

Davlatov Abror

Namangan davlat universiteti dotsenti

E-mail: litsey111213@gmail.com

Abdulazizov Bahrom

Namangan davlat universiteti professori

O'rinboyev Dostonbek

Namangan davlat texnika universiteti doktoranti

UO'T: 621.315.592

+99899 977 06 09

InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan InAs

nanonuqtaning chiziqli va nochiziqli optik xossalari.

Annotatsiya: Ushbu ishda InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonuqtaning chiziqli va nochiziqli optik xususiyatlari nazariy jihatdan o'rganildi. Tadqiqotda elektronlarning kvant cheklanishi hisobga olingan holda, ularning energiya sathlari, optik o'tish energiyalari, dipol matritsa elementlari va optik yutilish ko'rsatkichi geometrik parametrlarga bog'liq ravishda tahlil qilindi. Natijalarga ko'ra, nanonuka va nanoip yadrosi o'lchamlarining o'zaro nisbati (a/b) strukturaning optik va nochiziqli javoblariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlangan. Tadqiqot natijalari kvant nuqta lazerlari, fotodetektorlar, optik modulyatorlar kabi nanooptoelektron qurilmalarni loyihalashda geometrik boshqaruv orqali optik xossalarni aniq sozlash imkoniyatini.

Kalit so'zlar: Kvant cheklanish, chiziqli va nochiziqli optik xossalar, optik yutilish, dipol matritsa elementi, nanofotonika.

Давлатов Аброр

Наманганский государственный университет Доцент

E-mail: litsey111213@gmail.com

Абдулазизов Бахром

Наманганский государственный университет Профессор

Ўринбоев Достон

Наманганский государственный технический университет Докторант

УДК: 621.315.592

+99899 977 06 09

Линейные и нелинейные оптические свойства квантовой точки InAs в

гетероструктурном нановолокне InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP

Аннотация: В этом исследовании были теоретически исследованы линейные и нелинейные оптические свойства кубической квантовой точки InAs, встроенной в гетероструктурную нанопроволоку InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP.

Принимая во внимание эффекты квантового ограничения для электронов, энергетические уровни, энергии межподзонных оптических переходов, элементы дипольной матрицы и коэффициенты оптического поглощения были проанализированы как функции геометрических параметров. Результаты показывают, что относительное соотношение размеров (a/b) между квантовой точкой и ядром нанопроволоки оказывает значительное влияние на оптические и нелинейные отклики системы. Эти результаты демонстрируют, что путем точного управления геометрическими параметрами можно эффективно настраивать оптические свойства структуры, предоставляя ценную информацию для проектирования нано-оптоэлектронных устройств, таких как лазеры на квантовых точках, фотодетекторы и оптические модуляторы.

Ключевые слова: Квантовое ограничение, линейные и нелинейные оптические свойства, оптическое поглощение, элемент дипольной матрицы, нанофотоника.

Davlatov Abror

Namangan State University Associate Professor

E-mail: litsey111213@gmail.com

Abdulazizov Bakhrom

Namangan State University Professor

O'rinboyev Doston

Namangan State Technical University PhD student

UDC: 621.315.592

+99899 977 06 09

Linear and Nonlinear Optical Properties of InAs Quantum Dot Embedded in InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP Heterostructure Nanowire.

Abstract: In this study, the linear and nonlinear optical properties of a cubic InAs quantum dot embedded within an InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP heterostructured nanowire were theoretically investigated. Considering quantum confinement effects for electrons, the energy levels, intersubband optical transition energies, dipole matrix elements and optical absorption coefficients variations were analyzed as functions of the geometrical parameters. The results show that the relative size ratio (a/b) between the quantum dot and the nanowire core has a significant influence on the optical and nonlinear responses of the system. These findings demonstrate that by precisely controlling the geometric parameters, it is possible to effectively tune the optical properties of the structure, providing

valuable insights for the design of nano-optoelectronic devices such as quantum dot lasers, photodetectors, and optical modulators.

Key words: *Quantum confinement, linear and nonlinear optical properties, optical absorption, dipole matrix element, nanophotonics.*

Kirish. Hozirgi zamon nanoelektronika va nanofotonika sohalarida kvant o'lchamdagi tuzilmalarning, ayniqsa kvant nuqtalarining (quantum dots) o'rni beqiyosdir. Kvant nuqtalarining o'ziga xos jihati shundaki, ularning fazoviy o'lchamlari bir necha nanometr bo'lib, bu ularni uch o'lchamda kvant cheklangan tizim sifatida qarash imkonini beradi. Shu sababli kvant nuqtalarda elektron va teshiklarning energiya sathlari diskret bo'lib, bu ularning elektr, optik va nochiziqli optik xossalarga kuchli ta'sir ko'rsatadi.

Kvant nuqtalarning nazariy va amaliy jihatdan o'rganilishi hozirgi kunda juda dolzarb masalalardan biri bo'lib, ular asosida yuqori samarali kvant nuqta lazerlari, infraqizil detektorlar, yuqori sezgirlikka ega bo'lgan optoelektron modulyatorlar va boshqa ko'plab ilg'or qurilmalar ishlab chiqilmoqda. Shu bilan birga, nano o'lchamdagi geterotuzilmalar yordamida optik xossalarni boshqarish, chiziqli va nochiziqli optik javoblarni geometrik parametrlar orqali moslashtirish imkoniyatlari kengaymoqda.

Xususan, InP/InAs/InP asosidagi geterotuzilmalar kvant nuqtali tizimlar uchun juda qulay platforma bo'lib xizmat qiladi. InAs materialining kichik band gapga ega bo'lishi va InP materialining keng band gap bilan ajralib turishi bu ikki material o'rtasida kuchli potensial to'siq hosil qilish imkonini beradi. Bunday geterotuzilmalarda InAs kvant nuqtalarida elektronlarning kuchli kvant cheklanishi yuzaga keladi.

