

ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОМБИНИРОВАННЫЙ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ В ПРЯМОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Эркабоев Улугбек Инаятиллаевич

Наманганский инженерно-технологический институт, д.н.ф.-м. профессор

Сайидов Нозимжон Абдулнасирович

Наманганский инженерно-технологический институт, старший преподаватель

Телефон: 99-870-58-68, e-mail: sayidovnozimjon@gmail.com

Аннотация: В этой работе внешние эффекты плотности комбинированных состояний квантующего магнитного поля в наноразмерных гетероструктурах с прямым полем. Была разработана новая математическая модель для расчета зависимости плотности двумерного комбинированного состояния квантовых обмоток от температуры в квантующих магнитных полях. Предложенная модель объясняет экспериментальные результаты в наноразмерных дисперсионных полупроводниках с правильным полем, подчиняющимся параболическому закону.

Ключевые слова: гетероструктура, наноразмер, квантовая катушка, плотность состояний, плотность состояний, колебание, наноразмер, магнитное поле, двумерность, полупроводники.

EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE COMBINED DENSITY OF STATES IN DIRECT-ZONE SEMICONDUCTORS WITH QUANTUM WELLS

Erkaboev Ulugbek Inayatillaevich

Namangan Institute of Engineering and Technology, DSc professor

Sayidov Nozimjon Abdunosirovich

Namangan Institute of Engineering and Technology, senior teacher

Phone: 99-870-58-68, e-mail: sayidovnozimjon@gmail.com

Abstract: In this work, the external effects of the density of the combined states of the quantizing magnetic field in nanoscale heterostructures with a direct field. A new mathematical model has been developed to calculate the dependence of the density of the two-dimensional combined state of quantum windings on temperature in quantizing magnetic fields. The proposed model explains the experimental results in nanoscale dispersive semiconductors with a regular field obeying the parabolic law.

Key words: heterostructure, nanoscale, quantum coil, density of states, density of states, oscillation, nanoscale, magnetic field, two-dimensional, semiconductors.

KVANT O‘RALI TO‘G‘RI ZONALI YARIMO‘TKAZGICHLARDA KOMBINIRLANGAN HOLATLAR ZICHLIGIGA HARORATNING TASIRI

Erkaboev Ulug‘bek Inayatillaevich

Namangan muhandislik-texnologiya instituti, f.-m.f.d. professor

Sayidov Nozimjon Abdunosirovich

Namangan muhandislik-texnologiya instituti, katta o‘qituvchi

Tel: 99-870-58-68, e-mail: sayidovnozimjon@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu ishda nanoo‘lchamli to‘g‘ri sohali geterostrukturalarda kvantlovchi magnit maydonining kombinatsiyalangan holatlar zichligi haroratiga ta’siri o‘rganilgan. Kvantlovchi magnit maydonlarida kvant o‘ralarining ikki o‘lchamli kombinatsiyalangan holat zichligining haroratga bog‘liqligini hisoblash uchun yangi matematik model ishlab chiqilgan. Taklif etilgan model nanoo‘lchamli, to‘g‘ri sohali, parabolik qonunga bo‘ysunuvchi dispersiyali yarimo‘tkazgichlardagi eksperimental natijalarni izohlaydi.

Kalit soʻzlar: geterostruktura, nanooʻlcham, kvant oʻra, holatlar zichligi, holatlar zichligi, ossillyatsiya, nanooʻlcham, magnit maydon, ikki oʻlchamli, yarimoʻtkazgichlar.

Kirish

Maʼlumki, tashqi omillar (harorat, magnit maydoni va bosim)ning kvant oʻlchamli geterostrukturalarga taʼsiri zadyad tashuvchilarning energetik satx holatlari oʻzgarishiga va, natijada, magnitooptik yutilish chegarasining siljishiga olib keladi. Nanooʻlchamli yarimoʻtkazgichlarning magnitooptik yutilish spektri ruhsat etilgan sohaning turli minimumlari orasidagi energetik masofa bilan aniqlanadi. Bundan kelib chiqadiki, kvant oʻrasining taʼqiqlangan sohasi kengligi tashqi omillar taʼsirida yoki torayadi, yoki kengayadi.

