gidrostatik bosim, energetik sathlar, effektiv massa, Shredinger tenglamasi, taqiqlangan zona, optik o'tish, fotolyuminessensiya, geterotuzilma.

Kirish

Zamonaviy yarimo'tkazgichlar fizikasi va nanoelektronikaning rivojlanishi past o'lchamli kvant tizimlarining elektron hamda optik xususiyatlarini chuqur o'rganish bilan bevosita bog'liq. Ayniqsa, III–V guruh yarimo'tkazgichlari asosida yaratilgan geterotuzilmalar yuqori samarali optoelektron qurilmalarni ishlab chiqishda muhim materiallar qatoriga kiradi. Bunday tuzilmalarda elektron va kovaklarning harakati ma'lum yo'nalishlarda chegaralanishi natijasida odatiy hajmiy yarimo'tkazgichlarga xos bo'lmagan kvant hodisalari yuzaga keladi. Ushbu hodisalar energetik sathlarning diskretlashuvi, optik o'tishlarning o'zgarishi va tashqi fizik ta'sirlarga sezgirlikning ortishi bilan namoyon bo'ladi.

InAs va InP yarimo'tkazgichlari asosida shakllantirilgan kvant o'ralari alohida ilmiy qiziqish uyg'otadi. InAs tor taqiqlangan zonaga ega yarimo'tkazgich bo'lib, InP esa nisbatan kengroq taqiqlangan zonasi va optoelektronika uchun qulay xususiyatlari bilan ajralib turadi. Mazkur materiallar asosidagi geterotuzilmalarda elektron va kovaklarning fazoviy chegaralanishi, energetik sathlar orasidagi o'tishlar va nurlanish xususiyatlarini boshqarish imkoniyati mavjud.

Kvant o'ralarining energetik tuzilishi bir qator omillarga, jumladan, o'ra kengligi, potensial to'siq balandligi, kristall panjaralar nomuvofiqligi, harorat va tashqi bosimga bog'liq. Ushbu

parametrlar orasida gidrostatik bosim alohida ahamiyatga ega, chunki u kristall panjara hajmini o‘zgartirish orqali yarimo‘tkazgichning elektron zonalar tuzilishiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi.Tashqi bosim ortishi natijasida kristall panjaraning deformatsiyalanishi, energetik zonalar chegaralarining siljishi va zaryad tashuvchilarning effektiv massalari o‘zgarishi mumkin. Bunday o‘zgarishlar kvant o‘rasidagi elektron va kovak holatlariga, shuningdek, ular orasidagi optik o‘tish energiyalariga ta’sir qiladi. Shu sababli bosim ta’sirida InAs/InP kvant o‘ralarining energetik va optik xususiyatlarini nazariy o‘rganish fundamental fizika bilan bir qatorda amaliy optoelektronika uchun ham dolzarb hisoblanadi.Kvant o‘lchamli tizimlarning nazariy asoslari Bastard, Davies hamda Harrisonning ilmiy ishlarida keng yoritilgan [1–3]. Yarimo‘tkazgichlarning zonalar tuzilishi, effektiv massalari va deformatsion potensiallariga oid fundamental ma’lumotlar Vurgaftman, Meyer va Ram-Mohanning tadqiqotida umumlashtirilgan [4].Mazkur maqolaning maqsadi tashqi gidrostatik bosimning InAs/InP kvant o‘ralaridagi elektron va kovak energetik sathlariga ta’sirini nazariy tahlil qilish hamda optik o‘tish energiyalarining bosimga bog‘liq o‘zgarish mexanizmlarini ilmiy jihatdan asoslashdan iborat.

Tadqiqot materiallari va metodlari

Tadqiqot nazariy xarakterga ega bo‘lib, InAs/InP geterotuzilmasining elektron xususiyatlarini tavsiflashda effektiv massa yaqinlashuvi, kvant mexanikasi tenglamalari va deformatsion potensial nazariyasidan foydalanishga asoslanadi.

