buyon xalq tabobatida ko‘plab kasalliklarni davolashda foydalanib kelmoqdalar. Bu o‘simlik damlamasi klinik sinovlardan o‘tgan va O‘zbekiston Respublikasi Sog‘liqni saqlash vazirligi tomonidan ruxsat etilgan. Shuning uchun biz bu o‘simlikni plantatsiyalarini yanada ko‘paytirib ularning yangi navlarini yaratishimiz kerak. Hamda uning tarkibini yaxshilab o‘rganib farmatsevtika sanoatida dori vositalari ishlab chiqilishini yana rivojlantirishimiz lozim.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Jo‘rayeva M.A. Dorivor o‘simliklar atlasi (o‘quv qollanma)Toshkent nashriyoti 2019.

2. E.T.Berdiyev, M.X. Hakimova,G.B.Maxmudova O‘rmon dorivor o‘simliklari (o‘quv qo‘llanma) “Sano-standart”nashriyoti Toshkent -201

3. Abdurahmonov A.A. O‘simliklar ekologiyasi. – Toshkent: Fan, 2021. – 256 b. 4. G‘ulomov F.A. Dorivor o‘simliklar va ularning ahamiyati. – Toshkent: Universitet, 2019.

5. Dorivor o‘simliklarni yetishtirish texnologiyasi. Amaliy mashg‘ulotlar (o‘quv-uslubiy qo‘llanma) Namangan 2020.

QO‘QON DAVLAT PEDAGOGIKA INSTITUTI ILMIY XABARLARI
(2026-yil 10-son)
TABIIY FANLAR
NATURAL SCIENCES
https://doi.org/10.70728/a.series.tab.v08.i10.202

GaAs/AlGaAs KVANT O‘RALARIDA SUBZONA-ICHKI VA ZONALARARO UCH FOTONLI OPTIK O‘TISHLAR

Qo’chqorov Mavzurjon Xursanboyevich
Qo’qonDU, Fizika-matematika fanlari bo’yicha falsafa doktori (PhD), dotsent
Qo’qon, O’zbekiston
ORCID ID: 0000-0002-0614-7981
E-mail: mavzurbekkuchkarov@gmail.com
Tel: +99891 685 17 90
Ismoilova Sabinabonu Jahongir qizi
Qo’qonDU, Yarimo’tkazgichlar fizikasi mutaxassisligi magistranti
Qo’qon, O’zbekiston
E-mail: xalilovasabina155@gmail.com
Tel: +99899 566 33 30

Annotatsiya. Ushbu maqolada $\frac{GaAs}{AlGaAs}$kvant o‘ralarida subzona-ichki va zonalararo uch fotonli optik o‘tishlarning nazariy modeli ishlab chiqilgan va sonli tahlil qilingan. Hisoblashlar effektiv massa yaqinlashuvida, Ben-Deniel–Dyuk chegaraviy shartlari asosida, chekli ayirmalar usulida bajarilgan; uch fotonli o‘tish amplitudasi uchinchi tartibli perturbatsiya nazariyasidan olingan. O‘tish ehtimolligining maydon amplitudasining oltinchi darajasiga proporsionalligi ($W \propto E0^6$) sonli tasdiqlangan, natijalar esa West va Eglashning (1985) mustaqil tajriba ma’lumotlari bilan 3–8% aniqlikda mos kelgan.

Kalit so‘zlar: kvant o‘rasi, $\frac{GaAs}{AlGaAs}$, uch fotonli yutilish, subzona-ichki o‘tish, Stark effekti, Ben-Deniel–Dyuk sharti, perturbatsiya nazariyasi.

Abstract. This article develops and numerically analyses a theoretical model of intersubband and interband three-photon optical transitions in $\frac{GaAs}{AlGaAs}$ quantum wells. The calculations are carried out in the effective-mass approximation with BenDaniel-Duke boundary conditions, using a finite-difference method; the three-photon transition amplitude is obtained from third-order time-dependent perturbation theory. The predicted sixth-power field dependence of the transition probability ($W \propto E0^6$) is confirmed numerically, and the results agree with the independent experimental data of West and Eglash (1985) within 3-8%.

