

Davlatov Abror
Namangan davlat universiteti dotsenti
E-mail: litsey111213@gmail.com
Muxiddinov Ramziddin
Namangan davlat universiteti magistranti
Xasanov Shoxruxbek
Namangan davlat universiteti talabasi
UO‘T: 621.315.592

ELEKTR MAYDONIDA JOYLASHGAN InP/InAs/InP KVANT O‘RASIDA ELEKTRONLAR ENERGIYA SATXLARI VA TO‘LQIN FUNKSIYALARI.

Annotatsiya: Ushbu maqolada InP/InAs/InP tarkibli kvant o‘rasida elektronlarning energiya sathlari va to‘lqin funksiyalariga tashqi elektr maydonining ta’siri tadqiq etildi. Tadqiqot davomida kvant o‘raning o‘lchami va elektr maydon kuchining energiya spektriga ta’siri turli matematik yondashuvlar – cheklangan orttirmalar usuli, analitik va variatsion usullar yordamida o‘rganildi. Natijalar noparabolik va parabolik dispersiya holatlari uchun solishtirildi. Grafik natijalar elektron energiya sathlarining elektr maydoni ortishi bilan pasayishini va to‘lqin funksiyalarning shaklida sezilarli o‘zgarishlar yuz berishini ko‘rsatadi. Tadqiqot natijalari kvant strukturali yarimo‘tkazgich qurilmalarining elektro-optik xossalari nazariy tushunishda muhim ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: nanoip, energiya satxi, to‘lqin funksiya, potensial o‘ra, yarimo‘tkazgich, chekli orttirmalar usuli.

Davlatov Abror
Namangan State University Associate Professor
E-mail: litsey111213@gmail.com
Muxiddinov Ramziddin
Namangan State University Master Student
Xasanov Shoxruxbek
Namangan State University Student
UDC: 621.315.592

ELECTRON ENERGY LEVELS AND WAVE FUNCTIONS IN AN InP/InAs/InP QUANTUM WELL UNDER ELECTRIC FIELD

Abstract: In this article, the effect of an external electric field on the energy levels and wave functions of electrons in an InP/InAs/InP quantum well structure is investigated. The influence of the quantum well width and the strength of the electric field on the energy spectrum is studied using various mathematical approaches, including the finite difference method, analytical, and variational methods. The results are compared for both nonparabolic and parabolic dispersion cases. The graphical results show that the electron energy levels decrease with increasing electric field strength, and significant changes occur in the shape of the wave functions. The findings are important for the theoretical

understanding of the electro-optical properties of quantum-structured semiconductor devices.

Key words: *nanowire, energy level, wave function, potential well, semiconductor, finite element method.*

Давлатов Абдор
Наманганский государственный университет Доцент
E-mail: litsey111213@gmail.com
Мухиддинов Рамзиддин
Наманганский государственный университет Магистр
Хасанов Шохрузбек
Наманганский государственный университет Студент
УДК: 621.315.592

УРОВНИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ И ВОЛНОВЫЕ ФУНКЦИИ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ InP/InAs/InP ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Аннотация: В данной статье исследуется влияние внешнего электрического поля на энергетические уровни и волновые функции электронов в структуре квантовой ямы InP/InAs/InP. Влияние ширины квантовой ямы и напряженности электрического поля на энергетический спектр изучается с использованием различных математических подходов, включая метод конечных разностей, аналитические и вариационные методы. Результаты сравниваются как для непараболического, так и для параболического случаев дисперсии. Графические результаты показывают, что энергетические уровни электронов уменьшаются с увеличением напряженности электрического поля, а в форме волновых функций происходят существенные изменения. Полученные результаты важны для теоретического понимания электрооптических свойств квантово-структурированных полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: *нанопроволока, уровень энергии, волновая функция, потенциальная яма, полупроводник, метод конечных элементов.*

KIRISH

So'nggi yillarda yarimo'tkazgich kvant o'ralarining fizikasi ilmiy tadqiqotlarning eng ilg'or yo'nalishlaridan biriga aylandi. Kvant o'ralarida elektron va teshiklarning harakati uch o'lchovda cheklangani tufayli, ularda energiya spektri diskret shaklga ega bo'ladi va bu holat an'anaviy bulk materiallardan keskin farq qiladi. InP/InAs/InP kabi kompozitsion kvant o'ralar yuqori elektron harakatchanligi, tor zonalar oralig'i va kuchli kvant qamash effektlari bilan ajralib

turadi. Aynan shunday tizimlar optoelektron qurilmalarda, masalan, yuqori sezgirlikka ega infraqizil detektorlar va kvant nuqta lazerlarida keng qo'llanmoqda.