Model sifatida InP materialidan hosil qilingan potensial to‘siqlar orasida joylashgan InAs kvant o‘rasi qaraladi. Tuzilmaning o‘sish yo‘nalishi z o‘qi bo‘ylab tanlanadi. Elektronlarning ushbu yo‘nalishdagi harakati potensial o‘ra bilan chegaralangan, tekislik bo‘ylab harakati esa erkin deb qabul qilinadi.

Bir zonali effektiv massa yaqinlashuvida elektronning statsionar holati quyidagi Shredinger tenglamasi bilan tavsiflanadi:

$$-\frac{\hbar^2}{2}\frac{d}{dz}\left[\frac{1}{m^*(z,P)}\frac{d\psi(z)}{dz}\right]+V(z,P)\psi(z)=E\psi(z)$$

Bu yerda $\hbar$ — keltirilgan Plank doimiysi, $m^*(z,P)$ — elektronning koordinata va bosimga bog‘liq effektiv massasi, $V(z,P)$ — potensial energiya, E — elektronning energetik xususiy qiymati, $\psi(z)$ — to‘lqin funksiyasi, P — tashqi gidrostatik bosim.

Potensial o‘ra soddalashtirilgan holda quyidagicha ifodalanadi:

$$V(z,P)=\begin{cases}0, & |z|\le L/2,\\ V_0(P), & |z|>L/2.\end{cases}$$

Bu yerda L — kvant o‘rasining kengligi, $V_0(P)$ esa bosimga bog‘liq potensial to‘siq balandligi.

Taqiqlangan zona kengligining bosimga bog‘liqligi kichik bosimlar oralig‘ida birinchi yaqinlashuvda quyidagi ifoda bilan tavsiflanishi mumkin:

$$E_g(P) = E_g(0) + \alpha P$$

Bu yerda $E_g(0)$ — bosim bo‘lmagandagi taqiqlangan zona kengligi, $\alpha = dE_g/dP$ — taqiqlangan zona kengligining bosim koeffitsiyenti.

Kengroq bosim oralig‘ida yoki sezilarli nochiziqli javob mavjud bo‘lganda kvadratik hadni ham hisobga olish mumkin:

$$E_g(P) = E_g(0) + \alpha P + \beta P^2$$

Bunda β — ikkinchi tartibli bosim koeffitsiyenti.

Mazkur ifodalardagi parametrlar InAs va InP uchun alohida aniqlanishi kerak. Bundan tashqari, real InAs/InP geterotuzilmalarida kristall panjaralar nomuvofiqligi sababli hosil bo‘ladigan ichki deformatsiya ham hisobga olinishi zarur. Ayniqsa, InAs qatlamining InP asosida pseudomorf o‘sishi sharoitida deformatsiya elektron va kovak zonalarining energetik joylashuviga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi mumkin.

Gidrostatik deformatsiyaning zonalar energiyasiga birinchi tartibli ta’siri deformatsion potensial yordamida ifodalanadi:

$$\Delta E_c = a_c \,\mathrm{Tr}(\varepsilon)$$

$$\Delta E_{v,\mathrm{hyd}} = a_v \,\mathrm{Tr}(\varepsilon)$$

Bu yerda a_c va a_v — mos ravishda o‘tkazuvchanlik va valent zonalarning gidrostatik deformatsion potensiallari, ε — deformatsiya tenzori.

Izotrop elastik muhitda kichik gidrostatik bosimlar uchun:

$$\mathrm{Tr}(\varepsilon) \approx -\frac{P}{B}$$

Bu yerda B — hajmiy siqilish moduli.

Optik o‘tish energiyasini baholashda elektron va kovaklarning kvantlangan energetik sathlari hisobga olinadi. Birinchi yaqinlashuvda asosiy elektron-kovak optik o‘tish energiyasi quyidagicha yozilishi mumkin:

$$E_{\mathrm{opt}}(P) = E_g^{\mathrm{well}}(P) + E_{e1}(P) + E_{h1}(P) - E_b(P)$$

Bu yerda Ee1 va Eh1— elektron hamda kovaklarning tegishli kvantlangan chegaralanish energiyalari, E_b — eksiton bog‘lanish energiyasi.

Optik nurlanishning to‘lqin uzunligi esa:

$$\lambda(P) = \frac{hc}{E_{\text{opt}}(P)}$$

munosabat orqali aniqlanadi.