Shu nuqtai nazardan, InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmasidagi InAs nanonuktaning chiziqli va nochiziqli optik xossalarni o'rganish ilm-fan va amaliyot uchun muhim ahamiyat kasb etadi. Bu kabi tizimlarda elektronlarning energiya sathlari, optik o'tish energiyalari, dipol matritsa elementlari va optik yutilish koeffitsientlarini aniqlash, ularning geometrik parametrlar bilan bog'liqligini o'rganish orqali optik boshqaruv imkoniyatlari tahlil qilinadi.

So'nggi yillarda kvant nuqtalar asosida yaratilgan strukturalarning optik va nochiziqli optik xossalari bo'yicha ko'plab ilmiy ishlar olib borilgan. Masalan, Bimberg va hammualliflari [1] kvant nuqtalarining optik xossalarni chuqur o'rganib, ularning diskret energiya sathlari asosida optoelektron qurilmalar samaradorligini oshirish mumkinligini isbotladilar. Shu bilan birga, Harrison [2] tomonidan kvant nuqtalardagi energiya spektrlari va kvant cheklanish effektlari nazariy jihatdan tahlil qilingan.

Kvant nuqtalarda nochiziqli optik javoblarni tahlil qilish bo'yicha Ekimov va Onushchenko [3] ning ishlari alohida e'tiborga molik. Ular kichik o'lchamdagi

yarim o'tkazgichli zarralarda kvant cheklanishi natijasida optik so'rilish chekka chiziqlarining siljishini eksperimental tarzda aniqlashgan.

Nochiziqli optik xususiyatlar, xususan ikkinchi va uchinchi garmonik avlod (SHG va THG) bo'yicha Bahae va boshqalar [4] tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda SHG va THG intensivliklarining struktura o'lchamlariga sezgirligi va bu hodisalar orqali optik boshqaruv imkoniyatlari ochib berilgan.

Shuningdek, kvant nuqtalardagi sinish ko'rsatkichi va optik yutilish o'zgarishlari bo'yicha Alivisatos [5] kvant nuqtalar asosida tayyorlangan kolloid tizimlarning optik xossalarini chuqur o'rgangan va ularning geometrik boshqarish orqali optik rezonanslarni sozlash mumkinligini ko'rsatgan.

Kramers-Kronig munosabatlari orqali optik yutilish va sinish ko'rsatkichlari o'rtasidagi bog'liqlik C. F. Bohren va D. R. Huffman [6] tomonidan batafsil yoritilgan bo'lib, bu nazariy asos kvant nuqta strukturalari uchun ham dolzarbdir. Yuqoridagi adabiyotlar shuni ko'rsatadiki, kvant nuqta asosida yaratilgan tizimlarning chiziqli va nochiziqli optik xossalarini geometrik va material parametrlari orqali boshqarish zamonaviy nanofotonik va kvant optikasi qurilmalarining rivojlanishida hal qiluvchi rol o'ynaydi.

Shuningdek, geometrik parametrlar, material tanlovi, tashqi ta'sirlar (elektr maydon, bosim, harorat) orqali kvant nuqta tizimlarini optimallashtirish bo'yicha ham ilmiy izlanishlar faollashib bormoqda. Bu borada Bryant [7] va Ferreira [8] kabi tadqiqotchilar tomonidan olingan natijalar kvant nuqtalar asosida yaratilgan strukturalarning nazorat qilinuvchi optik javoblari, ya'ni chiziqli va nochiziqli javoblarning kuchi va chastotasini aniqlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Shu sababli, ushbu tadqiqotda InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonuqtaning optik va nochiziqli optik xossalari kompleks nazariy tahlil asosida chuqur o'rganildi. Ushbu ish amaldagi ilmiy tadqiqotlarning mantiqiy davomidir va yangi natijalar orqali nano-optoelektron qurilmalarni yaratishda muhim yo'nalishlarni taklif qiladi.

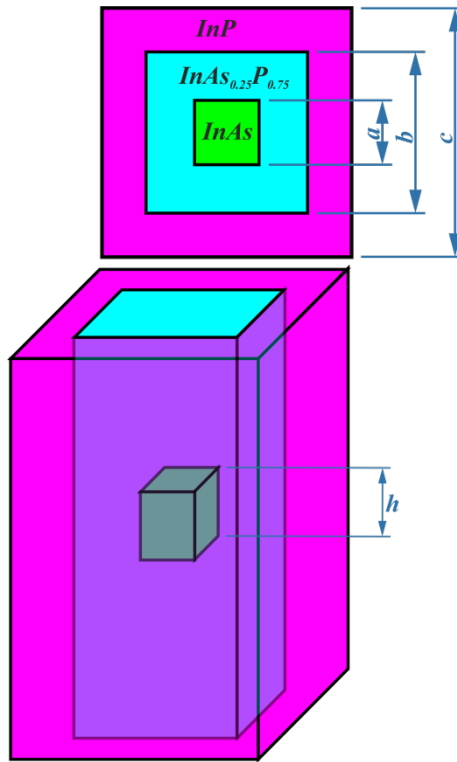
Nazariy qism.

Tadqiq qilinayotgan sistema InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonuqta sistemasi bo'lib, bu yerda InP tashqi qatlam, InAs_{0.25}P_{0.75} o'rta qatlam va InAs esa kvant nuqta sifatida tanlangan. Bu sistemaning geometric tuzilishi 1-rasmda keltirilgan. Elektronlar uchun bu sistema quyidagi bir o'lchamli Shredinger tenglamasi bilan tavsiflanadi [9]:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \left(\nabla \frac{1}{m^*(x, y, z)} \nabla \right) \psi(x, y, z) + V(x, y, z) \psi(x, y, z) = E \psi(x, y, z) \quad (1)$$

Bunda, $V(x, y, z)$ – potensial energiya, $m^*(x, y, z)$ – elektron effektiv massasi, $\psi(x, y, z)$ – elektron to'liqin funksiyasi, E – elektron energiyasi, ∇ – Nabli operatori, $\hbar$ – Plank doimiysi.