Keywords: quantum well, $\frac{GaAs}{AlGaAs}$, three-photon absorption, intersubband transition, Stark effect, BenDaniel-Duke condition, perturbation theory.

KIRISH. Kvant o‘ralari zamonaviy nanofizikaning asosiy obyektlaridan biri bo‘lib, ularda zaryad tashuvchilarning bir yo‘nalishdagi fazoviy cheklanishi energetik spektrni uzluksiz zonalardan diskret subzonalar tizimiga aylantiradi [3]. $\frac{GaAs}{AlGaAs}$ geterotuzilmasi bu borada “model tizim” hisoblanadi: panjara doimiylarining deyarli tengligi atom darajasida silliq chegarali qatlamlarni o‘stirish imkonini beradi, $GaAs$ esa to‘g‘ri zonali yarimo‘tkazgich bo‘lgani uchun yuqori samarali optik o‘tishlarni ta’minlaydi [10].

Subzona-ichki (intersubband) yutilish $GaAs$ kvant o‘rasida birinchi marta West va Eglash tomonidan 1985-yilda tajribaviy kuzatilgan [9]. Shundan buyon bir fotonli yutilish yaxshi o‘rganilgan bo‘lsa-da, kuchli maydonlarda (impulsli lazerlar, erkin elektron lazerlari) ikki va uch fotonli jarayonlar sezilarli hissa qo‘shadi [4, 5]. Ko‘p fotonli jarayonlarni nazariy jihatdan to‘g‘ri tavsiflash kvant kaskadli lazerlar va infraqizil fotodetektorlarda nomaqbul yo‘qotish kanallarini bashorat qilish, shuningdek terahertz diapazonida ishlaydigan yangi nochiziqli optik qurilmalarni loyihalash uchun zarur asos bo‘lib xizmat qiladi.

Ushbu tadqiqotning maqsadi — $\frac{GaAs}{AlGaAs}$ kvant o‘ralarida subzona-ichki va zonalararo uch fotonli optik o‘tishlarning fizik mexanizmini nazariy asoslash, o‘tish energiyasi, rezonans chastotasi, o‘tish ehtimolligi va yutilish koeffitsiyentining o‘ra kengligi L, Al konsentratsiyasi x hamda tashqi elektr maydoni F ga bog‘liqligini sonli hisoblash va natijalarni mustaqil tajriba ma’lumotlari bilan taqqoslashdir.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Adabiyotlar tahlili

Kvant o‘ralarida elektron holatlarining kvantlanishi Dingle va hamkorlarning ishlarida asoslab berilgan [3]. Effektiv massa usuli va chegaraviy shartlar Ben-Deniel hamda Dyuk tomonidan taklif etilgan [2], ular Bastard tomonidan to‘liq bayon qilingan [1]. Subzona-ichki yutilish 1985-yilda West va Eglash tomonidan tajribada kuzatilgan [9]; bu ish ushbu tadqiqotda taqqoslash manbai sifatida ishlatilgan. Kvant o‘ralarining nochiziqli optik xususiyatlarini kvant muhandisligi orqali oshirish g‘oyasi Gurnik va Detempl [4], shuningdek Rozenxer va Bua [6] tomonidan rivojlantirilgan. Shu bilan birga, subzona-ichki va zonalararo uch fotonli o‘tishlarni yagona model doirasida taqqoslash masalasi adabiyotda yetarlicha yoritilmagan — ushbu ish aynan shu bo‘shliqni to‘ldirishga qaratilgan.