Kvant o'ralarning fizik xossalari nafaqat ularning geometriyasi va material parametrlari, balki tashqi fizik omillar, xususan, elektr maydon ta'sirida ham o'zgaradi. Elektr maydon kvant o'ra ichidagi potensial quduqni qiyshaytiradi va elektronlarning fazoviy taqsimotiga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Bu hodisa kvant Stark effekti deb ataladi va u energiya sathlarining pastga siljishi, to'lqin funksiyalarining deformatsiyalanishi kabi natijalarda aks etadi. Shuning uchun elektr maydon ta'sirini chuqur o'rganish kvant qurilmalarining samaradorligini oshirish va yangi funksional imkoniyatlar yaratishda muhim ahamiyat kasb etadi.

Mazkur maqolada elektr maydon ta'sirida InP/InAs/InP kvant o'rasida elektronlarning energiya sathlari va to'lqin funksiyalarining xatti-harakati tahlil qilinadi. Tadqiqotda parabolik va noparabolik zonalar modeli hamda analitik, cheklangan orttirmalar va variatsion usullar qo'llanadi. Natijalar grafikli shaklda taqdim etiladi va fizik tahlil qilinadi.

Kvant o'ralarda elektr maydon ta'sirini o'rganish bo'yicha bir qator ilmiy ishlar mavjud. Shu jumladan, Bastard tomonidan yarimo'tkazgich kvant tizimlarida tashqi maydonlarning ta'siri tadqiq qilingan va parabolik hamda noparabolik zonalar modeli asosida yechimlar taklif etilgan [1]. Liu va hamkorlari esa elektr maydon ostida kvant o'ralarda elektronlarning energiya spektrini variatsion usul yordamida hisoblagan va bu metod samaradorligini ko'rsatgan [2]. InAs/InP tizimlari yuzasidan qilingan tadqiqotlar orasida Tang va kompaniyasi ishlarini alohida qayd etish mumkin. Ular elektr va magnit maydonlarning InAs kvant nuqtalaridagi elektron holatlariga ta'sirini chuqur o'rganishgan [3]. Shuningdek, Yoshita va boshqalar o'z ishlarida InAs/InP tizimlarining optik xususiyatlarini aniqlashda tashqi maydonlarning rolini eksperimental jihatdan tahlil qilishgan [4].

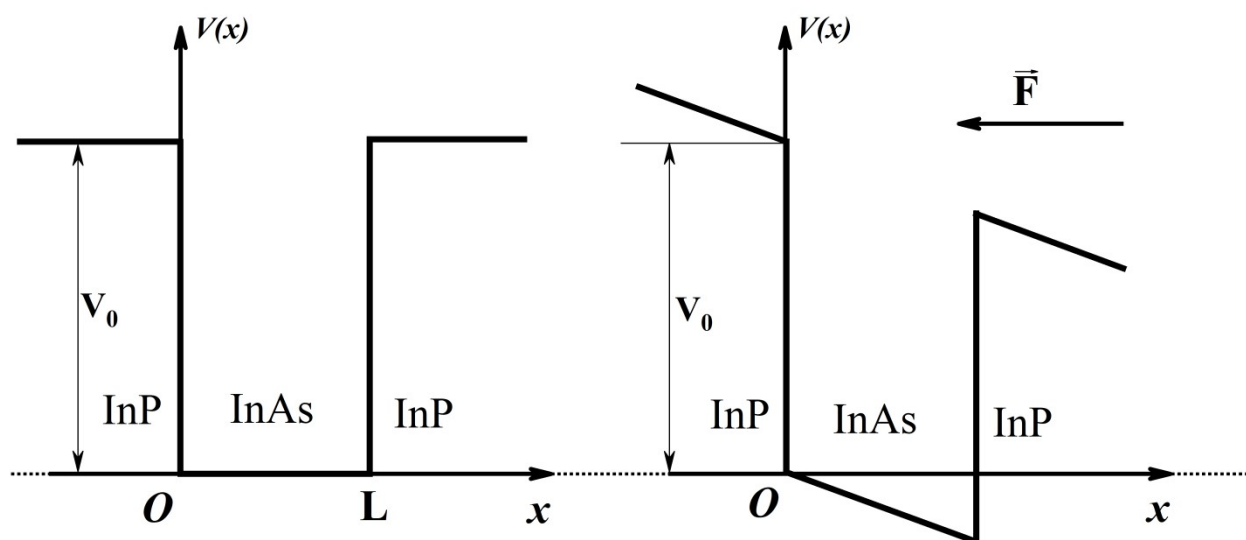
Noparabolik effektlarni hisobga olish zarurligi haqida Kane tomonidan taqdim etilgan model keng tarqalgan bo'lib, ushbu model elektronlarning yuqori energiyalarda xatti-harakatini aniqlash uchun muhim ahamiyatga ega [5]. Bu

model InP/InAs/InP tizimlarida ayniqsa dolzarb, chunki InAs materiali kichik zonalar oralig'iga ega va zonalar noparabolikligi sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

Umuman olganda, mavjud ilmiy ishlar elektr maydonning energiya spektri va to'liq funksiyalariga ta'siri kvant qurilmalar dizayni va ishlash printsiplarini chuqur tushunishda muhim ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatmoqda. Shu bilan birga, hozirgacha InP/InAs/InP kabi kompozitsion kvant o'ralarida elektr maydon ta'sirini har tomonlama o'rganish dolzarb masala bo'lib qolmoqda. Mazkur maqola aynan shu bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan.