Ushbu tenglamalar tashqi bosim ta’sirida kvant o‘ralarining optik javobini tahlil qilish uchun nazariy asos yaratadi.

Natijalar va ularning tahlili

Tashqi bosimning energetik sathlarga ta’siri

Nazariy modeldan kelib chiqadiki, gidrostatik bosim InAs/InP kvant o‘rasining energetik spektriga bir necha mexanizm orqali ta’sir ko‘rsatadi. Birinchidan, bosim kristall panjara hajmini kamaytirib, yarimo‘tkazgichlarning zonalar tuzilishini o‘zgartiradi. Ikkinchidan, InAs va InP materiallarining bosim koeffitsiyentlari bir xil bo‘lmaganligi sababli geterochegaradagi zonalar siljishi va potensial to‘siqlar balandligi o‘zgarishi mumkin. Uchinchidan, zaryad tashuvchilarning effektiv massalari ham bosimga bog‘liq bo‘lishi mumkin.

Cheksiz chuqur bir o‘lchamli potensial o‘ra uchun energetik sathlar:

$$E_n = \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2m^*L^2}$$

formula bilan aniqlanadi.

Mazkur ifoda energetik sathlarning o‘ra kengligiga teskari kvadratik bog‘liqligini ko‘rsatadi. Kvant o‘rasi kengligi kamaygan sari chegaralanish energiyasi ortadi va energetik sathlar orasidagi masofa kattalashadi. Biroq real InAs/InP geterotuzilmasida potensial to‘siqlar chekli bo‘lib, energetik sathlarni aniqlashda to‘lqin funksiyalarining geterochegaradagi tutashish shartlarini hisobga olish talab etiladi.Tashqi bosimning ta’siri faqat energetik sathlarning siljishi bilan cheklanmaydi. Bosim natijasida elektron va kovak to‘lqin funksiyalarining fazoviy taqsimoti ham o‘zgarishi mumkin. Bu holat zaryad tashuvchilarning chegaralanish darajasiga va optik o‘tishlar ehtimolligiga ta’sir ko‘rsatadi.

Shuni ta’kidlash kerakki, energetik sathlarning bosim ortishi bilan qanday yo‘nalishda va qanchalik siljishi material parametrlariga, kvant o‘rasining kengligiga, geterotuzilmaning deformatsiya holatiga hamda zonalar chegaralarining bosimga bog‘liqligiga bog‘liq. Shuning uchun barcha InAs/InP kvant o‘ralarida energetik sathlar bir xil qonuniyat asosida o‘zgaradi, degan xulosa chiqarish to‘g‘ri emas.

Optik o‘tish energiyalarining bosimga bog‘liqligi

Kvant o‘ralarining optik xususiyatlari asosan elektronlarning o‘tkazuvchanlik zonasi va valent zonadagi holatlar orasida sodir bo‘ladigan optik o‘tishlar bilan belgilanadi. Elektron va

kovak energetik sathlarining o‘zgarishi yutilish va nurlanish spektrlarining siljishiga olib kelishi mumkin.

Agar bosim ortishi bilan optik o‘tish energiyasi oshsa, nurlanish spektri qisqa to‘lqinlar tomon siljiydi. Bu hodisa ko‘k siljish (blueshift) deb ataladi. Aksincha, optik o‘tish energiyasining kamayishi nurlanish to‘lqin uzunligining ortishiga, ya’ni qizil siljish (redshift) hodisasiga olib keladi.

Optik o‘tish energiyasining bosim bo‘yicha o‘zgarish tezligi:

$$\frac{dE_{\text{opt}}}{dP} = \frac{dE_g}{dP} + \frac{dE_{e1}}{dP} + \frac{dE_{h1}}{dP} - \frac{dE_b}{dP}$$

munosabat orqali ifodalanadi.

