

KVANT O‘RANING ENERGETIK HOLATLAR ZICHLIGIGA DEFORMATSIYANING TA’SIRI.

Dadamirzayev Muzaffar G‘ulomqodirovich
Namangan muhandislik- texnologiya instituti, katta o‘qituvchisi
Erkaboyev Ulug‘bek Inayatillayevich
Namangan muhandislik-texnologiya instituti, f.-m.f.d. professor
Tel: 99-436-77-55 e-mail: muzaffardadamir81@gmail.com

Annotasiya: Ushbu ishda kvant o‘rali yarimo‘tkazgichlardagi elektronlar va kovaklarning Landau sathlariga deformatsiyaning ta’siri ko‘rib chiqilgan. Kvadratik dispersiya qonuniga bo‘ysinuvchi kichik o‘lchamli yarimo‘tkazgichlarda kvant ossillyatsiya effektlarining haroratga bog‘liqligiga deformatsiyaning ta’siri tadbiq etilgan.

Kalit so‘zlar: Kvant o‘ra, geterostruktura, magnit maydon, deformatsiya, kvant ossillyatsiya, taqiqlangan zona, effektiv massa, energetik holatlar zichligi.

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ КВАНТОВОЙ ЯМЫ.

Дадамирзаев Музаффар Гуломкодирович
Наманганский инженерно- технологический институт, старше преподаватель
Эркабоев Улуғбек Инаятиллаевич
Наманганский инженерно-технологический институт, д.н.ф.-м. профессор
Тел: 994367755 e-mail: muzaffardadamir81@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассмотрено влияние деформации на уровни Ландау электронов и дырок в квантовой яме полупроводников. Исследовано влияние деформации на температурную зависимость эффектов квантовых осцилляций в низкоразмерных полупроводниках, подчиняющихся закону квадратичной дисперсии.

Ключевые слова. квантовая яма, гетероструктура, магнитное поле, деформация, квантовые осцилляции, запрещенная зона, эффективная масса, плотность энергетических состояний.

INFLUENCE OF DEFORMATION ON THE DENSITY OF ENERGY STATES OF A QUANTUM WELL.

Dadamirzayev Muzaffar Gulomkodirovich
Namangan Institute of Technology, senior lecturer
Erkaboev Ulugbek Inayatillaevich
Namangan Institute of Technology, DSc, fiz.-mat. Sciences, professor
Тел: 994367755 e-mail: muzaffardadamir81@gmail.com

Abstract. In this work, the influence of deformation on the Landau levels of electrons and holes in the quantum well of semiconductors is considered. The

effect of deformation on the temperature dependence of quantum oscillation effects in low-dimensional semiconductors obeying the quadratic dispersion law has been studied.

Keywords. quantum well, heterostructure, magnetic field, deformation, quantum oscillations, band gap, effective mass, density of energy states.

Kirish. Kvant o'lchamli yarimo'tkazgichli materiallarni elektron, optik va magnit xususiyatlari bo'yicha turli o'lcham va tuzilish geometriyasi, ushbu yarimo'tkazgichlarga deformatsiya, xarorat va hajmiy bosimning ta'sirini ko'plab shu soha olimlari tomonidan muntazam ravishda tadqiqot olib borilmoqda. Hozirgi kunda yarimo'tkazgich texnologiyalari zamonaviy elektronika, nanoelektronika va kvant hisoblash sohasidagi asosiy yutuqlarni ta'minlamoqda. Yangi turdagi hajmiy va kvant o'ra asosidagi yarimo'tkazgich materiallari esa yuqori tezlikdagi, kam energiya sarflovchi va yuqori sezgirlikka ega qurilmalarni yaratish imkoniyatini beradi. Bunday materiallardagi kvant ossillyatsiya effektlari masalan, Shubnikov-de Gaaz va de Gaaz-van Alfen effektlari materialning energetik strukturasi va zaryad tashuvchilarning xossalarini chuqurroq o'rganishga yordam beradi.