NAZARIY QISM.

1-rasmda InP/InAs/InP heterostrukturasida hosil bo'luvchi kvant o'rasining potensial energiya profili tasvirlangan. Chap tomonda elektr maydonsiz holatdagi kvant o'rasi modeli ko'rsatilgan: bu yerda InAs qatlami ichida potensial o'ra va InP qatlami ichida V_0 balandlikdagi potensial to'siqlar mavjud. O'ng tomonda tashqi elektr maydon ($\vec{F}$) qo'yilganda hosil bo'ladigan potensial profilining deformatsiyasi aks ettirilgan. Elektr maydon natijasida potensial uchburchak shaklga o'zgaradi, bu esa energiya sathlarining joylashuvi va elektronlarning to'liq funksiyalariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Ushbu konfiguratsiya kuchli kvant effektlari va elektr maydon ta'siridagi energetik spektrlarni tadqiq qilish uchun muhim model hisoblanadi.



1-rasm. InP/InAs/InP kvant o‘rasi potensial profili: (chapda) elektr maydonsiz holat va (o‘ngda) elektr maydon ostidagi uchburchak shaklga deformatsiyalangan holat.

Tadqiq qilinayotgan sistema InP/InAs/InP kvant o‘rasi bo‘lib, bu yerda InAs qatlami potentsial o‘ra, InP esa potentsial to‘siq sifatida tanlangan. Tuzilmaga elektr maydon qo‘yilgan, bu esa potentsial profilini uchburchak shaklga deformatsiya qiladi (1-rasm). Elektronlar uchun bu sistema quyidagi bir o‘lchamli Shredinger tenglamasi bilan tavsiflanadi [6]:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*(x)} \frac{d}{dx} \right) \psi(x) + V(x) \psi(x) = E \psi(x) \quad (1)$$

Bunda, $V(x)$ – potentsial energiya, $m^*(x)$ – elektron effektiv massasi, $\psi(x)$ – elektron to‘lqin funksiyasi, E – elektron energiyasi, $\hbar$ – Plank doimiysi.

Potentsial energiya quyidagicha ifodalanadi:

$$V(x) = \begin{cases} V_1 = V_0 - \left(\frac{F}{\varepsilon_1} \right) x, & x < 0 \\ V_2 = - \left(\frac{F}{\varepsilon_2} \right) x, & 0 < x < L \\ V_3 = V_0 - \left(\frac{F}{\varepsilon_1} \right) x, & x > L \end{cases} \quad (2)$$

Bunda, V_0 – InP/InAs/InP potentsial o‘ra chuqurligi, ε_1 – InP va ε_2 – InAs lar uchun dielektrik singdiruvchanlik, F – elektr maydon kuchlanganligi, L – potentsial o‘ra kengligi.

Effektiv massa quyidagicha ifodalanadi [7]:

$$m^*(x) = \begin{cases} m_1^* = m_1^*(0) (1 + \alpha_1 (E - V_0)), & x < 0 \\ m_2^* = m_2^*(0) (1 + \alpha_2 E), & 0 < x < L \\ m_1^* = m_1^*(0) (1 + \alpha_1 (E - V_0)), & x > L \end{cases} \quad (3)$$

Bunda, $m_1^*(0)$ – elektronning o‘tkazuvchanlik zonasi tubidagi effektiv massasi, α_1 – InP va α_2 – InAs lar uchun neparaboliklik koeffitsienti.

Analitik usul.

Shredinger tenglamasining yechimlari quyidagicha qidiriladi:

$$\psi(x) = \begin{cases} \psi_1(x) = C_1 \text{Ai}(k_1), x < 0 \\ \psi_2(x) = C_2 \text{Ai}(k_2) + C_3 \text{Bi}(k_2), 0 < x < L \\ \psi_3(x) = C_4 \text{Bi}(k_1), x > L \end{cases} \quad (4)$$

Bunda $\text{Ai}(x)$ va $\text{Bi}(x)$ lar Airy funksiyalari hisoblanadi. k_1 va k_2 lar esa quyidagilarga teng bo'ladi.

$$k_1 = -\left(\frac{2m_1}{\hbar^2} \left(\frac{F}{\varepsilon_1}\right)\right)^{1/3} \left(x + \frac{E - V_0}{F/\varepsilon_1}\right), \quad k_2 = -\left(\frac{2m_2}{\hbar^2} \left(\frac{F}{\varepsilon_2}\right)\right)^{1/3} \left(x + \frac{E}{F/\varepsilon_2}\right)$$