Adabiyotlar taxlili

Magnitooptik yutilish spektri koʻplab xajmli va kichik oʻlchamli optoelektron asboblar uchun asosiy talab hisoblanadi. Kvant oʻrali va $\alpha_B^{2d}(\hbar v, B, d)$ toʻgʻrisohali geterostrukturalarda magnitooptik yutilish jarayonini kombinatsiyalangan holatlar zichligi funksiyasi sifatida ifodalash mumkin. Kvantlovchi magnit maydoni taʼsiri ostida, kombinatsiyalangan holatlar zichligi $\hbar v$ foton energiyasi bilan ajralgan, toʻlgan valentli soha elektron holatlari bilan oʻtkazuvchan sohaning boʻsh elektron holatlari orasidagi ruhsat etilgan magnitooptik oʻtishlar sonining meʼyorini taʼminlaydi. Taniqli ilmiy adabiyotlarda magnit maydoni mavjud boʻlgan va boʻlmagan holatlarda ruhsat etilgan soha energetik holat zichligini kombinatsiyalangan holat zichligi bilan bogʻlash boʻyicha bir necha urinishlar toʻgʻrisida maʼlumotlar berilgan [1-2]. Biroq, kombinatsiyalangan holat zichligining olingan barcha empirik va soddalashtirilgan ifodalari past haroratlarda bosimning yoʻqligi bilan chegaralangan.

$$N_{jds}^{2d}(\hbar v, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)) = \frac{eB}{\pi\hbar} \sum_{N_L^c, N_L^v, n_z} \delta(\hbar v - E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)) \quad (1)$$

Yuqoridagi formuladan tushunarliki, $h\nu > E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)$ bo'lganda, kombinatsiyalangan holat zichligi energilar funksiyasi sifatida o'zida deltasimon tabiatni aks ettiradi. Kvantlovchi magnit maydon ta'sirida, $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z))$ – ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligi kvant o'rasining ruhsat etilgan sohasidagi zaryad tashuvchilarning energetik spektri bilan aniqlanadi.

Tadqiqot metodologiyasi

Tajribalarning ko'rsatishicha, elektronlar va teshiklarning holat zichliklari haroratga bog'langan. Kvant o'rasidagi elektronlar va teshiklarning holatlar zichligining haroratga bog'liqligi Landau diskret sathlarining termik chaplanishi orqati izohlanadi [3-4]. [4-5] ishlarda ko'rsatilishicha, yetarlicha katta haroratlarda, kvant o'rasining o'tkazuvchan sohasidagi elektronlar holat zichligi diskret Landau sathidan uzlukchiz energetik spektrga aylanadi. Past haroratlarda esa, yaxlit energetik spektr Landau sathlariga yoyilishi bilan bir qatorda, kvantlovchi magnit maydoni kvant o'rasi ruhsat etilgan sohasining holatlar zichligiga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Bu holatda, harorat ko'tarilgani sari, zaryad tashuvchilarning o'zaro to'qnashuvlari va issiqlik harakati Landau diskret sathlarini kvant o'rasi holatlar zichligining yaxlit spektriga aylantirib, chaplab yuboradi. Bundan kelib chiqadiki, zaryad tashuvchilarning diskret Landau sathlarining haroratga bog'liqligi kvant o'ralarining kombinatsiyalangan holatlar zichligini deltasimon funksiyalar qatoriga yoyilmasi orqali ifodalanishi mumkin. Ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligini deltasimon funksiyalar qatoriga yoyish yo'li bilan tadqiq qilish orqali kvant yamali geterostrukturalarda sohalararo magnitooptik yutilish assillyatsiyasining haroratga bog'liqligini tushuntirishga erishildi. Ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligining haroratga bog'liqligi kvant o'rasining ruxsat etilgan sohasida zaryad tashuvchilarning diskret Landau sathlarining termal kengayishi bilan aniqlanadi.