Nazariy model

Tadqiqot obyekti sifatida $Al_x\,Ga_{1-x}\,As$ to‘siqlari orasiga joylashtirilgan, kengligi L bo‘lgan yakka $GaAs$ kvant o‘rasi tanlandi. Elektron va kovak envelope funksiyasi $\psi n(z)$effektiv massa yaqinlashuvida Ben-Deniel–Dyuk chegaraviy shartli Shryodinger tenglamasidan topiladi [2]:

$$-\frac{\hbar^2}{2}\frac{d}{dz}\left(\frac{1}{m^*(z)}\frac{d\psi_n}{dz}\right)+V(z)\psi_n(z)=E_n\psi_n(z)$$

bunda chegarada $\psi\, va\frac{\left(\frac{1}{m}\right)d\psi}{dz}$ uzluksizligi talab qilinadi. $Al_x\,Ga_{1-x}\,As$ ning asosiy parametrlari $0 \le x \le 0{,}45$ chiziqli interpolyatsiya bilan beriladi: $E_g(x) = 1{,}424 + 1{,}247x$ eV, $\Delta E_c(x) = 0{,}65 \cdot \left[E_g(x) - E_g(0)\right]$, $m_e^*(x) = (0{,}067 + 0{,}083x)m_0$ [8]. Optik o‘tishlar dipol yaqinlashuvida tavsiflanadi, dipol matritsa elementi $z_{fi} = \langle f|z|i\rangle$ ko‘rinishda

aniqlanadi. Uch fotonli o‘tish amplitudasi vaqtga bog‘liq perturbatsiya nazariyasining uchinchi tartibidan olinadi [7]:

$$M_{fi}^{(3)} = \left(\frac{eE_0}{2}\right)^3 \sum_{m,n} \frac{z_{fn} z_{nm} z_{mi}}{(E_i + \hbar\omega - E_m + i\Gamma_m)(E_i + 2\hbar\omega - E_n + i\Gamma_n)}$$

bunda Γ_m, Γ_n — oraliq (virtual) holatlarning susayish parametrlari. Fermi oltin qoidasining uchinchi tartibga umumlashmasi bo‘yicha o‘tish ehtimolligi $W^{(3)} = \frac{2\pi}{\hbar}\left|M_{fi}^{(3)}\right|^2 \delta(E_f - E_i - 3\hbar\omega)$ ga teng; bundan $W \propto {E_0}^6$ qonuniyati kelib chiqadi — bu uch fotonli jarayonning asosiy nazariy belgisidir.

Hisoblash metodikasi

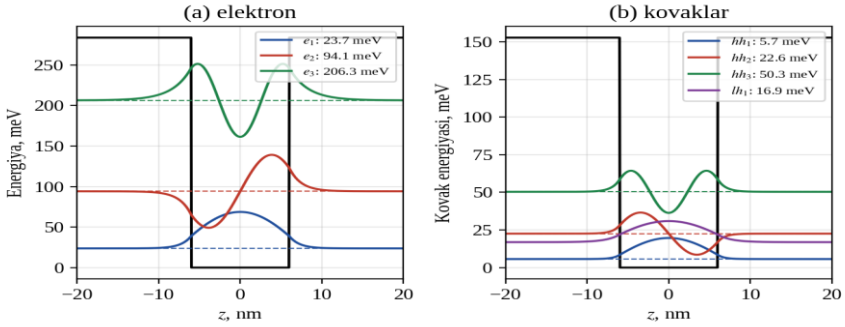
Shryodinger tenglamasi chekli ayirmalar usulida (Python, NumPy/SciPy kutubxonalari) sonli yechildi; to‘r qadami $h = 0{,}05\,nm$, tashqi chegara o‘radan $25\,nm$ tashqarida tanlandi. Dasturning to‘g‘riligi bir necha usul bilan tekshirildi: to‘r qadamini kamaytirganda energiyalar $0{,}01\,meV$ dan kam o‘zgardi; chekli o‘rada transsendent tenglamalarning analitik yechimi bilan energiyalar $0{,}02\,meV$ gacha mos keldi; simmetrik o‘rada z_{13} matritsa elementi mashina aniqligida nolga teng chiqdi, bu toqlik bo‘yicha tanlash qoidasini mustaqil tasdiqladi. Hisoblashlarda ishlatilgan asosiy parametrlar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Hisoblash uchun tanlangan asosiy parametrlar.