Bu yerda, C_1, C_2, C_3 va C_4 lar chegaraviy shartlardan topilishi mumkin bo'lgan o'zgarmas kattaliklardir. Potensial to'siq va o'ra chegarasini to'lqin funksiya uzluksiz ekanligidan:

$$\begin{aligned} \psi_1(0) &= \psi_2(0) \\ \psi_2(L) &= \psi_3(L) \\ \frac{1}{m_1} \frac{d\psi_1(x)}{dx} \Big|_{x=0} &= \frac{1}{m_2} \frac{d\psi_2(x)}{dx} \Big|_{x=0} \\ \frac{1}{m_2} \frac{d\psi_2(x)}{dx} \Big|_{x=L} &= \frac{1}{m_1} \frac{d\psi_3(x)}{dx} \Big|_{x=L} \end{aligned} \quad (5)$$

Zarra potensial o'rada aniqlangan bo'lishi uchun, uning topilish ehtimollogi 1 ga teng bo'lishi kerak:

$$\int_{-\infty}^0 |\psi_1(x)|^2 dx + \int_0^L |\psi_2(x)|^2 dx + \int_L^{\infty} |\psi_3(x)|^2 dx = 1 \quad (6)$$

Keltirilgan (5) va (6) tenglamalardan foydalanib, elektr maydonda joylashgan potensial o'radagi elektronlar energiya satxlari va to'lqin fuksiyalarini aniqlash mumkin.

Variatsion usul

Kvant mexanikasida murakkab potentsiallarga ega bo'lgan tizimlar uchun Shredinger tenglamasining aniq yechimini topish ko'pincha imkonsiz bo'ladi. Bunday hollarda variatsion usul samarali va qulay yondashuv sifatida keng qo'llaniladi. Variatsion prinsip asosida qurilgan bu metod tizimning asosiy (minimal) energiyasini aniqlash uchun ishlatiladi. Asosiy g'oya shundan iboratki, har qanday normalizatsiyalangan test funksiyasi uchun olingan energiya qiymati

haqiqiy asosiy sath energiyasidan hech qachon kichik bo'lmaydi. Matematik ifodasi quyidagicha:

$$E(\alpha) = \frac{\int \psi_i^*(x, \alpha) \hat{H} \psi_i(x, \alpha) dx}{\int \psi_i^*(x, \alpha) \psi_i(x, \alpha) dx} \quad (7)$$

Variatsion usulning afzalligi shundaki, u har xil shakldagi potentsiallar uchun qulay va oddiy test funksiyalar bilan ham yaxshi natija beradi. Shu bilan birga, uning aniqligi tanlangan test funksiyaning tizimga mosligiga bog'liq. Misol tariqasida, elektr maydon ta'siridagi kvant quduq uchun test funksiyasi sifatida Airy funksiyalar yoki eksponentsial sinusoidal funksiyalar tanlansa, yuqori aniqlikdagi natijalar olish mumkin bo'ladi.

Bu holat uchun Gamilton funksiyasi quyidagicha ko'rinishni oladi:

$$\hat{H} = \frac{-\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*(x)} \frac{d}{dx} \right) + V(x)$$

Biz chekli chuqur potentsial o'ra uchun elektronlar to'lqin funksiyasini quyidagicha tanlab olamiz:

$$\psi_i(x) = \begin{cases} A \exp \left[(q_0 - \alpha) \frac{x}{L} \right], & x < 0 \\ B \sin \left[k_0 \frac{x}{L} + \delta \right] \exp \left[-\alpha \frac{x}{L} \right], & 0 < x < L \\ C \exp \left[-(q_0 + \alpha) \frac{x}{L} \right], & x > L \end{cases} \quad (8)$$

Bunda, $q_0 = \sqrt{\frac{2m_1^* L^2}{\hbar^2} (V_0 - E_1)}$, $k_0 = \sqrt{\frac{2m_2^* L^2}{\hbar^2} E_1}$ va α — variatsion parameter. To'lqin funksiya uchun qo'yiladigan chegaraviy shartlar va (7) ifodaga (8) ni tatbiq etib, energiya sathlari hamda to'lqin funksiyalarini aniqlash mumkin.

Chekli orttirmalar usuli.