1-rasmda InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonuvta sistemasi uchun geometrik sxema keltirilgan. Bu turdagi murakkab uch komponentli geterotuzilma – nanooptik va nanoelektron qurilmalar uchun istiqbolli kvant tizimlardan biridir. InAs nanonuvta (yashil kub): Markaziy qismda joylashgan bu kubik kvant nuqta (quantum dot) yarim o'tkazgich ichidagi zarralar uchun kuchli kvant cheklanishini hosil qiladi. Ushbu nanonuvta kub shaklida bo'lib, uning o'lchami **a** bilan belgilanadi. Kvant nuqta ichida energiya sathlari diskret qiymatga ega bo'lib, elektr va optik xususiyatlarga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatadi. InAs_{0.25}P_{0.75} nanoip yadrosi (ko'k qatlam): InAs nanonuvqtani o'rab turgan soxa yarim o'tkazgichli aralash qotishmadan tashkil topgan bo'lib, bu soxada materialning effektiv potentsiali, panjara doimiysi va effektiv massasi InAs va InP komponentlari nisbatiga bog'liq ravishda o'zgaradi. Bu qatlam kvant nuqta bilan tashqi qobiq o'rtasidagi muhit bo'lib xizmat qiladi. Uning o'lchami **b** bilan belgilanadi. InP tashqi qobig'i (pushti tashqi qatlam): Butun struktura InP materialidan tashkil topgan qattiq qobiq bilan o'ralgan. Bu qobiq nanoipga tashqi mexanik barqarorlik beradi va tashqi elektr yoki bosim ta'siri orqali elektron holatlarga ta'sir ko'rsatishi mumkin. InP materialining taqiqlangan zonasi keng energiyali bo'lganligi (band gap) sababli, elektronlar va teshiklar InAs yoki InAsP soxada to'planadi va InP qatlam orqali potensial to'siq hosil bo'ladi. Tashqi qobiqning umumiy o'lchami **c** bilan ifodalanadi. 3D ko'rinishda butun strukturani cho'zilgan nanoip shaklida ko'rish mumkin. Bu balandlik bo'yicha strukturada cheklanish kuchi sustroq bo'lishi mumkin, bu esa holatlarning energiyasiga qo'shimcha noizotropik ta'sir ko'rsatadi.



1-rasm. InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonuka sistemasi uchun geometrik sxema.

Ushbu uch qatlamli geterostruktura real yarim o'tkazgichli nanokompozitlarning ideal modellaridan biri bo'lib, kvant cheklanish effektlarini, energiya sathlarining harorat va tashqi bosimga bog'liqligini, shuningdek, optik yutilish va fotolyminessensiya spektrlari kabi xususiyatlarni modellashtrish va tahlil qilishda keng qo'llaniladi.

Shuni ta'kidlash kerakki, bu turdagi strukturalar ichida panjaraviy mos kelmaslik mavjud bo'lib, u elastik deformatsiyalarni keltirib chiqaradi. Bu esa navbatdagi bosqichda valent zonasi va o'tkazuvchanlik zonasi chegaralarining egilishi, effektiv massalarning o'zgarishi hamda elektron teshik juftliklarining qayta taqsimlanishiga olib keladi. Bundan tashqari, haroratning o'zgarishi yoki tashqi bosim ta'siri ostida bu struktura sezilarli termodinamik yoki optik javoblar ko'rsatadi.

Potensial energiya quyidagicha ifodalanadi:

$$V(x, y) = \begin{cases} V_1, & (x, y) \in (-\infty, 0) \times (-\infty, 0) \cup (c_x, \infty) \times (c_y, \infty) \\ V_2, & (x, y) \in (0, a_x) \times (0, a_y) \cup (b_x, c_x) \times (b_y, c_y) \\ 0, & (x, y) \in (a_x, b_x) \times (a_y, b_y) \end{cases} \quad (2)$$

$$V(z) = \begin{cases} V_2 z \in (-\infty, 0) \cup (h, \infty) \\ 0 & z \in (0, h) \end{cases} \quad (3)$$

Bunda, $V_2 - V_1$ InAs_{0.25}P_{0.75} va InAs na'munalar potensial to'siqlari farqi, $V_1 - V_2$ InP va InAs na'munalar potensial to'siqlari farqi, $a_x, a_y, h - V_2$ InAs nanonuktaning x, y, z o'qlari bo'yicha o'lchamlari, $b_x, b_y - V_2$ InAs_{0.25}P_{0.75} nanoipning x, y o'qlari

bo'yicha o'lchamlari, c_x, c_y - InP tashqi nanoqatlamning o'lchamlari. nanoipning x, y o'qlari bo'yicha o'lchamlari.

Effektiv massa quyidagicha ifodalanadi [9]:

$$m(x, y) = \begin{cases} m_1, & (x, y) \in (-\infty, 0) \times (-\infty, 0) \cup (c_x, \infty) \times (c_y, \infty) \\ m_2, & (x, y) \in (0, a_x) \times (0, a_y) \cup (b_x, c_x) \times (b_y, c_y) \\ m_0, & (x, y) \in (a_x, b_x) \times (a_y, b_y) \end{cases} \quad (4)$$

$$m(z) = \begin{cases} m_2 & z \in (-\infty, 0) \cup (h, \infty) \\ m_0 & z \in (0, h) \end{cases} \quad (5)$$