Adabiyotlar taxlili. Yangi turdagi hajmiy va kvant o'ra asosidagi yarimo'tkazgichlarda kvant ossillyatsiya effektlariga bosim, deformatsiya va haroratlarning ta'sirini o'rganish uchun turli xil tajribalar sinovlardan o'tkazilmoqda hamda yangi ilmiy-amaliy natijalar olinmoqda. Chunonchi, energetik holatlar zichligining ossillyatsiya jarayonlari barcha kvant effektlarini ossillyatsiyalanishlariga olib kelishi ushbu [1-5] ishlarda keltirib o'tilgan. [5-10] ishlarda hajmiy va nanostrukturali yarimo'tkazgichlarning magnitoqarshilik, magnit singdiruvchanlik va kvant Xoll effekti ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligini yangi modeli taklif etilgan. Bunda, magnitoqarshilik va magnit singdiruvchanlik ossillyatsiyalarining haroratga bog'liqligini diskret Landau sathlarini termik kengayishini hisobga olgan holda nazariy mexanizmlari ishlab chiqilgan. Ammo, ushbu ishlarda energetik holatlar zichligi, magnitoqarshilik va magnit singdiruvchanlik ossillyatsiyalarini parabolik dispersiya qonunlari uchun deformatsiyaga bog'liqligi umuman ko'rib chiqilmagan.

Ushbu tadqiqot ishining asosiy maqsadi kvant o'rali yarimo'tkazgichlarning o'tkazuvchanlik zonasidagi Landau sathlariga deformatsiyaning ta'sirini hisoblash usulini nazariy jihatdan aniqlashdan iborat.

Taxlil va natijalar. To'g'ri burchakli kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi Landau sathlariga harorat va deformatsiyaning ta'sirini parabolik dispersiya qonuni uchun ko'rib chiqaylik. Bunda, magnit maydon induksiyasi Z o'qi bo'ylab yo'nalgan bo'lib, kvant o'raning qalinligiga parallel, XOY tekisligiga tik yo'nalgandir. Zaryad tashuvchilarning energetik spektri bo'yicha sanoq boshini kvant o'raning valentlik zonasi shipini tanlab olaylik. U holda, erkin elektronlar va kovaklar uchun kvantlovchi magnit maydon ta'siridagi energetik spektrlari qo'yidagi formulalar orqali hisoblanadi:

$$E_c^{2d}(B, N_L, n_z, d) = E_g^{2d} + (N_L + \frac{1}{2})\hbar\omega_c + \frac{\pi^2\hbar^2}{2m_c d^2} n_z^2 \quad (1)$$

$$E_v^{2d}(B, N_L, n_z, d) = - \left((N_L + \frac{1}{2})\hbar\omega_v + \frac{\pi^2\hbar^2}{2m_p d^2} n_z^2 \right) \quad (2)$$

Kvadratik dispersiya qonuni uchun [11-12]:

$$E = \hbar^2 k^2 / 2m, \text{ unda } S = \pi k_{\perp}^2 = \pi(k^2 - k_z^2),$$

$$m_c = \frac{\hbar^2}{2\pi} \frac{\partial S}{\partial E} = m. \quad (3)$$

Kvant o'rali geterostrukturaning parabolik dispersiya qonuni uchun energetik holatlar zichligining haroratga bog'liqligi $N_s^{2d}(E, B, T, d)$ formulasi quyidagicha ifodalangan [13]:

$$N_{s,z}^{2d}(E, B, T, d) = \sum_{N_L, n_z} \frac{eB}{\pi\hbar} \cdot \frac{1}{kT} \exp \left[- \frac{\left(E - \left(\left(N_L + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c + \frac{\pi^2\hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (4)$$

U holda, (1) shartga asosan (4) ni quyidagicha yozish mumkin:

$$N_s^{2d}(E, B, T, d) = \sum_{N_L, n_z} \frac{eB}{\pi \hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \exp \left[- \frac{\left(E - \left(E_g^{2d} + \left(N_L + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (5)$$

(5) formulaning (4) dan farqi shundan iboratki, N_s^{2d} ikki o'lchamli holatlar zichligi kvant o'raning ta'qiqlangan zona kengligiga bog'liq bo'lmoqda.