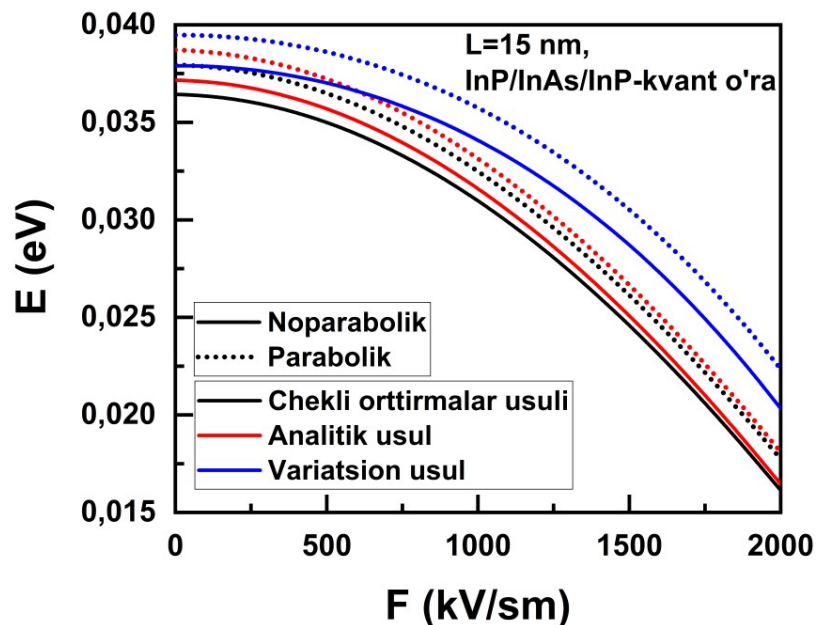
Kvant o'radagi elektronlarning energiya sathlarini aniqlash uchun qo'llaniladigan samarali raqamli usullardan biri bu chekli orttirmalar usuli hisoblanadi. Bu metod chegaraviy qiymatlari bilan berilgan Shredinger tenglamasining xususiy qiymat masalasini yechishda keng qo'llaniladi. Ushbu yondashuvda energiya qiymati dastlab taxmin qilinadi va differensial tenglama

o'raning bir chekkasidan ikkinchisigacha raqamli integratsiya qilinadi. Ikkinchi chekkada chegaraviy shartlar bajarilishi tekshiriladi. Agar chegaraviy shartlarga moslik topilmasa, energiya qiymati o'zgartiriladi va jarayon iteratsiya qilinadi. Keyinchalik, Runge-Kutta yoki boshqa barqaror integratsiya algoritmi yordamida to'lqin funksiyasi o'raning o'ng chekkasigacha hisoblab chiqiladi. Bu yerda uzluksizlik shartlari tekshiriladi va natija energiya qiymatining qanchalik to'g'ri tanlangani haqida ma'lumot beradi.

$$\psi_{i+1} = \left[1 + \frac{(m_i + m_{i+1}) \left[4 + (\alpha_i + \alpha_{i+1}) (2E - (V_i + V_{i+1})) \right]}{(m_{i-1} + m_i) \left[4 + (\alpha_{i-1} + \alpha_i) (2E - (V_{i-1} + V_i)) \right]} \right. \\ \left. - (m_i + m_{i+1}) \left[4 + (\alpha_i + \alpha_{i+1}) (2E - (V_i + V_{i+1})) \right] \frac{(E - V_i)}{8E_0} \right] \psi_i \\ - \frac{(m_i + m_{i+1}) \left[4 + (\alpha_i + \alpha_{i+1}) (2E - (V_i + V_{i+1})) \right]}{(m_{i-1} + m_i) \left[4 + (\alpha_{i-1} + \alpha_i) (2E - (V_{i-1} + V_i)) \right]} \psi_{i-1} \quad (9)$$

Chekli orttirmalar usuli orqali elektronlarning energiya sathlari va ularga mos keladigan to'lqin funksiyalari yuqori aniqlik bilan hisoblab chiqiladi, bu esa kvant tizimining fizik xususiyatlarini chuqur tushunish imkonini beradi.

NATIJALAR VA MULOXAZALAR.



2-rasm. InP/InAs/InP kvant o'rasida elektron energiya sathining elektr maydon kuchlanishiga bog'liqligi ($L = 15$ nm uchun)

2-rasmda keltirilgan grafikda InP/InAs/InP kvant o'rasi uchun elektronning asosiy energiya sathi (E) ning tashqi elektr maydon kuchlanishi (F) ga bog'liqligi ko'rsatilgan. Grafikdagi hisob-kitoblar kvant o'ra qalinligi $L=15$ nm bo'lgan holatda bajarilgan. Kvant o'ralarida elektronlarning energiya spektri va ularning fazoviy taqsimoti turli tashqi omillar, jumladan elektr maydon ta'sirida sezilarli darajada o'zgaradi. Grafikda uch xil hisoblash usuli va ikki xil zonal model (noparabolik va parabolik) natijalari keltirilgan: Chekli orttirmalar usuli (qora rang), Analitik usul (qizil rang), Variatsion usul (ko'k rang).

Parabolik va noparabolik zonalar farqi ham ko'rsatilgan (mos ravishda nuqtali va uzluksiz chiziqlar). Parabolik zonalar modeli elektronlarning energiyasi impulsning kvadrati bilan chiziqli bog'liqligini qabul qiladi. Ammo real holatda, ayniqsa yuqori energiya diapazonlarida va kichik o'lchamli strukturada, zonaning noparabolikligi sezilarli bo'lib, Kane modeli yordamida tasvirlanadi. Noparaboliklikni hisobga olish kvant o'ra ichidagi elektronlarning aniqroq energiya darajalarini olishga imkon beradi.