Shredinger tenglamasining yechimlari quyidagicha qidiriladi:

$$\psi(x, y) =$$

$$\begin{cases} C_{(x,y)1} e^{\chi(x,y)}, & (x, y) \in (-\infty, 0) \times (-\infty, 0) \\ C_{(x,y)2} e^{\lambda(x,y)} + C_{(x,y)3} e^{-\lambda(x,y)}, & (x, y) \in (0, a_x) \times (0, a_y) \\ C_{(x,y)4} \sin(k(x, y)) + C_{(x,y)5} \cos(k(x, y)), & (x, y) \in (a_x, b_x) \times (a_y, b_y) \\ C_{(x,y)6} e^{\lambda(x,y)} + C_{(x,y)7} e^{-\lambda(x,y)}, & (x, y) \in (b_x, c_x) \times (b_y, c_y) \\ C_{(x,y)8} e^{-\chi(x,y)}, & (x, y) \in (c_x, \infty) \times (c_y, \infty) \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi(z) = \begin{cases} B_1 e^{\lambda|z|}, & z \in (-\infty, 0) \\ B_2 \sin(kz) + B_3 \cos(kz), & z \in (0, h) \\ B_4 e^{-\lambda|z|}, & z \in (h, \infty) \end{cases} \quad (7)$$

Bunda χ , λ va k lar esa quyidagilarga teng bo'ladi.

$$\chi = \sqrt{\frac{2m_1}{\hbar^2} (V_1 - E)}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{2m_2}{\hbar^2} (V_2 - E)}, \quad k = \sqrt{\frac{2m_0}{\hbar^2} E}.$$

Bu yerda, $C_1, C_2, C_3, \dots, C_8$ lar chegaraviy shartlardan topilishi mumkin bo'lgan o'zgarmas kattaliklardir. Potensial to'siq va o'ra chegarasini to'liqin funksiya uzluksiz ekanligidan hamda to'liqin funksiya normallanishidan foydalaniladi.

Optik yutilish ko'effitsienti, sinish ko'rsatkichi o'zgarishi, ikkinchi va uchinchi garmonik avlod ko'effitsientlari. Chiziqli ($\alpha^{(1)}$) va uchinchi tartibli nochiziqli foto-yutilish ko'effitsientining ($\alpha^{(3)}$) matematik ifodasi zichlik matritsasi usuli va buzilishlar nazariyasidan foydalanib keltirib chiqarilgan. Shu tarzda, yutilish ko'effitsientining ifodasi quyidagicha yoziladi [10]:

$$\alpha(\omega, I) = \alpha^{(1)}(\omega) + \alpha^{(3)}(\omega, I) \quad (8)$$

bunda,

$$\alpha^{(1)}(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_0 \epsilon}} \frac{e^2 \hbar \Gamma_{\tilde{f}} |M_{\tilde{f}}|^2 \sigma}{(E_{\tilde{f}} - \hbar \omega)^2 + (\hbar \Gamma_{\tilde{f}})^2} \quad (9)$$

va

$$\alpha^{(3)}(\omega, I) = -\omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_0 \epsilon}} \left(\frac{I}{2 \epsilon_0 n c} \right) \frac{4 \sigma e^4 \hbar \Gamma_{\tilde{f}} |M_{\tilde{f}}|^4}{[(E_{\tilde{f}} - \hbar \omega)^2 + (\hbar \Gamma_{\tilde{f}})^2]^2}$$

$$\times \left[1 - \frac{|M_{ff} - M_{ii}|^2}{4|M_{fi}|^2} \left(\frac{3E_{fi}^2 - 4\hbar\omega E_{fi} + \hbar^2(\omega^2 - \Gamma_{fi}^2)}{E_{fi}^2 + (\hbar\Gamma_{fi})^2} \right) \right] \quad (10)$$

Bu yerda, μ – ϵ sistemaning magnit o'tkazuvchanligi, ϵ_0 – ϵ vakuum dielektrik doimiysi, ϵ_r – ϵ sistemaning nisbiy dielektrik doimiysi, σ – ϵ sistemadagi elektron zichligi, Γ – ϵ relaksatsiya tezligi, ω – ϵ tushayotgan yorug'likning burchak tezligi, c – ϵ yorug'lik tezligi, $n_r = \sqrt{\epsilon_r}$ – ϵ sistemaning sinish ko'rsatkichi, I – ϵ tushayotgan foton oqimining optik intensivligi, $M_{fi} = \langle \psi_f | z | \psi_i \rangle$ va $E_{fi} = E_f - E_i$ – ϵ z-polyarizatsiyalangan yorug'lik uchun dipol matritsa elementi, ψ_f va ψ_i holatlar orasidagi o'tish energiyasini bildiradi.

Chiziqli va uchinchi tartibli nochiziqli sinish ko'rsatkichi o'zgarishlarining yig'indisi quyidagicha ifodalanadi [10]:

$$\frac{\Delta n(\omega)}{n_r} = \frac{\Delta n^{(1)}(\omega)}{n_r} + \frac{\Delta n^{(3)}(\omega)}{n_r} \quad (11)$$

bunda,

$$\frac{\Delta n^{(1)}(\omega)}{n_r} = \frac{1}{2\epsilon_0 n_r^2} \frac{\sigma |M_{fi}|^2 (E_{fi} - \hbar\omega)}{(E_{fi} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{fi})^2} \quad (12)$$

va

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n^{(3)}(\omega, I)}{n_r} &= \frac{-\mu c I \sigma |M_{fi}|^4}{\epsilon_0 n_r^3} \frac{(E_{fi} - \hbar\omega)}{[(E_{fi} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{fi})^2]^2} \\ &\times \left[1 - \frac{|M_{ff} - M_{ii}|^2}{4|M_{fi}|^2 (E_{fi}^2 + (\hbar\Gamma_{fi})^2)} \left([E_{fi}(E_{fi} - \hbar\omega) - (\hbar\Gamma_{fi})^2] - (\hbar\Gamma_{fi})^2 \frac{(2E_{fi} - \hbar\omega)}{(E_{fi} - \hbar\omega)} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