Parametr	Qiymat
O‘ra kengligi L	12 nm (6–24 nm oralig‘ida o‘zgartirildi)
Al ulushi x	0,35 (0,12–0,45 oralig‘ida)
Yorug‘lik maydoni amplitudasi E0	20 kV/sm (5–80 kV/sm)
Statik maydon F	0–60 kV/sm
Oraliq holatlar susayishi Γm, Γn	3 meV
O‘tish chizig‘i yarim kengligi Γf	5 meV
Elektronlar yuzaviy zichligi ns	$5\cdot10^{11}$ sm^{-2}

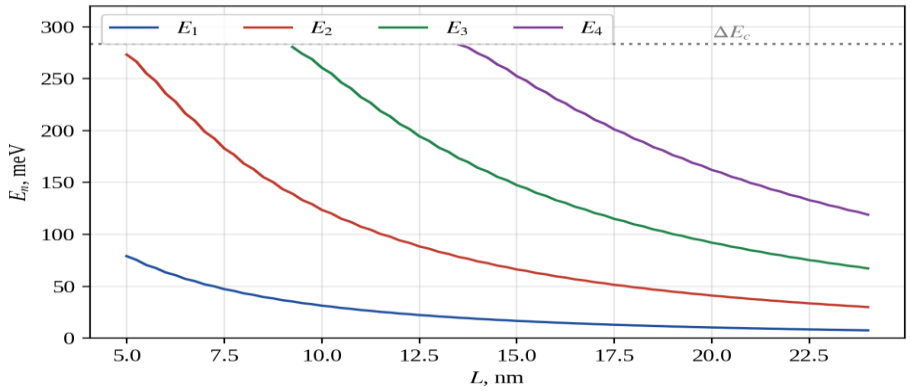
NATIJALAR

$L = 12\,nm, x = 0{,}35$ asosiy nuqtada hisoblangan elektron subzonalari: $E_1 = 23{,}7$; $E_2 = 94{,}1$; $E_3 = 206{,}3\,meV$; kovak subzonalari: $hh_1 = 5{,}7$; $lh_1 = 16{,}9\,meV$ (1-diagramma). Dipol matritsa elementlari $z_{12} = 2{,}79\,nm, z_{23} = 3{,}10\,nm$, simmetrik o‘rada esa $z_{13} \approx 0$ — bu toqlik bo‘yicha tanlash qoidasining to‘g‘ridan-to‘g‘ri natijasidir.



1-diagramma. Elektron (a) va kovak (b) subzonalarining energiyasi hamda to‘lqin funksiyalari ($L = 12\,nm, x = 0{,}35$).

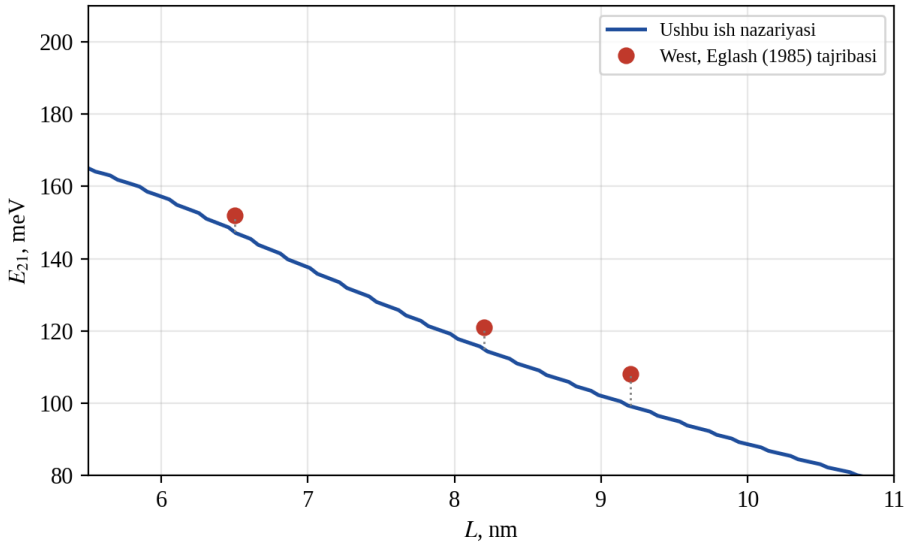
O‘ra kengligi L energetik sathlarni boshqaruvchi asosiy parametr hisoblanadi (2-diagramma). L ortishi bilan barcha sathlar pasayadi: $L = 8\,dan\,20\,nm$ gacha oshganda $E_1 = 43{,}1$ dan $10{,}3\,meV$ gacha kamayadi. $e_1 \to e_2$ uch fotonli rezonans chastotasi $L = 10\,nm\,da\,30{,}8\,meV$ ($\lambda \approx 40{,}3\,\mu m$)dan $L = 20\,nm\,da\,10{,}2\,meV$ ($\lambda \approx 121\,\mu m$) gacha o‘zgaradi.