Grafik shuni ko'rsatadiki, elektr maydon kuchi ortgani sari elektronning asosiy energiya sathi kamayib boradi. Bu hodisa Stark effekti bilan tushuntiriladi: tashqi elektr maydon kvant o'ra ichidagi potensialni qiyshaytiradi va natijada energiya sathi pastga siljiydi. Ushbu hodisa kvant o'ralarida o'ziga xos xususiyatlarga ega, chunki elektr maydon kuchlanishi ortishi bilan energiya darajalari parabolik shaklda emas, balki murakkabroq tarzda o'zgaradi.

Grafikdan ko'rinib turibdi, noparabolik zonalarda energiya darajalari parabolik zonalarga qaraganda ancha past joylashgan. Bu shuni anglatadiki, zonaning noparabolikligi hisobga olinganda elektronlar energiya spektri sezilarli darajada torayadi. Bu xususiyat optoelektron qurilmalar dizayni uchun muhim ahamiyatga ega, chunki kvant samaradorligini va fotoluminesans xususiyatlarini boshqarishda aniqlik talab etiladi.

Hisoblash metodlari tahlil qilinsa, chekli orttirmalar usuli eng aniq natijalarni beradi, chunki bu usulda kvant o'raning differensial tenglamalari

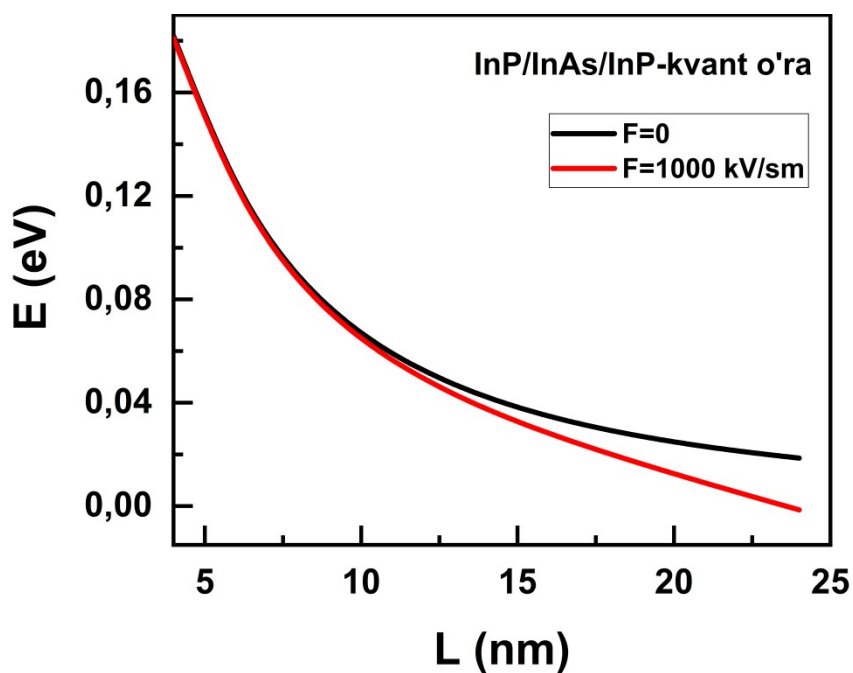
raqamli yechiladi. Analitik va variatsion usullar esa ba'zi taxminlarga asoslanadi va shuning uchun ayrim holatlarda farq qiladi. Grafikda bu usullar natijalari orasida kichik tafovutlar kuzatiladi, ayniqsa yuqori kuchlanishlarda.

Natijalarni fizik jihatdan tahlil qilganda, kvant o'ra tizimida elektr maydon ta'siri quyidagi jarayonlarga olib keladi:

Energiyaning pasayishi: elektr maydon intensivligi ortgani sari asosiy energiya sathi tushadi, bu esa optik o'tishlarning spektrini qizil tomonga suradi.

Kvant effektlarining kuchayishi: kichik o'lchamli kvant o'ralarda elektr maydon ta'sirida elektron va teshiklarning lokalizatsiyasi kuchayadi.

Zonal noparaboliklik ta'siri: katta energiya diapazonida noparaboliklik hisobga olinmaganda energiya darajalari noto'g'ri baholanadi.