Ushbu formula optik spektrning bosimga bog‘liqligi faqat materialning taqiqlangan zona kengligi bilan emas, balki kvant chegaralanishi va eksiton effektlari bilan ham belgilanadi, degan xulosaga olib keladi.InAs/InP geterotuzilmalarida optik o‘tishlarning aniq energiyasini hisoblash uchun elektron va kovak holatlarini alohida modellashtirish zarur. Ayniqsa, og‘ir va yengil kovak zonalarining deformatsiya ta’sirida ajralishi optik spektrning shakllanishida muhim ahamiyatga ega.

Kvant o‘rasi kengligining optik xususiyatlarga ta’siri

Kvant o‘rasining geometrik o‘lchamlari elektron va kovaklarning energetik holatlariga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Tor kvant o‘ralarida fazoviy chegaralanish kuchliroq bo‘lgani sababli elektron va kovaklarning kvantlashuv energiyasi yuqoriroq bo‘ladi. Natijada optik o‘tish energiyasi ortishi mumkin.Kengroq kvant o‘ralarida esa energetik sathlar bir-biriga yaqinlashadi va kvantlashuv energiyasi kamayadi. Bu holat optik o‘tishlarning pastroq energiyalar sohasiga siljishiga sharoit yaratadi.Bosim va o‘ra kengligi ta’sirini birgalikda hisobga olish InAs/InP geterotuzilmalarining optik xususiyatlarini maqsadli boshqarish imkoniyatlarini nazariy jihatdan baholashga yordam beradi. Biroq juda tor InAs qatlamlarida chegaraviy sirtlarning notekisligi, atomlararo aralashish va kuchli deformatsiya kabi omillar oddiy effektiv massa modelining aniqligini cheklashi mumkin.

Optik o‘tish intensivligining o‘zgarishi

Optik o‘tishlarning intensivligi elektron va kovak holatlari orasidagi o‘tish matritsa elementlariga bog‘liq. Soddalashtirilgan modelda o‘tish ehtimolligi to‘lqin funksiyalarining fazoviy qoplanish integrali bilan bog‘lanadi:

$$M_{eh} \propto \left| \int \psi_e^*(z)\psi_h(z)\,dz \right|^2$$

Bu yerda $\psi_e(z)$ va $\psi_h(z)$ — elektron hamda kovaklarning to‘lqin funksiyalari.

Tashqi bosim potensial profilni o‘zgartirish orqali elektron va kovaklarning fazoviy taqsimotiga ta’sir qilishi mumkin. Natijada ularning qoplanish darajasi va optik o‘tish intensivligi

o‘zgaradi.Shu bilan birga, real fotolyuminessensiya intensivligi faqat qoplanish integrali bilan belgilanmaydi. Nurlanishsiz rekombinatsiya, nuqsonlar, harorat, qo‘zg‘atish quvvati va tashuvchilarning qayta taqsimlanishi kabi omillar ham muhim rol o‘ynaydi.

