

ЧЕКСИЗ ЧУҚУР ВА ЧЕКЛИ ПОТЕНЦИАЛЛИ КВАНТ ЎРА МОДЕЛИДА ЭЛЕКТРОН ДИСПЕРСИЯСИ

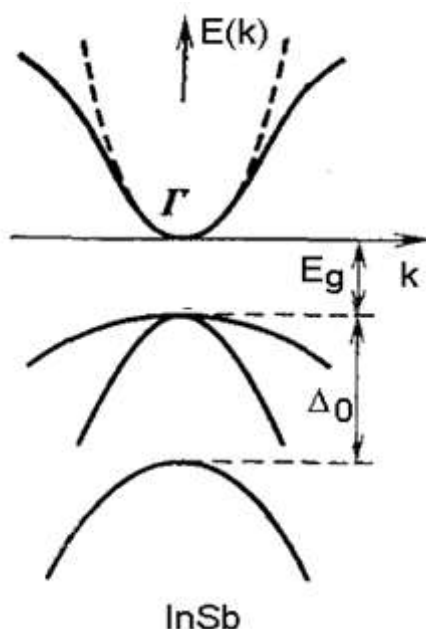
Тоҳиржонов Маҳмуджон Собитжон ўғли
Абдуқаҳоров Хусанбой Мирзоҳид ўғли
Неъматов Илёсбек Равшан ўғли

Наманган давлат университети, Уйчи кўча №316, Наманган 716019,
Ўзбекистон

Аннотация: Бу ишда A_3B_5 гуруҳига мансуб яримўтказгичларда электроннинг икки ўлчамли нопараболик дисперсиясини чексиз чуқур ва чекли потенциалли квант ўрада Кейннинг икки зонали моделидан фойдаланиб таҳлил қилинган. Чекли потенциалли квант ўрада икки ўлчамли электрон газининг турлича характеристикаларини ҳисоблаш мумкин бўлган ифодалар олинган.

Калит сўзлар: A_3B_5 , Квант ўра, Ўтказувчанлик зонаси, Бриллюэн зонасини, Валент зона, Кейн модели, Минизоналар

A_3B_5 гуруҳига мансуб яримўтказгичларда зона тузилиши нопараболиклиги Кейн моделида яхши баҳоланади [1,2,3]. A_3B_5 гуруҳидаги яримўтказгичли бирикмаларда ўтказувчанлик зонаси тубини минимуми – Бриллюэн зонасини марказида (Γ -минимум) жойлашган бўлиб, уларни InSb туридаги яримўтказгичлар дейилади: InSb: InAs, GaSb, GaAs, InP, 1-расм.



1-расм. A_3B_5 гуруҳига мансуб InSb туридаги яримўтказгичлар учун спин-орбитал ўзаро таъсирни ҳисобга олинган ҳолда ўтказувчанлик ва валент зоналари қирғоқлари. Параболик ҳол штрих чизикда кўрсатилган.

Чексиз баланд тўсиқли тўғри бурчакли потенциал ўра модели кўп холларда тақрибий ҳисоблар ва тажрибалар натижаларини интерпретация қилиш учун етарли бўлади. Масалан, бундай модел электронлар ва коваклар (ёки экситон холатлар) спектрини ҳисоблашда квант нуқталарда, квант ўраларда в.х. фойдаланилган.

Шредингер тенгламасини чексиз чуқур квант ўра моделида электронни икки ўлчамли нопараболик дисперсиясини аниқлашга тадбиқини қараб чиқайлик. Бунинг учун, одатдаги уч ўлчамли зона (массив кристал) учун ёзилган дисперсия ифодасидан фойдаланамиз. Хусусий холда, нопараболик дисперсияни икки зонали моделидан [4],

$$E \left(1 + \frac{E}{E_g} \right) = \frac{\eta^2 k^2}{2m_n} \quad (1)$$

(1) га асосан қуйидагини ёзиш мумкин

$$E(1 + \alpha E) = \frac{\eta^2 k^2}{2m_n(0)} = \frac{\eta^2 k_{\parallel}^2}{2m_n(0)} + \frac{\eta^2 k_z^2}{2m_n(0)} \quad (2)$$

бунда, $\alpha \approx 1/E_g$ - зонани нопараболиклик коэффициентини, m_n - ўтказувчанлик зонаси тубидаги электронни эффектив массаси, $k_{\parallel}^2 = k_x^2 + k_y^2$ - квант ўра текислигидаги тўлқин векторини квадрати. Агар эффектив массани энергияга боғланишини қуйидагича киритилса

$$m^*(E) = m_n(0) \cdot (1 + \alpha E) \quad (3)$$

ва тўлқин векторини z –компонентасини $k_z = i\partial/\partial z$ оператор билан алмаштирилса, у холда квант ўрадаги электрон харакатини аниқловчи Шредингер тенгламасига келамиз

$$-\frac{\eta^2}{2m^*(E)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\eta^2 k_{\parallel}^2}{2m^*(E)} + V(z)\psi = E\psi \quad (4)$$