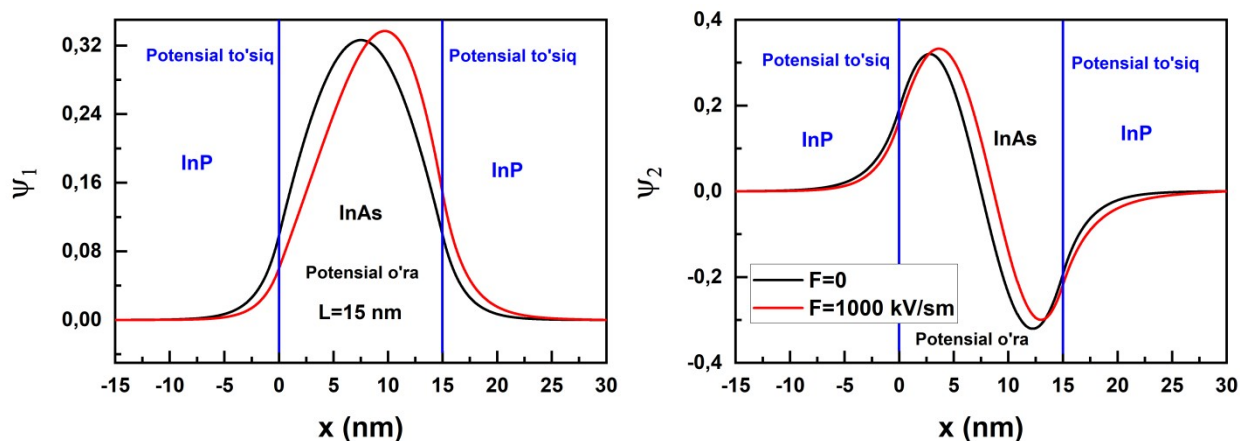


3-rasm. InP/InAs/InP kvant o'rasida elektron energiya sathining kvant o'ra qalinligiga bog'liqligi (elektr maydon mavjud va mavjud emas holatlar uchun)

3-rasmda keltirilgan grafikda InP/InAs/InP kvant o'rasida elektron asosiy energiya sathining kvant o'ra qalinligi L ga bog'liqligi tasvirlangan. Grafikda ikki holat ko'rsatilgan: elektr maydon yo'qligida (qora chiziqlik) va elektr maydon mavjud bo'lganida (qizil chiziqlik, F=1000 kV/sm). Grafikdan ko'rinib turibdiki, kvant o'ra qalinligi oshgani sayin elektron energiya sathi pasayib boradi. Bu hodisa

kvant qamash effekti bilan izohlanadi: kvant o'ralarda elektronlar energiyasi qamrov kuchiga bog'liq bo'lib, qamrov kuchli bo'lsa (ya'ni L kichik bo'lsa), energiya darajalari yuqori bo'ladi; aksincha, qamrov kuchsizlanganda (katta L) energiya sathi pasayadi. Kvant o'lcham effekti sifatida tanilgan bu hodisa kvant mexanikasi qonunlariga muvofiq keladi.

Grafikda shuningdek elektr maydon ta'siri yaqqol ko'zga tashlanadi. Elektr maydon mavjud bo'lgan holatda (qizil chiziq), barcha L qiymatlarida energiya sathi pasaygan. Bu kvant Shtark effekti bilan izohlanadi: elektr maydon kvant o'ra ichidagi potensial quduqni qiyshaytiradi va elektronning fazoviy taqsimotiga ta'sir ko'rsatadi, natijada energiya darajasi pastga siljiydi. Ayniqsa katta L qiymatlarida bu effekt yanada kuchliroq namoyon bo'ladi, chunki qalin kvant o'ralarda elektronlar elektr maydonga sezgirroq bo'ladi.



4-rasm. InP/InAs/InP kvant o'rasida birinchi (ψ_1 , chapda) va birinchi qo'zg'algan (ψ_2 , o'ngda) holatlar uchun to'lqin funksiyalarining x (nm) koordinata bo'yicha taqsimoti. Qora chiziq — elektr maydon yo'qligida ($F = 0$), qizil chiziq — tashqi elektr maydon mavjud ($F = 1000$ kV/sm) holatida.

4-rasmda keltirilgan grafiklar InP/InAs/InP geterostrukturasidan tashkil topgan kvant o'rasida elektronlarning birinchi va ikkinchi holatdagi to'lqin funksiyalarining (ψ_1 va ψ_2) x koordinata bo'yicha taqsimotini tasvirlaydi. Grafiklarning chap panelida (ψ_1), ya'ni asosiy holatdagi to'lqin funksiyasi, o'ng panelida esa (ψ_2) birinchi qo'zg'algan holatdagi to'lqin funksiyasi keltirilgan. Har

ikkala grafikda ham qora chiziq tashqi elektr maydonsiz holatga ($F=0$), qizil chiziq esa kuchli elektr maydon ($F=1000$ kV/sm) ta'sirida olingan natijalarni ifodalaydi.

To'lqin funksiyalari kvant mexanik tizimda zarracha (bu holda elektron) fazodagi ehtimollik zichligini bildiradi. ψ_1 (chap grafik) asosiy holatdagi elektronning to'lqin funksiyasini, ψ_2 (o'ng grafik) esa birinchi qo'zg'algan holatni bildiradi. Tashqi elektr maydon yo'qligida (qora chiziq) to'lqin funksiyalari simmetrik bo'lib, ularning maksimumi kvant o'raning markazida joylashgan. Elektron asosan kvant o'ra ichida bo'lib, to'siqlarga nisbatan eksponensial ravishda so'nadi.