Muhokama

InAs/InP kvant o‘ralarining energetik va optik xususiyatlarini nazariy o‘rganish past o‘lchamli yarimo‘tkazgich tizimlarining fundamental fizik qonuniyatlarini tushuntirish uchun muhimdir. Tashqi bosim yordamida elektron zonalar tuzilishini o‘zgartirish imkoniyati kvant o‘lchamli geterotuzilmalarni boshqarishning qo‘shimcha fizik mexanizmini yaratadi.Effektiv massa yaqinlashuvi kvant o‘ralarining energetik spektrini dastlabki baholash uchun qulay bo‘lsa-da, real InAs/InP tizimlarida bir qator qo‘shimcha omillar mavjud. Jumladan, kristall panjaralar nomuvofiqligi tufayli hosil bo‘ladigan deformatsiya, valent zonalarning aralashuvi, zonalarning noparabolikligi va geterochegaradagi potensial profilning murakkabligi hisob-kitob natijalariga ta’sir qilishi mumkin.InAs va InP materiallarining panjara konstantalari sezilarli farq qilganligi sababli epitaksial qatlamlarda kuchli deformatsiya paydo bo‘lishi mumkin. Bu esa oddiy gidrostatik bosim modeliga qo‘shimcha ravishda epitaksial deformatsiyani ham hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi. Bunday sharoitda sakkiz zonali $k \cdot p$ modeli yoki boshqa ko‘p zonali yondashuvlar energetik spektrni batafsil hisoblash uchun qo‘llanishi mumkin [1,4].Nazariy modellashtirishda material parametrlarini tanlash ham muhimdir. Taqiqlangan zona kengligi, effektiv massa, deformatsion potensiallar, elastik konstantalar va zonalar siljishi koeffitsiyentlari turli ilmiy manbalarda ma’lum farqlar bilan keltirilishi mumkin. Shuning uchun hisoblash natijalarini eksperimental spektrlar bilan solishtirishda parametrlarning kelib chiqishi va qo‘llangan modelning chegaralari aniq ko‘rsatilishi kerak.Tashqi bosim ta’sirida optik spektrning siljishini nazariy baholash InAs/InP geterotuzilmalariga asoslangan infraqizil nurlanish manbalari, fotodetektorlar va boshqa optoelektron elementlarni loyihalashda foydali bo‘lishi mumkin. Biroq bunday amaliy qo‘llanish imkoniyatlari aniq qurilma konstruksiyasi, ishlash harorati, bosim oralig‘i va eksperimental barqarorlik sharoitlarida alohida tekshirilishi lozim.Mazkur maqola doirasida nazariy tenglamalar va fizik mexanizmlar tahlil qilindi. Aniq sonli modellashtirish natijalari, hisoblangan spektrlar yoki eksperimental o‘lchovlar keltirilmagan. Shu sababli bosimga bog‘liq spektral siljishlarning miqdoriy qiymatlarini aniqlash keyingi tadqiqot vazifasi hisoblanadi.

Xulosa

Tashqi gidrostatik bosim InAs/InP kvant o‘ralarining energetik spektri va optik xususiyatlariga ta’sir etuvchi muhim fizik omillardan biridir. Bosim natijasida kristall panjara parametrlarining o‘zgarishi, taqiqlangan zona kengligining siljishi, potensial to‘siqlar balandligi va zaryad tashuvchilarning effektiv massalari o‘zgarishi kvantlangan energetik holatlarning qayta shakllanishiga olib kelishi mumkin.Nazariy tahlil shuni ko‘rsatadiki, kvant o‘ralaridagi optik o‘tish energiyasi materialning zonalar tuzilishi, elektron va kovaklarning chegaralanish energiyalari hamda eksiton bog‘lanish energiyasining o‘zaro ta’siri bilan belgilanadi. Tashqi bosim ushbu omillarga ta’sir ko‘rsatishi orqali optik yutilish va nurlanish spektrlarini o‘zgartirishi mumkin.InAs/InP geterotuzilmalarini modellashtirishda effektiv massa yaqinlashuvi dastlabki nazariy tahlil uchun qulay vosita hisoblanadi. Biroq yuqori aniqlikdagi hisoblashlarda epitaksial

deformatsiya, valent zonalar aralashuvi, zonalar noparabolikligi va geterochegara xususiyatlarini ham hisobga olish zarur.

Shunday qilib, InAs/InP kvant o‘ralarining bosimga bog‘liq energetik va optik xususiyatlarini o‘rganish yarimo‘tkazgich nanostrukturalari fizikasi uchun dolzarb ilmiy yo‘nalish bo‘lib, kelgusida optoelektron qurilmalar parametrlarini nazariy optimallashtirishga xizmat qilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Bastard G. Wave Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructures. Les Ulis: Les Éditions de Physique, 1988.
2. Davies J. H. The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
3. Harrison P., Valavanis A. Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures. 4th ed. Chichester: Wiley, 2016.
4. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. Journal of Applied Physics. 2001;89(11):5815–5875. https://doi.org/10.1063/1.1368156
5. Yu P. Y., Cardona M. Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. 4th ed. Berlin: Springer, 2010.
6. Singh J. Physics of Semiconductors and Their Heterostructures. New York: McGraw-Hill, 1993.
7. Chuang S. L. Physics of Photonic Devices. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2009.
8. Bir G. L., Pikus G. E. Symmetry and Strain-Induced Effects in Semiconductors. New York: Wiley, 1974.
9. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2005.
10. Fox M. Optical Properties of Solids. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2010.