$T=0$ bo'lganda, Gauss taqsimot funksiyasi deltasimon bo'ladi va quyidagi ifoda orqali aniqlanadi [6]:

$$Gauss(E, T) = \frac{1}{kT} \cdot \exp \left(- \frac{(E - E_i)^2}{(kT)^2} \right) \quad (2)$$

Bundan tashqari, sohalararo magnitooptik yutilishni ifodalash uchun, odatda, kvant o'rasining har bir energetik spektri chaplash parametrli Gauss qonuni bo'yicha chaplanadi deb faraz qilinadi. Bunday yondoshish kvant yamasida ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligining haroratga bog'liqligi bilan ifodalanishi mumkin. Bundan kelib chiqadiki, kvant yamasida zaryad tashuvchilarning chuqur to'ldirilgan diskret Landau sathlari ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligi bilan eksponensial bog'langan. Ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligi $- N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, n_z))$ ning haroratga bog'liqligini hisoblash uchun $T=0$ da $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z))$ ma'lum energiya funksiyasi $- E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)$ ga teng deb hisoblaymiz. Kvant yamali geterostruktura uchun, kuchli magnit maydonida ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligi (1) formula bo'yicha hisoblanadi. Harorat ko'tarilgani sari, valent sohasi va o'tkazuvchan soha energiyasi $E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)$ bo'lgan kvant o'rasining ruxsat etilgan sohasida har bir kombinatsiyalangan holatlar zichligi chaplanadi. $E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)$ energiyali $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z))$ harorat chaplanishi Shokli-Rid-Xoll statistikasi bilan hisoblab topiladi. Shunday qilib, kvantlovchi magnit maydoni ta'siri ostida, kvant o'rasining ruxsat etilgan sohasida, barcha holatlarning termik chaplanishi hissasini hisobga oluvchi natijaviy ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligi barcha chaplanishlarning yig'indisi bilan aniqlanadi. Bundan kelib chiqadiki, chekli T haroratda, nanoo'lchamli yarim o'tkazgichli strukturalar uchun hisoblash $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z))$ ning Gauss funksiyalari bo'yicha qatorga yoyishga olib kelinadi.

(1) formulada ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligining termik chaplanishi hisobga olinmaydi. Agar $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z))$ ni (2) formula bo'yicha qatorga yoysak, u holda kvant yamasining ruxsat etilgan sohasida ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligining haroratga bog'liqligini hisobga olish mumkin [7]. Kuchli magnit maydonida, kvant o'rasi kombinatsiyalangan

holatlar zichligining termik chaplanishi zaryad tashuvchilarning disret Landau satxlarini silliqilanishiga olib keladi, termik chaplanish esa (2) formula orqali hisoblanadi. $T=0$ bo'lganda, (2) formula quyidagi deltasimon funksiya ko'rinishini oladi:

$$\lim_{T \rightarrow 0} Gauss(E, E_i, T) \rightarrow \delta(E - E_i) \quad (3)$$

Shunday qilib, (1) va (2) formulalardan kelib chiqadiki, kvantlovchi magnit maydon ta'sir qilganda, kvant o'rasi kombinatsiyalangan holatlar zichligining haroratga bog'liqligi quyidagi analitik ifodaga olib kelinadi:

$$N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z)) = \frac{eB}{\pi\hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \sum_{N_L^c, N_L^v, n_z} \exp \left[-\frac{\left(\hbar\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_{cv}^* d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (4)$$

Bu yerda, $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z))$ – kuchli magnit maydoni mavjud bo'lganda, yevant o'rasining ruxsat etilgan sohasida kombinatsiyalangan holatlar zichligi ossillyatsiyasining haroratga bog'liqligi.