Endi kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi energetik holatlar zichligiga deformatsiyaning ta'sirini ko'rib chiqaylik. Ma'lumki, yarimo'tkazgichli strukturalarga deformatsiya ta'sir etganda uning qarshiligi o'zgaradi. Ushbu deformatsiya ta'sirida o'zgargan qarshilikka pe'zo (tenzo) qarshilik deb ataladi. Tenzoqarshilik effekti asosan yarimo'tkazgichli strukturalarning kristall panjarasi simmetriyasi o'zgarishiga qarab elastik deformatsiya turlarini 2 sinfga ajratadi. Yarimo'tkazgichlar kristall panjara simmetriyasi har tomonlama deformatsiya hisobiga deyarli o'zgarmaydi. Shuning uchun kristall panjaraning simmetrik nuqtai nazardan o'zgarishsiz qolishi har qanday materialning qarshilik komponentini ushbu deformatsiya qo'llanilganda o'zgartira olmaydi. Odatda, yarimo'tkazgichli strukturalarda deformatsiyani tasiri tadbiiq etilganda hajmiy (har tomonlama) siqilish ko'rib chiqiladi [14]. Hajmiy deformatsiya ta'sirida kristall panjaraning deformatsiya tenzori (u_{ii}) skalyar (u) ga aylanadi, panjara doimiysi esa quyidagicha o'zgaradi:

$$a' = a(1 - u) \quad (6)$$

bu yerda a' – deformatsiyadan keyingi panjara doimiysi, a - deformatsiyadan oldingi panjara doimiysi, u - nisbiy deformatsiya.

Yarimo'tkazgichli strukturalarning atomlararo masofaning kamayishi zaryad tashuvchilarning to'lqin funksiyalarining “qoplanish” darajasini oshiradi. Bu esa, o'z navbatida material kristall panjarasining atomlararo o'zaro ta'sir potensial energiyasini $W(a)$ o'zgarishiga olib keladi. Agar

$$W_{\min}(a) = W(a_0)$$

shartni kiritilsa, u holda potensial energiyaning W qiymati $a < a_0$ va $a > a_0$ xususiy chegaralarda ham ortishi lozim. Yarimo'tkazgichli strukturalarning kristall

panjarasini atomlararo potensial energiyasi W ni o'zgarishi, kvant o'raning ruxsat etilgan chegara zonalarini siljishiga olib keladi. Bu o'z navbatida kvant o'raning ta'qiqlangan zona kengligini o'zgarishiga sabab bo'ladi.

Ya'ni, [14]:

$$\alpha = - \frac{1}{\Delta \varepsilon_0} - \frac{\partial \Delta \varepsilon_0}{\partial P} \quad (7)$$

U holda

$$\Delta \varepsilon(P) = \Delta \varepsilon_0(1 - \alpha P) \quad (8)$$

hajmiy deformatsiya ta'sirida kvant o'raning ta'qiqlangan zona kengligining o'zgarishi kvant o'ra o'tkazuvchanlik zonasi tubi E_c va valent zonasi shipi E_v larning siljishlaridan hosil bo'ladi.

Kuchsiz deformatsiya ta'sirida

$$\begin{aligned} E_c(\varepsilon) &= E_c(0) + \Delta_c \varepsilon \\ E_v(\varepsilon) &= E_v(0) + \Delta_v \varepsilon \end{aligned} \quad (9)$$

$E_g(\varepsilon) = E_c(\varepsilon) - E_v(\varepsilon)$ shartdan foydalangan holda va (9) ga ko'ra, quyidagi formula kelib chiqadi:

$$E_g(\varepsilon) = E_g(0) + \Delta \varepsilon \quad (10)$$

bu yerda, Δ_c va Δ_v – kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonalaridagi deformatsiya natijalari.

Hajmiy deformatsiyaning asosiy qismlaridan biri kristall panjaraning har tomondan siqilishi (cho'zilishi) nazarda tutiladi. Shuning uchun hajmiy deformatsiya bilan bog'liq bo'lgan elektronlar va kovaklar konsentratsiyasining o'zgarishi barcha holatlarda kuzatilishi shart. Zaryad tashuvchilarning $n(\varepsilon)$ konsentratsiyasi o'zgarishi – bu kvant o'raning energetik holatlar zichligini o'zgarishiga olib keladi. U holda (10) ni (5) ga qo'yishimiz natijasida quyidagi

$N_s^{2d}(E, \varepsilon, B, T)$ kelib chiqadi:

$$N_s^{2d}(E, B, T, d) = \sum_{N_L, N_z} \frac{eB}{\pi\hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \exp \left[- \frac{\left(E - \left(E_g^{2d}(E_g(0) + \Delta\varepsilon) + \left(N_L + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (11)$$

Shunday qilib, hajmiy deformatsiya ta'siridagi kvant o'raning energetik holatlar zichligining B, T va d ga bog'liqligini yangi analitik ifodasi keltirib chiqarildi.