Чексиз чуқур тўғри бурчакли потенциал ўра учун (4) дан қуйидаги дисперсияни олиш мумкин

$$E = \frac{\eta^2 k_{\parallel}^2}{2m^*(E)} + \frac{\eta^2 \pi^2 n_z^2}{2m_n(0)} \quad (5)$$

ёки

$$E(1 + \alpha E) = \frac{\eta^2 k_{\parallel}^2}{2m_n(0)} + \frac{\eta^2 \pi^2 n_z^2}{2m_n(0)} \quad (6)$$

Тўлқин векторининг ўра текислигидаги компонентасининг қиймати поляр координаталарда $0 \div \infty$ сохада, аниқроқ эса – Бриллюэн зонаси $0 \div \pi/a$ ичида ўзгаради. (4) муносабатда, $E(k_{\parallel}, n_z)$ минизоналар сериясини, яъни $n_z = 1, 2, 3, \dots$ га мос $E(k_{\parallel}, 1)$, $E(k_{\parallel}, 2)$, $E(k_{\parallel}, 3)$... ва хоказо дисперсияларни аниқлайди.

Агар уч ўлчовли дисперсия $k_z^2 = k_z^2(E)$ кўринишда, масалан,

$$k^2 P^2 = \frac{E(E + E_g)(E + E_g + \Delta_0)}{E + E_g + 2\Delta_0/3} \quad (7)$$

(7) каби тасвирлаш мумкин бўлса, икки ўлчамли дисперсиясини Кейнни уч зонали моделида ҳам худди шунингдек аниқлаш мумкин.

Чексиз чуқур квант ўра моделидаги электрон дисперсияси [5-9] тадқиқот ишларида электрон газни қатор параметрларини: минизоналараро оптик ўтишлар, энергия холатлар зичлигини температурага боғланиши, Ферми энергияси циклотрон масса ва электрон газ энтропиясини концентрацияга боғланишини ўрганиш учун фойдаланилган.

Амалда, гетеротузилмалардаги квант ўралар чуқурлиги *чекли* бўлиб, унинг катталиги фазовий квантланиш энергияси E_n билан бир тартибда (яъни қийматлари яқин) бўлиши мумкин. Миқдорий жиҳатдан таққослаш ва тажриба маълумотларини интерпретация қилиш учун назарий моделлардаги потенциал ўра чуқурлигини ҳисобга олиш зарур. Бундан ташқари, A_3B_5 яримўтказгичли бирикмалар асосидаги гетеротузилмаларда квант ўра материали (А харфи билан белгилаймиз) учун ва шунингдек барерлар материаллари (В харфи билан белгилаймиз) учун ҳам ўтказувчанлик зонасини нопараболиклигини ҳисобга олиш зарур. Бу ҳолда, иккала материал параметрлари: зона тубидаги эффектив массалари m_A^* ва m_B^* , тақик зоналари кенглиги E_{gA} ва E_{gB} , ва шунингдек (Кейнни уч хонали моделида) спин орбитал ўзаро таъсир катталиклари Δ_A и Δ_B назарияда иштирок этади.

Кейн назариясини гетеротузилмалардаги квант ўрада ҳаракатланувчи электронлар учун умумлаштирилиши ҳозирда яхши ўрганилган ва адабиётларда кенг баён қилинган [3,10-13].

Қуйида, $AlSb/InAs/AlSb$ гетеротузилма квант ўраси мисолида нопараболик дисперсияли икки ўлчамли электронлар дисперсиясини аниқлашни оддий усулларини келтирамиз. Бу моделларда фақат электрон зонаси қаралади. Шу сабабли, назарияда фақат квант ўра материали (А) ва барер қатлам материали (В) электрон зоналарини параметрлари қатнашади.

Баландлиги V бўлган потенциал барерлар (В соҳа: $AlSb$) орасида жойлашган ва кенглиги L бўлган битта квант ўрани (А соҳа: $InAs$) қарайлик.

Энергия саноқ боши - ҳажмий $InAs$ ни ўтказувчанлик зонаси тубидан ҳисобланади. $InAs$ ва $AlSb$ яримўтказгичлар кристал панжараси доимийларидаги фарқ туфайли пайдо бўладиган эффектларни (тузатмаларни) ҳисобга олмаймиз.