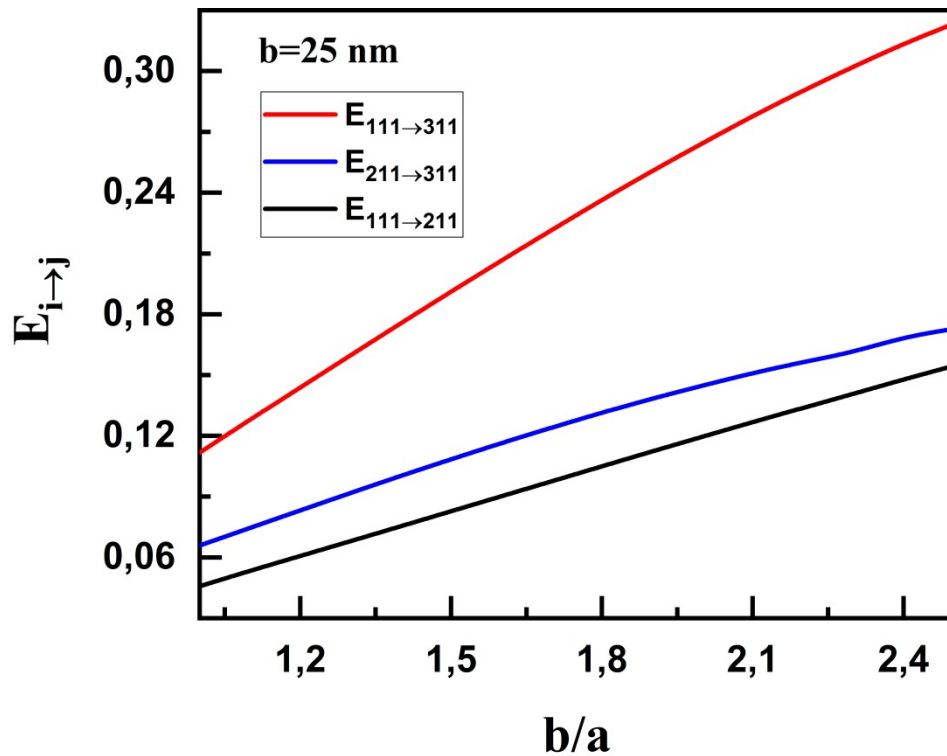
Polyarizatsiyada turli hissalarining matematik ifodasi ixcham zichlik matritsasi usuli yordamida chiqarib olinadi. Ushbu tadqiqotda ahamiyatsiz ta'sirga ega bo'lgan norezonans hadlar e'tiborga olinmaydi. Ishimiz quyidagi effektlarga qaratiladi [10]:

$$\chi_{2\omega}^{(2)} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \frac{M_{12} M_{23} M_{31}}{(\hbar\omega - E_{21} - j\hbar\Gamma_{21})(2\hbar\omega - E_{31} - j\hbar\Gamma_{31})} \quad (14)$$

$$\chi_{3\omega}^{(3)} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \frac{M_{12} M_{23} M_{34} M_{41}}{(\hbar\omega - E_{21} - j\hbar\Gamma_{21})(2\hbar\omega - E_{31} - j\hbar\Gamma_{31})(3\hbar\omega - E_{41} - j\hbar\Gamma_{41})} \quad (15)$$

Natijalar va muloxazalar

Qo'shimcha ravishda, relaksatsiya tezligi, sochilish kesimi va qo'llanilgan quvvat quyidagi qiymatlarga ega: $\Gamma = 3.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$, $\sigma = 4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $I = 2 \times 10^9 \text{ W/m}^2$. Eslatib o'tamiz, $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.



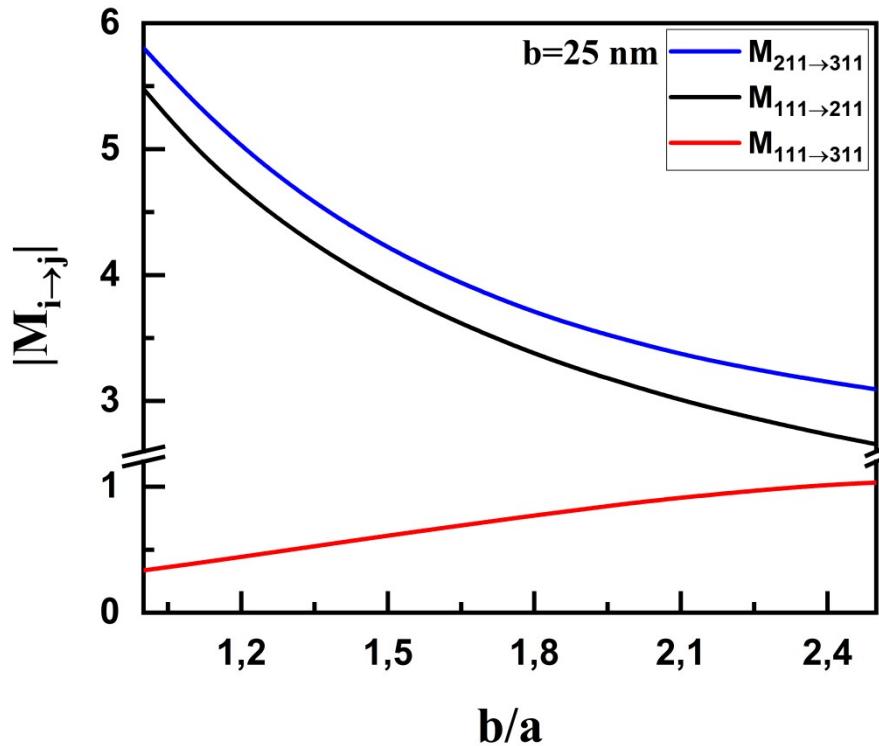
2-rasm. Holatlararo o'tish $E_{i \rightarrow j}$ energiyasining b/a nisbatiga bog'liqligi ($b=25 \text{ nm}$ holida)