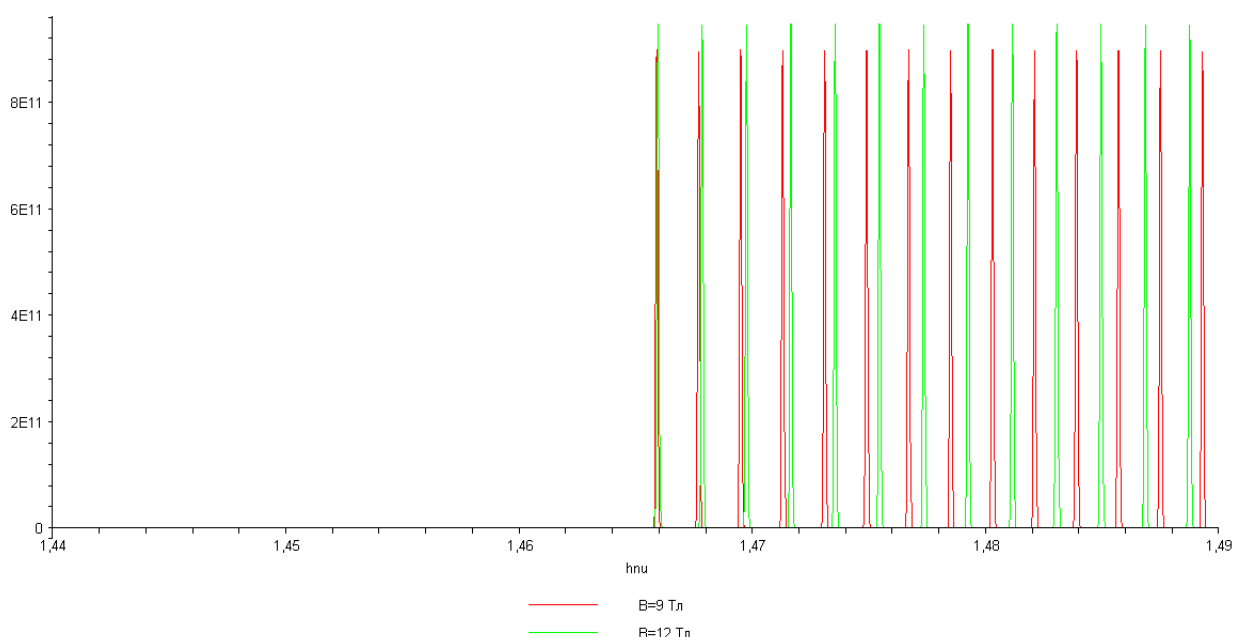
Ushbu yangi analitik formula kvantlovchi magnit maydonining kvant o'rali geterostrukturalarda ikki o'lchamli kombinatsiyalangan holatlar zichligining haroratga bog'liqligiga ta'sirini ifodalaydi. Olingan bu ifoda turli magnit maydonlari va haroratlardagi kvant o'ralarida, sohalararo magnitooptik yutilish ossillyatsiyasining eksperimental ma'lumotlarini qayta ishlash uchun qulaydir. Shunday qilib, tashqi faktorlar (harorat va magnit maydoni) ning nanoo'lchamli yarimo'tkazgich strukturalarda ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligiga ta'sirini ifodalovchi matematik model yaratildi.

Tahlil va natijalar

[8-9] ilmiy ishlardan ma'lumki, kvantlovchi magnit maydonining ikki o'lchovli elektron tizimlarga ta'siri kvant o'ralarda zaryad tashuvchilarni kvant ushlab turish natijasida paydo bo'luvchi juda qiziq fizik xususiyatlarni namoyish qiladi.

Ushbu kvant cheklash natijasida kvant o'rasidagi zaryad tashuvchilarning ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligi Van Xova singulyarligini namoyish qiladi. U yerda, ideal cheksiz nol o'lchamli panjara (kvant nuqta) bo'lgan holda, kombinatsiyalangan holatlar zichliklari energiyaning aniq qiymatlari uchun cheksizlikka intiladi.

Ko'p sondagi ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichliklarini bitta energiya qiymati bilan chegaralash, favqulotda yuqori magnitooptik yutilish, yuqori termoelektrik yurituvchi kuch, kvantlangan elektron o'tkazuvchanlik va xokozolar kabi ajoyib fizik xususiyatlarga olib keladi. Ushbu xususiyatlarga asoslangan tatbiqlar, yangi, muhim nanotexnologik qurilmalar va elektron asboblarni yaratilishiga olib klishi mmkin.