Qizil chiziqlar elektr maydon ($F=1000$ kV/sm) ta'sirida elektronlarning to'lqin funksiyasining qanday o'zgarishini ko'rsatadi. Bu effekt Shtark effekti deb ataladi — tashqi elektr maydon ta'sirida energiya sathlarining siljishi va to'lqin funksiyalarining deformatsiyasi sodir bo'ladi. Grafikdan ko'rinib turibdiki, elektr maydon mavjud bo'lgan holatda to'lqin funksiyalar asimmetrik shaklga ega bo'ladi. ψ_1 (chapda) o'z maksimumini biroz o'ngga siljitadi, bu esa elektronning ehtimollik zichligi kvant o'raning o'ng tomoniga ko'chganini anglatadi. ψ_2 holatidagi to'lqin funksiyada esa yanada kuchli siljish va deformatsiya kuzatiladi, bu esa yuqoriroq energiya holatlarining tashqi ta'sirlarga nisbatan sezuvchanroq ekanligidan dalolat beradi.

Elektr maydon kvant o'ra ichida chiziqli potensialni hosil qiladi. Bu esa elektronning potensial energiyasiga chiziqli qo'shilma qo'shilishi, ya'ni potensial o'raning nishabligi ortishiga olib keladi. Natijada elektron to'lqin funksiyasi o'ra ichida bir tomonga og'adi — bu fizik jihatdan elektronning elektr maydon bo'yicha qarama-qarshi yo'nalishda siljish tendensiyasidir. Bu holat, ayniqsa, kvant qurilmalarida, masalan, kvant nuqtalarida yoki lazerlarda ishlatiladigan strukturalarda muhim ahamiyatga ega bo'lib, ular energiya sathlarini tashqi maydon yordamida boshqarishga imkon beradi.

Yuqoridagi grafiklar elektr maydonining kvant o'radagi elektronlarning holatiga qanday ta'sir qilishi haqida muhim ma'lumot beradi. Asosiy va birinchi qo'zg'algan holatdagi to'lqin funksiyalarning siljishi energiya sathlarining

o'zgarishini anglatadi, bu esa kvant strukturali qurilmalar dizaynida hisobga olinishi zarur bo'lgan parametrdir. Shu bilan birga, elektr maydon yordamida energiya sathlari va to'liq funksiyalarini boshqarish mumkinligi, ushbu strukturalarni optoelektronika, lazer fizikasi va kvant informatikasi sohalarida qo'llash imkoniyatini kengaytiradi.

Bu natijalar kvant o'ra asosidagi optoelektron qurilmalar uchun katta amaliy ahamiyatga ega. Masalan, lazerlar va fotodetektorlar ishlab chiqarishda elektr maydon yordamida chiqish to'liq uzunligini dinamik boshqarish mumkin. Shuningdek, energiya sathining elektr maydon ta'sirida siljishi qurilmalarni sezgirlik jihatidan yaxshilashga yordam beradi.

XULOSA

Olib borilgan nazariy tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, InP/InAs/InP kvant o'rasida elektr maydonining oshishi elektronlarning energiya sathlarini pasaytiradi va to'liq funksiyalarining simmetriyasini buzadi. Cheklangan orttirmalar usuli natijalari boshqa yondashuvlar bilan yaxshi mos keladi va tizimning nozik parametrlarini hisobga olish imkonini beradi. Parabolik va noparabolik dispersiya modellari orasidagi farq yuqori elektr maydon kuchlarida sezilarli bo'lib, bu esa dispersiya xususiyatlarining kvant tizimlaridagi ahamiyatini tasdiqlaydi. Tadqiqot natijalari kvant o'ralarning elektro-optik qurilmalarda qo'llanilishida elektr maydoni orqali boshqarish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar.

1. Bastard, G. "Electric-field effect on semiconductor quantum wells." *Physical Review B*, 24(10), 5693–5697. (1981).
2. Liu, Z., et al. "Variational study of Stark effect in quantum wells." *Journal of Applied Physics*, 74(1), 487–491. (1993).
3. Tang, J., et al. "Quantum confined Stark effect in InAs/InP quantum dots." *Applied Physics Letters*, 84(18), 3505–3507. (2004).

4. Yoshita, M., et al. "Electric field effects in InAs/InP quantum dots." *Journal of Crystal Growth*, 278(1-4), 36–42. (2005).
5. Kane, E.O. "Band structure of indium antimonide." *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1(4), 249–261. (1957).
6. A. Davlatov, G. Gulyamov, A. Nabiyev, E. Feddi, K. Feddi, A. Abdulkarimov, A. Botirjonov, Unraveling the effects of nonparabolicity on electron energy levels in InP/InAs/InP heterostructures. *Physica Scripta*. 99, 075933 (2024).
7. G. Gulyamov, A. Gulyamov, A. Davlatov, K. N. Juraev, Energy levels in nanowires and nanorods with a finite potential well, *Advances in Condensed Matter Physics* 2020 (2020) 4945080