2-rasmda InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonuqtadagi elektronlar uchta turli kvant holatlararo optik o'tish energiyasi $E_{i \rightarrow j}$ ning b/a -nisbatga bog'liqligi tasvirlangan. Bunda nanoip yadrosining qalinligi $b=25 \text{ nm}$ deb olingan. Grafikdagi uchta chiziq quyidagi o'tishlarga mos keladi: $E_{111 \rightarrow 311}$ - qizil chiziq; $E_{211 \rightarrow 311}$ - ko'k chiziq; $E_{111 \rightarrow 211}$ - qora chiziq. Yuqoridagi belgilar kvant holatlarni ifodalaydi, ya'ni n_x, n_y, n_z kvant sonlarining kombinatsiyasi bo'yicha belgilangan energiya holatlari. Bu kvant raqamlar struktura ichidagi fazoviy kvant cheklanishini anglatadi.

Grafikga ko'ra, b/a -nisbatining ortishi — ya'ni InAs nanonuqtaning nisbiy kichrayib, InAsP yadro qavati enining kengayishi — barcha o'tish energiyalarining ortishiga olib kelmoqda. b/a -nisbat ortishi bilan InAsP qavati InAs nanonuqtaga nisbatan kengroq bo'ladi. Bu esa elektron va teshiklarning fazoviy cheklanishini kuchaytiradi. Fazoviy cheklanish kuchayganda, energiya sathlari orasidagi farq ortadi va natijada optik o'tish energiyasi ham yuqorilaydi. Grafikda energiya farqi eng katta bo'lgan o'tish — $E_{111 \rightarrow 311}$ - eng yuqori energiyali o'tishni bildiradi. Bu o'tishda elektron asosiy holatdan uchinchi qo'zg'algan holatiga o'tadi. Qolgan ikkala o'tishda (ayniqsa $E_{111 \rightarrow 211}$) energiya farqi nisbatan kichik, chunki u faqatgina n_y bo'yicha bir bosqichli o'zgarishni bildiradi.

Bu turdagi o'tish energiyalarining o'zgarishini nazorat qilish kvant qurilmalarning (masalan, kvant nuqta lazerlari, detektorlar, infraqizil optik elementlar) ish diapazonini sozlash imkonini beradi. Xususan, InAs/InAsP/InP

asosidagi tuzilmalarda o'zgaruvchan geometrik parametrlar asosida talab qilingan energiya yoki to'liq uzunligida ishlovchi qurilmalarni loyihalash mumkin. Shuningdek, bu grafik yordamida struktura parametrlarini (ayniqsa b/a) o'zgartirish orqali o'tkazuvchanlik zonasidagi o'tishlar chastotasini aniqlash, ya'ni materialni lazer nurlanishiga yoki fotodeteksiyaga moslashtirish mumkin.



3-rasm. Matritsaviy o'tish elementining $|M_{i \rightarrow j}|$ qiymatining b/a nisbatiga bog'liqligi ($b=25 \text{ nm}$ holida)

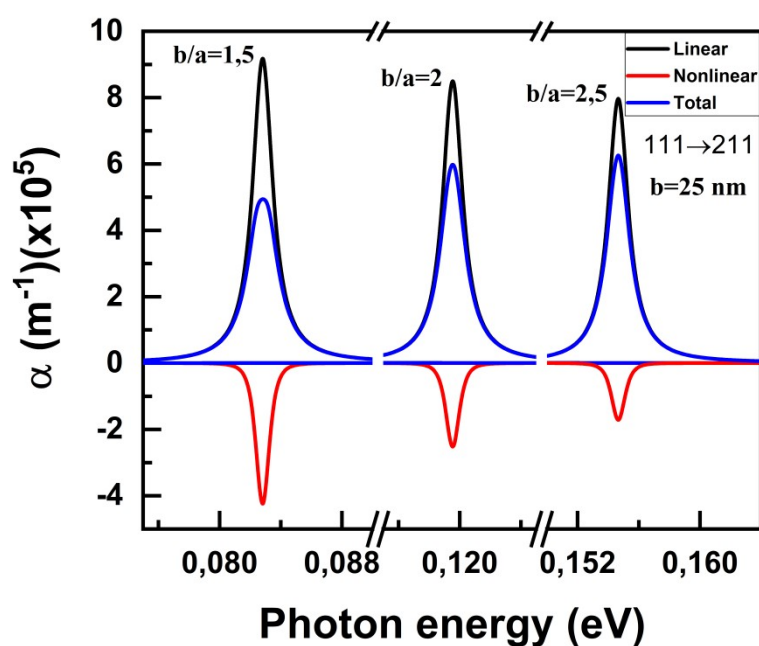
3-rasmda o'tishlararo dipol matritsa elementining absolyut qiymati $|M_{i \rightarrow j}|$ ning kubik InAs nanonuqtaning nisbiy o'lchamiga (aniqrog'i, b/a nisbatiga) bog'liq ravishda qanday o'zgarishi tasvirlangan. Bu qiymat kvant o'tish ehtimolligi va optik o'tish intensivligini aniqlovchi asosiy parametrlardan biri hisoblanadi. Grafikdagi chiziqlar quyidagi uchta o'tish uchun keltirilgan: $M_{211 \rightarrow 311}$ ko'k chiziq; $M_{111 \rightarrow 211}$ qora chiziq; $M_{111 \rightarrow 311}$ qizil chiziq. Yuqoridagi belgilar kvant holatlarni ifodalaydi, ya'ni n_x, n_y, n_z kvant sonlarining kombinatsiyasi bo'yicha belgilangan energiya holatlari. Bu kvant raqamlar struktura ichidagi fazoviy kvant cheklanishini anglatadi.