Эффектив масса тақрибийлигида уч ўлчамли Шредингер тенгламасини ечимини $\psi = e^{i(k_x x + k_y y)} \phi(z)$ кўринишда қидирамиз. У ҳолда, А ва В соҳалар учун қуйидаги бир ўлчамли тенгламаларни олиш мумкин

$$\frac{\partial^2 \phi_A(z)}{\partial z^2} + q^2 \phi_A(z) = 0, \quad q = \sqrt{\frac{2m_A}{\eta^2} E - k^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_B(z)}{\partial z^2} - \chi^2 \phi_B(z) = 0, \quad \chi = \sqrt{\frac{2m_B}{\eta^2} (V - E) + k^2} \quad (9)$$

Бу ерда, $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ ва $m_{A,B}$ - А ёки В материалдаги электронни энергияга боғлиқ эффектив массаси. (8) и (9) тенгламаларни ечишда қуйидаги чегаравий шартлар

$$\phi_A(0) = \phi_B(0), \quad \left. \frac{1}{m_A} \frac{d\phi_A(z)}{dz} \right|_{z=0} = \left. \frac{1}{m_B} \frac{d\phi_B(z)}{dz} \right|_{z=0} \quad (10)$$

$$\phi_A(L) = \phi_B(L), \quad \left. \frac{1}{m_A} \frac{d\phi_A(z)}{dz} \right|_{z=L} = \left. \frac{1}{m_B} \frac{d\phi_B(z)}{dz} \right|_{z=L} \quad (11)$$

дан фойдаланиб, $E = E(n, k)$ дисперсияни аниқловчи тенгламани топамиз

$$E = E_{\parallel} + E_0 \left[\pi \cdot n - 2 \operatorname{Arcsin} \left(\sqrt{\frac{\gamma^2 (E - E_{\parallel})}{\gamma(\gamma - 1)E + \gamma V + (1 - \gamma^2)E_{\parallel}}} \right) \right]^2. \quad (12)$$

бу ерда $E_{\parallel} = \eta^2 k^2 / 2m_A$ - электронни квант ўра текислигига паралел харакати энергияси, $E_0 = \eta^2 / 2m_A L^2$. Эффектив массалар фарқи $\gamma = m_B / m_A$ нисбат билан аниқланган.

InAs ва AlSb материалларни ўтказувчанлик зонасини нопараболик хусусиятини ҳисобга олиш учун Кейн назариясидаги энергияга боғлиқ эффектив массани турли аппроксимацияларига мурожат қилиш мумкин. Масалан, Кейнни икки зонали моделига кўра, қуйидаги муносабатлардан фойдаланиш мумкин [7-9, 14,15]

$$m_A(E) = m_A(0)(1 + \alpha_A E) \quad (13)$$

$$m_B(E) = m_B(0)(1 + \alpha_B (E - V)) \quad (14)$$

бунда $m_{A,B}(0)$ - электронни ўтказувчанлик зонаси тубидаги эффектив массаси (эркин электрон массаси бирлигида), $\alpha_{A,B}$ - зонани нопараболиклик даражаси. Маълумки [4], икки зонали (1) модел фақат хусусий ҳолда, яъни $\Delta_0 \gg E_g$ шарт бажарилгандагина ҳаққонийдир. InAs яримўтказгичи учун бу шарт аниқ бажарилмайди. Шунга қарамай, (12) ва (13, 14) муносабатлардан олинган дисперсия – аниқроқ усулларда олинган дисперсиядан катта фарқ қилмайди.

Агар, Кейнни уч зонали моделидан фойдаланилса, у ҳолда қуйидаги муносабатларни ёзиш мумкин [16-20]

$$\frac{m_0}{m_A(E)} = 1 + \frac{E_{PA}}{3} \left[\frac{2}{E + E_{gA}} + \frac{1}{E + E_{gA} + \Delta_A} \right] \quad (15)$$

$$\frac{m_0}{m_B(E)} = 1 + \frac{E_{PB}}{3} \left[\frac{2}{E - V + E_{gB}} + \frac{1}{E - V + E_{gB} + \Delta_B} \right] \quad (16)$$

бунда, m_0 - эркин электрон массаси, E_p - Кейн параметри, Δ - валент зонани спин-орбитал ажралиш энергияси (1-жадвалга қаранг).

Айтиб ўтиш керакки, турли энергия сатхлари учун турлича эффектив масса қиймати тўғри келади, масаладаги тўлқин функциялар ҳам шу массаларга боғлиқдир. У ҳолда, шундай усулда топилган турлича минизоналар тўлқин функциялари ўзаро ортогонал бўлмай қолади. Зоналараро ёки минизоналараро электрон ўтишлар матрица

элементларини хисоблашда бу тўлқин функциялар кўпол натижаларга олиб келиши мумкин.

Бироқ юқоридаги усулда топилган минизоналар учун дисперсия қонуни (12) ва (13, 14) ёки (15, 16) муносабатлар икки ўлчамли электрон газини турлича характеристикаларини хисоблашга яроқли деб олиш мумкин.

ФЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР:

1. Evan O. Kane, "Band structure of indium antimonide" J. Phys.Chem. Solids. Pergamon Press, 1957. Vol. 1. pp. 249-261.
- 2 I.M. Tsidilkovsky. Electrons and Holes in Semiconductors (Moskow, Science, 1972), ch.5, p. 444.
3. Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Оптические свойства наноструктур: Учеб. Пособие / Под ред. Е.Л. Ивченко и Л.Е. Воробьева. СПб.:Наука, 2001.–188 с.
4. Б.М.Аскеров.Электронные явления переноса в полупроводниках. - М.: Наука. 1985. 320 с.
5. G.Gulyamov, P.J. Baymatov, B.T.Abdulazizov, A.S.Mahmudov // *Thermal broadening of the density of states of the quasi-two-dimensional electron gas with non-parabolicity of energy spectrum* // International Journal of Applied Physics (SSRG-IJAP) – volume 2, Issue 4, July-August 2015. pp 7-12.
6. G.Gulyamov, P.J. Baymatov, B.T.Abdulazizov // *Effect of Temperature and Band Nonparabolicity on Density of States of Two Dimensional Electron gas* // Journal of Applied Mathematics and Physics, 2016, 4, 272-278, Published Online February 2016 in ciRes. <http://www.scirp.org/journal/jamp>, <http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2016.42034>
7. Б.Т. Абдулазизов, М.С.Тохиржонов, П.Ж.Байматов // *О статистике электронов в квантовой яме InAs/AlSb*, Сборник публикаций мультидисциплинарного научного журнала «Архивариус». VII Международная научно-практическая конференция «Наука в современном мире» (19 марта 2016) г.Киев. стр 6-9. www.archivarius.org.ua
8. Г. Гулямов, П.Ж. Байматов, Б.Т. Абдулазизов, М.С.Тохиржонов // *О термодинамике двумерного электронного газа с непараболической дисперсией* // Самарканд давлат университети Илмий Ахборотнома Журнали, 2016.№5 (99), стр 22-27
9. G.Gulyamov, B.T.Abdulazizov // *On the Thermodynamics of a Two-Dimensional Electron Gas with Non-Parabolic Dispersion* // World Journal of Condensed Matter Physics, 2016, 6, 294-299, Published November 17, 2016 SciRes. <http://www.scirp.org/journal/wjcmp>, <http://dx.doi.org/10.4236/wjcmp.2016.64028>

10. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем / Под ред. А.Я. Шика.–СПб.: Наука, 2001. 160 с.
11. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники: Учебное пособие. –М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006. – 496 с.
12. G. Bastard, J. A. Brum, and R. Ferreira, “Electronic States in Semiconductor Heterostructures”, *Solid State Physics* **44**, 229 (1991).
13. Н.В. Павлов, Г.Г.Зегря // Влияние непараболичности энергетического спектра электронов и легких дырок на оптические свойства гетероструктур с глубокими квантовыми ямами $\text{AlSb}/\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{AlSb}$ // ФТП, **49**, вып.5, с.617-627, (2015)
14. П.Ж. Байматов, Б.Т. Абдулазизов // *О структуре минизон в квантовой яме InAs/AlSb* // Узбекский Физический Журнал, 2016, №5, стр 301-306
15. P.J. Baymatov, B.T. Abdulazizov // *Concentration dependences of the electron effective mass, Fermi energy, and filling of subbands in doped InAs/AlSb quantum wells* // Украинский Физический Журнал. Ukr. J. Phys. 2017. Vol. 62, No. 1, стр 46-50 , doi: 10.15407/ujre62.01.0046
16. Б.Т. Абдулазизов, П.Ж. Байматов // *Непараболичности минизон и свойства вырожденного электронного газа в квантовой яме InAs/AlSb* // Узбекский Физический Журнал, 2016, №6, стр 372-377
17. G.Gulyamov, B.T.Abdulazizov, P.J. Baymatov // *Effects of band nonparabolicity and band offset on the electron gas properties in InAs/AlSb quantum well* // *Journal of Modern Physics*, 2016. **7**, 1644-1650. Published Online September 13, 2016 SciRes. <http://www.scirp.org/journal/jmp>.
<http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2016.713149>
18. B.T. Abdulazizov, G. Gulyamov, P.J. Baymatov, Sh.T. Inoyatov, M.S. Tokhirjonov. *SPIN* **12**, No 1, 2250002 (7 pages) (2022).
19. P.J. Baymatov, A.G. Gulyamov, B.T. Abdulazizov, Kh.Yu. Mavlyanov, M.S. Tokhirjonov. *International Journal of Modern Physics B* 2150070 (1-13), 2022 World Scientific Publishing Company DOI: 10.1142/S0217979221500703 (scopus)
20. B.T. Abdulazizov. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials* **6**(1), 32-37 (2022). DOI: 10.32523/ejpfm.2022060103