2-diagramma. Elektron subzonalari energiyalarining kvant o‘rasi kengligiga bog‘liqligi ($x = 0{,}35$).

Rezonansdagi uch fotonli ehtimollik $E_0 = 20$ kV/sm da $W^{(3)}_{12} \approx 1{,}9 \cdot 10^7$ s^{-1} ni tashkil etadi. Ehtimollikning maydon amplitudasiga bog‘liqligi log-log shkalada aniq chiziqli bo‘lib, nishab 6,00 ga teng chiqdi — bu $W \propto {E_0}^6$ qonuniyatini to‘liq tasdiqlaydi. Tashqi statik elektr maydoni qo‘yilganda simmetriya buziladi va ilgari taqiqlangan$e_1 \to e_3$ o‘tish "ochiladi", $e_1 \to e_2$ o‘tish ehtimolligi esa destruktiv interferensiya kuchayishi tufayli kamayib, $F \approx 57\,\frac{kV}{sm}$ da chuqur minimumga tushadi.

Modelning to‘g‘riligini mustaqil tekshirish uchun u West va Eglashning (1985) klassik tajribasi bilan taqqoslandi [9]. Mualliflar $Al0{,}3Ga0{,}7As$ to‘siqli uchta $GaAs$ namunada ($L = 6{,}5;\ 8{,}2;\ 9{,}2\,nm$) $e_1 \to e_2$ rezonans energiyasini o‘lchagan: mos ravishda $152;\ 121;\ 108\,meV$. Ushbu ishning nazariy modeli (hech qanday moslashtirish parametrisiz) $147{,}5;\ 115{,}0;\ 99{,}3\,meV$ beradi (3-diagramma, 2-jadval) — farq 3,0 dan 8,0% gacha.



3-diagramma. Nazariy egri chiziq ($x = 0{,}30$) va West, Eglash (1985) tajriba natijalari [9].

2-jadval. Nazariy va tajriba (West, Eglash, 1985 [9]) natijalarining taqqoslanishi.

L, nm	E21 tajriba, meV	E21 nazariya, meV	Nisbiy farq, %
6,5	152	147,5	3,0
8,2	121	115,0	5,0
9,2	108	99,3	8,0

MUHOKAMA

West va Eglash bilan taqqoslashdagi farq tasodifiy emas, balki tizimli xususiyatga ega: barcha uchta nuqtada nazariy qiymat tajribadan kichikroq va chetlanish o‘ra kengayishi bilan ortadi. Bu ikki fizik sabab bilan izohlanadi. Birinchidan, West va Eglash namunalari elektronlar bilan legirlangan bo‘lib, ko‘p elektronli Kulon o‘zaro ta’siri tufayli depolarizatsiya siljishi kuzatiladi — bu effekt rezonans energiyasini doimo bir zarrali qiymatdan yuqori qiladi, aynan kuzatilgan tendensiyaga mos keladi. Ikkinchidan, West to‘liq ko`p (nonparabolik) nazariyadan foydalangan, bizning model esa sodda parabolik dispersiyani qo‘llaydi; nonparabollik odatda tor o‘ralarda (yuqori energiyalarda) ta’sirni kuchaytiradi, bu $L = 6{,}5\ nm$ dagi eng kichik nisbiy farq (3,0%) bilan qisman mos keladi.

Shunday qilib, $3-8\%$ chegarasidagi farq nafaqat modelning umumiy to‘g‘riligini tasdiqlaydi, balki qoldiq chetlanishning ishorasi va kattaligi orqali aynan qaysi fizik effektlar model doirasida hisobga olinmaganini mustaqil tarzda ko‘rsatadi. Amaliy nuqtai nazardan, olingan rezonans chastotalari $(2{,}5-7{,}4\ THz)$ terahertz diapazonida ishlaydigan nochiziqli detektorlar va modulyatorlar uchun qiziqish uyg‘otadi; tashqi maydon bilan ikkita o‘tish orasidagi "almashtirish" effekti esa elektr maydoni bilan boshqariladigan optik kalitlar yaratishning fizik asosi bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Ishning asosiy cheklovlari quyidagilardan iborat: depolarizatsiya siljishi, ko‘p zarrali effektlar, excitonlar hamda nonparabollik tuzatmasi hisobga olinmagan; oraliq holatlar sifatida faqat bog‘langan subzonalar olingan. Bu soddalashtirishlar natijalarning sifat xarakterini o‘zgartirmaydi, ammo miqdoriy aniqlikni $3-8\%$ darajasida cheklaydi.

XULOSA

$\frac{GaAs}{AlGaAs}$kvant o‘ralarida subzona-ichki va zonalararo uch fotonli optik o‘tishlarning nazariy modeli ishlab chiqildi va sonli amalga oshirildi. Ko‘rsatildiki: (i) uch fotonli o‘tish ehtimolligi maydon amplitudasining oltinchi darajasiga proporsional ($W \propto E0^6$), bu sonli hisoblarda aniq tasdiqlangan; (ii) rezonans chastotasi o‘ra kengligi L orqali keng diapazonda $(2{,}5-7{,}4\ THz)$ sozlanadi; (iii) tashqi elektr maydoni simmetriya bo‘yicha taqiqlangan o‘tishni "ochadi" va destruktiv interferensiya hisobiga boshqa o‘tishni bostiradi; (iv) model West va Eglashning (1985) mustaqil tajriba natijalari bilan moslashtirish parametrlarisiz 3–8% aniqlikda mos keladi. Olingan natijalar terahertz diapazonida ishlaydigan nochiziqli optik qurilmalarni loyihalashda dastlabki baholash uchun foydalanilishi mumkin.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI (REFERENCES)

Barcha keltirilgan manbalar xalqaro ilmiy nashrlar bo‘lgani uchun ro‘yxat ingliz tilida, APA uslubida va alifbo tartibida, bitta yagona ro‘yxat sifatida keltiriladi.

[1] Bastard, G. (1988). Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures. Les Editions de Physique.

[2] BenDaniel, D. J., & Duke, C. B. (1966). Space-charge effects on electron tunneling. Physical Review, 152(2), 683–692.

[3] Dingle, R., Wiegmann, W., & Henry, C. H. (1974). Quantum states of confined carriers in very thin AlxGa1-xAs-GaAs-AlxGa1-xAs heterostructures. Physical Review Letters, 33(14), 827–830.

[4] Gurnick, M. K., & Detemple, T. A. (1983). Synthetic nonlinear semiconductors. IEEE Journal of Quantum Electronics, 19(5), 791–794.

[5] Helm, M. (2000). The basic physics of intersubband transitions. In H. C. Liu & F. Capasso (Eds.), Semiconductors and semimetals (Vol. 62, pp. 1–99). Academic Press.

[6] Rosencher, E., & Bois, P. (1991). Model system for optical nonlinearities: Asymmetric quantum wells. Physical Review B, 44(20), 11315–11327.

[7] Sakurai, J. J., & Napolitano, J. (2011). Modern quantum mechanics (2nd ed.). Addison-Wesley.

[8] Vurgaftman, I., Meyer, J. R., & Ram-Mohan, L. R. (2001). Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. Journal of Applied Physics, 89(11), 5815–5875.

[9] West, L. C., & Eglash, S. J. (1985). First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well. Applied Physics Letters, 46(12), 1156–1158.

[10] Yu, P. Y., & Cardona, M. (2010). Fundamentals of semiconductors: Physics and materials properties (4th ed.). Springer.