Dipol matritsa elementi $|M_{i \rightarrow j}|$ foton bilan o'zaro ta'sirlashuv orqali elektronning i holatdan j holatga o'tish ehtimolini ifodalaydi. Bu qiymat qancha katta bo'lsa, optik o'tish shunchalik kuchli bo'ladi. Grafikda ko'rsatilganidek, har bir o'tish uchun bu qiymat b/a nisbat o'zgarishi bilan turlicha

harakterga ega. $M_{211 \rightarrow 311}$ va $M_{111 \rightarrow 211}$ o'tishlari uchun $|M_{i \rightarrow j}|$ qiymati b/a nisbat ortgani sayin kamayib bormoqda. Bu holat nanoip yadrosining eniga nisbatan InAs nanonuqta kichrayganda (ya'ni a kichik bo'lganda), elektron to'lqin funksiyalari orasidagi ortogonalik oshishi va ularning qamrov hududlarining mos kelishi kamayishi bilan izohlanadi. Aksincha, $M_{111 \rightarrow 311}$ o'tishi uchun matritsa elementi qiymati b/a nisbat ortishi bilan asta-sekin ortib bormoqda. Bunday holat ushbu o'tishda to'lqin funksiyalar orasidagi fazoviy ustma-ustlikning kuchayishi bilan bog'liq bo'ladi.

Bu grafikdan ko'rinadiki, dipol o'tish ehtimolligi faqat kvant sonlarining o'zgarishiga emas, balki struktura geometriyasiga ham sezilarli darajada bog'liq. Nanoip yadrosining o'lchamiga nisbatan nanonuqta o'lchamining kichik yoki katta bo'lishi elektron to'lqin funksiyasining shaklini, fazoviy kengayishini va ularning o'zaro ustma-ustlik integralini o'zgartiradi. Demak, grafikda ko'rsatilgan qiymatlar orqali strukturaning qanday chastotali nurlanishlarni kuchliroq yutishi yoki nurlatishi mumkinligini aniqlash mumkin.

Bu grafik struktura dizaynida juda muhim bo'lib, optik qurilmalar (masalan, kvant nuqta lazerlari, fotodiodlar, detektorlar) uchun optimal o'lchamlarni aniqlashga yordam beradi. Dipol o'tish matritsa elementi yuqori bo'lgan holatlar yorqinroq fotoluminessensiya yoki yuqori kvant samaradorlikka ega bo'lgan qurilmalar yaratish imkonini beradi. Shuningdek, bu natijalar yordamida nanoipdagi optik faollikni geometrik boshqarish (ya'ni faqat o'lchamni o'zgartirib optik xususiyatni sozlash) orqali modulyatsiya qilish mumkinligi aniqlanadi.



4-rasm. InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonukta elektronning (111) → (211) o'tishiga mos optik yutilish spektri (b/a nisbati uchun taqqoslanma holda)

4-rasmda InP/InAs_{0.25}P_{0.75}/InP geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonukta elektronning (111) → (211) o'tishiga mos optik yutilish koeffitsientini foton energiyasiga bog'liqligi, b/a nisbatning turli qiymatlari uchun keltirilgan.

Bunda: Qora chiziq — faqat chiziqli optik yutilish; Qizil chiziq — nochiziqli optik yutilish; Ko'k chiziq — to'liq yutilish koeffitsienti, ya'ni chiziqli va nochiziqli komponentlarning yig'indisi. Grafikda turli b/a nisbatlari uchun optik yutilish spektri taqqoslangan. Bu nisbat nanosistemadagi potentsial o'ra shaklining anizotropiligini bildiradi. $b/a=1.5$ da o'ra ancha cho'zilgan, ya'ni elektronlarning kvant holatlari yaqin joylashgan. Bu holatda rezonans energiya nisbatan pastroq joylashgan. $b/a=2$ da tizim nisbatan simmetrik, chiziqli rezonans yuqoriga siljiydi. $b/a=2.5$ da o'ra eniga nisbatan balandroq, bu holatda esa o'tish energiyasi yana ortadi.

Bu geometriya o'zgarishi bilan yutilish cho'qqisining joylashuvi, balandligi va kengligi ham o'zgaradi. Shuningdek, geometrik o'lchamlar o'zgargan sari sathlararo energiya farqlari ortadi, bu esa rezonans holatni yuqori energiyalarga siljitadi — bu kvant chegaralangan tizimlarga xos xususiyat.

Har bir cho'qqi (111) → (211) o'tishga mos bo'lgan rezonans holatni bildiradi. Ushbu o'tishlar uchun dipol o'tish momenti mavjud bo'lib, ular tashqi yorug'lik bilan kuchli o'zaro ta'sirlashadi. Chiziqli yutilish cho'qqisining balandligi foton energiyasi bilan elektron o'tish chastotasi mos kelgan vaqtda maksimal bo'ladi. Nochiziqli komponent esa bu nuqtalarda manfiy cho'qqi hosil qiladi — bu narsa ikki fotonli o'tish mexanizmlari orqali intensivlikka bog'liq nurlanishda noan'anaviy optik xususiyatlari (masalan, optik shaffoflik yoki ommaviy so'nish) yuz berishini bildiradi. Foton energiyasining oshishi bilan yutilish cho'qqilari ham yuqoriga siljiydi. Bu holat kvant sathlar orasidagi energiya farqi geometrik o'lchamlar bilan oshayotganini bildiradi. Bu yerda geometrik o'zgarishlar kvant chegaralangan tizimlarda spektral xossalarni qanday boshqarish mumkinligini ko'rsatadi.

Bunday tizimlar kvant nuqtalariga asoslangan optoelektron qurilmalar (masalan, kvant nuqta lazerlari, fotodetektorlar) uchun muhim ahamiyatga ega. Grafikda ko'rsatilganidek, tizim parametrlarini (masalan, b/a nisbatini) boshqarish orqali: Spektral diapazonni moslashtirish; Chiziqli va no-chiziqli javobni optimallashtirish; Maksimal yutilish chastotasini sozlash mumkin bo'ladi. Bu esa

modulyatsiya qobiliyatini oshirish va mos optik detektor yoki lazer to'liq uzunligini tanlash imkonini beradi.