Xulosa. Ilk bor, kvant o'rali yarimo'tkazgichlarni energetik holatlar zichligiga deformatsiyaning ta'siri tadbiq etildi. Kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi holatlar zichligini deformatsiya, magnit maydon va xaroratlarga bog'liqligini yangi analitik ifodasi keltirib chiqarildi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Herrero C.P., Ramirez R. Quantum effects in two-dimasional silicon carbide // Journal of Physics and chemistry of Solids. 2022. Vol.171, Article ID 1100980. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110980>
2. Gudina S.V., Bogoliubskii A.S., Klepikova A.S., Neverov V.N., Turutkin K.V., Podgornykh S.M., Shelushinina N.G., Yakunin M.V., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A. Anomalous phase shift of magneto-oscillations in HgTe quantum wells with inverted band structure: Quantum Hall effect and the large-scale impurity potential // Low Temperature Physics. 2019. Vol.45, Iss.4, pp.412-418. <https://doi.org/10.1063/1.5093521>
3. Litvinov V.I., Dugaev V.K., Volkov V.L., Oszwaldowski M. Deformation Potentials in Narrow-Gap Quantum Wells // Inorganic Materials. 1997. Vol. 33, No. 2, pp. 203–207.
4. Neifel'd É.A., Demchuk K.M., Kharus G.I., Bubnova A.É., Domanskaya L.I., Shtrapein G.D., Paranchich S.Yu. Shubnikov-de Haas oscillations in HgSe□Fe□ and HgSe□Co□ under hydrostatic pressure // Semiconductors. USA. 1997. –Vol. 31, Iss.3. –P.261-264.

5. Gulyamov G., Erkaboev U.I., Sharibaev N.Yu. The de Haas-van Alphen effect at high temperatures and low magnetic fields in semiconductors // *Modern phys. Lett. B. Singapore*. 2016. Vol. 30. No.7. P. 1-7.
6. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I., Sayidov N.A., Negmatov U.M., Mashrapov A. Determination of the band gap of heterostructural materials with quantum wells at strong magnetic field and high temperature // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol.2789, Iss.1, pp.040056-1-040056-7.
7. Gulyamov G., Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I., **Sayidov N.A.** Determination of the dependence of the two-dimensional combined density of states on external factors in quantum-dimensional heterostructures // *Modern Physics Letters B*. 2023. Vol.37, No.10, pp.2350015-1-2350015-14.
8. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I., Negmatov U.M., Sayidov N.A. Influence of a magnetic field and temperature on the oscillations of the combined density of states in two-dimensional semiconductor materials // *Indian Journal of Physics*. 2024. Vol.98, pp.189-197.
9. Abdulazizov, B. T. Cyclotron mass of an electron in strong magnetic fields in a wide InAs quantum well // *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. 2022. Vol.6, pp.32-37.
10. Абдулазизов, Б. Т., Тохиржонов, М. С., & Байматов, П. Ж. О статистике электронов в квантовой яме InAs/AlSb. // *Архивариус*. 2016(3). с.6-9.
11. Цидильковский И.М. Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика // Издательство «Наука» Главная редакция физико - математической литературы, М., 1972 г. С.441-442. 640 С.
12. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. Москва, Наука. 1977. С.180-185. 684 С.
13. U.I. Erkaboev, M.G'. Dadamirzayev. Tor zonali kvant o'raning energetik holatlar zichligining harorat va magnit maydonga bog'liqligini

modellashtirish // yarimo'tkazgichlar fizikasining rivojlanishi va istiqbollari mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konfrensiyasi. Andijon. 2024. 48-49 betlar.

14. П. И. Баранский, В. П. Клочков, И. В. Потыкевич. Полупроводниковая электроника // издательство «наукова думка» Киев — 1975. С.103-104.