1-rasm. $T=4 \text{ K}$ haroratda GaAs/AlGaAs kvant o'rali ($d=14 \text{ nm}$) to'g'ri sohali geterostrukturalarda foton energiyasi yutilishida kvantlovchi magnit maydonining ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligiga ta'sir

Xulosa

Xususan, [9-10] ilmiy ishda, har xil toklarda ishlovchi turli to'liq uzunligidagi (binafsha, ko'k, yashil rangli) nurlashishli InGaN/GaN kvant o'ralari asosida geterostrukturalarning ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligi tadqiq qilingan. Natijalar shuni ko'rsatadiki, tok orttirilganda nurlanishning ko'k siljishi ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligining o'zgarishi bilan bog'liq. Ushbu ishda, InGaN/GaN kvant o'rasining ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligining magnit maydoni bo'lmaganda va $T=300$ K haroratda foton yutilishiga bog'liqligi topilgan. Bu yerda InGaN/GaN kvant o'rasi ta'qiqlangan sohasi kengligi $E_g(0)=3.2$ eV ga teng.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Stilbans L.S. Physics of semiconductors. Moscow, "Soviet Radio". 1967. pp. 416-421.
2. A.V.Mikhailov, A.V.Trifonov, O.S.Sultanov, I.Yu.Yugova, I.V.Ignatiev. Quantum beats of light and heavy-hole excitons in reflection spectra of GaAs/AlGaAs quantum well. Semiconductors. 2022, Vol.56, No.7, pp. 672-676.
3. U.I.Erkaboev, R.G.Rakhimov, N.A.Sayidov, J.I.Mirzaev. Modeling the temperature dependence of the density oscillation of energy states in two-dimensional electronic gases under the impact of a longitudinal and transversal quantum magnetic field. Indian Journal of Physics. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12648-022-02435-8>
4. Yu-Shou Wang, Nai-Chuan Chen, Chun-Yi Lu, Jenn-Fang Chen. Optical joint density of states in InGaN/GaN-based multiple-quantum-well light-emitting diodes. Physica B. 2011. Vol.406. pp. 4300–4303.

5. Bozorov, K. N., Mamatkarimov, O. O., & Abdulazizov, B. T. (2022). Electric and ionic conductivity of potassium antimony tungstate with addition of alkali metals. «Узбекский физический журнал», 24(2), 129-132.
6. Ulugbek Erkaboev, Rustamjon Rakhimov, Jasurbek Mirzaev, Nozimjon Sayidov, Ulugbek Negmatov, Abdulla Mashrapov. Determination of the band gap of heterostructural materials with quantum wells at strong magnetic field and high temperature // Problems in the textile and light industry in the context of integration of science and industry and ways to solve them: (PTLICISIWS-2022) 5–6 May, 2022, Namangan, Uzbekistan, Volume 2789, Issue 1, JUNE 23 2023, <https://doi.org/10.1063/5.0145556>
7. Abdulazizov, B. T. (2022). Cyclotron mass of an electron in strong magnetic fields in a wide InAs quantum well. Eurasian Journal of Physics and Functional Materials, 6(1), 32-37.
8. B.T. Abdulazizov/Cyclotron mass of an electron in strong magnetic fields in a wide InAs quantum well/ Eurasian Journal of Physics and Functional Materials 2022, 6(1), 32-37, [DOI: 10.32523/ejpfm.2022060103](https://doi.org/10.32523/ejpfm.2022060103)
9. Erkaboev, U.I., Gulyamov, G., Mirzaev, J.I., Rakhimov, R.G., Sayidov N.A. Calculation of the Fermi-dirac function distribution in two-dimensional semiconductor materials at high temperatures and weak magnetic fields // Nano, 2021, 16(9), 2150102, <https://www.scopus.com/sourceid/11300153732>
10. Erkaboev, U.I., Sayidov N.A., Negmatov, U.M., Rakhimov, R.G., Mirzaev, J.I. Influence of a quantizing magnetic field on the Fermi energy oscillations in two-dimensional semiconductors // International Journal of Applied Science and Engineering, 2022, 19(2), 2021123, <https://www.scopus.com/sourceid/21100822732>