Xulosa. Ushbu ilmiy ishda $\text{InP}/\text{InAs}_{0.25}\text{P}_{0.75}/\text{InP}$ geterotuzilmali nanoip ichida joylashgan kubik shakldagi InAs nanonukta elektronlari uchun chiziqli va nochiziqli optik xususiyatlar kompleks nazariy tahlil asosida o'rganildi. Tadqiqot natijalari struktura geometrik parametrlarining (ayniqsa, InAs nanonukta o'lchami va nanoip yadrosi qalinligi nisbati) elektronlarning energiya holatlari va ularning optik xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi. Tadqiqot davomida quyidagi asosiy xulosalarga kelindi:

1. Kvant cheklanish effektlari. InAs nanonukta va uni o'rab turgan $\text{InAs}_{0.25}\text{P}_{0.75}$ qatlamining nisbiy o'lchamlari ortishi yoki kamayishi struktura ichida kuchli kvant cheklanishi hosil qilishi aniqlandi. Bu esa elektron energiya sathlari orasidagi farqni o'zgartiradi va natijada optik o'tish energiyalariga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

2. Optik o'tish energiyalarining boshqarilishi. Nanoip yadrosi qalinligining InAs nanonukta o'lchamiga nisbati oshgan sari barcha optik o'tish energiyalari oshishi qayd etildi. Bu esa kvant nuqta lazerlari va optoelektron qurilmalar uchun ishchi diapazonni geometrik boshqarish imkonini beradi.

3. Dipol matritsa elementlari. Tadqiqotda dipol matritsa elementlarining qiymati ham struktura o'lchamlariga bevosita bog'liqligi aniqlanib, elektronlar to'liq funksiyalarining fazoviy ustma-ustligi geometrik nisbat orqali boshqarilishi isbotlandi. Bu esa optik o'tish intensivligini nazorat qilish imkonini beradi.

4. Optik yutilish ko'rsatkichi. Chiziqli va nochiziqli optik yutilish spektrlarining geometrik parametrlar o'zgarishi bilan qanday o'zgarishi batafsil tahlil qilindi. Yutilish cho'qqilarining o'zgarishi va nochiziqli komponentlarning salmoqli ta'siri strukturaning optik boshqaruv imkoniyatlarini yanada kengaytiradi.

5. Nanofotonika va kvant texnologiyalari uchun amaliy ahamiyat. Ushbu tadqiqot natijalari kvant optikasi va nanofotonika sohalarida yangi avlod qurilmalarni loyihalashda foydali bo'lishi mumkin. Jumladan, yuqori kvant samaradorlikka ega bo'lgan lazerlar, sezgir optik detektorlar, modulyatsiya darajasi boshqariluvchi signal uzatish tizimlari kabi ilg'or texnologiyalar yaratish uchun nazariy asos sifatida xizmat qiladi.

6. Geometrik optimallashtirish. Tadqiqot natijalari struktura parametrlarini optimallashtirish orqali maksimal optik javobni olish mumkinligini ko'rsatadi. Bu esa kelajakdagi nanofotonik va kvant qurilmalari uchun dizayn jarayonida muhim rol o'ynaydi.

7. Yangi tadqiqot yoʻnalishlari. Ushbu ish davomida aniqlangan xususiyatlar asosida kelajakda turli tashqi omillar (harorat, bosim, tashqi elektr yoki magnit maydon) taʼsirida struktura xususiyatlarini chuqurroq oʻrganish mumkin.

Tadqiqotning nazariy asoslari va natijalari kvant texnologiyalarini rivojlantirish va yangi avlod fotonik qurilmalarni ishlab chiqishda muhim oʻringa ega boʻladi.

ADABIYOTLAR:

[1] D. Bimberg, M. Grundmann, N. N. Ledentsov, Quantum Dot Heterostructures, John Wiley & Sons, 1999.

[2] P. Harrison, Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures, John Wiley & Sons, 2000.

[3] Ekimov, A.I., Onushchenko, A.A. Quantum Size Effect in Three-Dimensional Microscopic Semiconductor Crystals. *Jetp Lett.* 118 (Suppl 1), S15–S17 (2023).

[4] José A. Dávila Pintle, Edmundo Reynoso Lara, and Marcelo D. Iturbe Castillo, Sensitivity optimization of the one beam Z-scan technique and a Z-scan technique immune to nonlinear absorption, *Opt. Express* 21, 15350-15363 (2013).

[5] A. P. Alivisatos, Semiconductor Clusters, Nanocrystals, and Quantum Dots, *Science*, vol. 271, no. 5251, pp. 933-937, 1996.

[6] C. F. Bohren, D. R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley-VCH, 1998.

[7] Doba, Pierre & Melingui Melono, Robert Landry & Motapon, Ousmanou. Shape and quantum size effects on the electronic structure, oscillator strengths and state lifetimes of helium-like quantum dots. *Physica Scripta.* 99. 015401, 2023.

[8] R. Ferreira, G. Bastard, Evaluation of some scattering times for electrons in unbiased and biased single- and multiple-quantum-well structures, *Phys. Rev. B*, vol. 40, no. 2, pp. 1074-1086, 1989.

[9] Davlatov, A., Gulyamov, G. & Urinboev, D. Energy Levels of Nanodots Inside Semiconductor Nanowires. *Braz. J. Phys.* 54, 125 (2024).

[10] Davlatov, A.B., Hameed, A.H., Feddi, K. et al. Strain, pressure and temperature effects on linear and nonlinear optical properties of InP/InAs $_{1-x}$ P $_x$ /InP quantum well heterostructures. *Appl. Phys. A* 131, 1 (2025).