



UDK: 538.955; 621.3.082.782

Ulugbek ERKABOYEV,
Namangan injener-texnologiya instituti professori, d.n.f.-m
Nozimjon SAYIDOV,
Namangan injener-texnologiya instituti tayanch doktoranti
Ulugbeka NEGMATOV,
Namangan injener-texnologiya instituti tayanch doktoranti
E-mail: sayidovnozimjon@gmail.com

NamMQI professori, f.-m.f.d. M.Dadamirzayev taqrizi asosida

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЛОТНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Аннотация

В работе исследуется зависимость комбинированных осцилляций плотности состояний от сильного магнитного поля в гетероструктурах на основе прямоугольных квантовых катушек. Исследовано влияние квантующего магнитного поля на температуру комбинированной плотности состояний в наноразмерных гетероструктурах реального поля. Разработана новая математическая модель для расчета температурной зависимости двумерной комбинированной плотности состояний квантовых катушек в квантующих магнитных полях. Предложенная модель объясняет экспериментальные результаты в наноразмерных полупроводниках с регулярным полем и параболической дисперсией.

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

EFFECT OF MAGNETIC FIELD AND TEMPERATURE ON THE DENSITY OF COMBINED STATES IN HETEROSTRUCTURES WITH QUANTUM WELL

Annotation

In this work, the dependence of the combined state density oscillations on the strong magnetic field in heterostructures based on rectangular quantum coils is studied. The influence of the quantizing magnetic field on the temperature of the combined density of states in nanoscale real-field heterostructures is studied. A new mathematical model has been developed to calculate the temperature dependence of the two-dimensional combined state density of quantum coils in quantizing magnetic fields. The proposed model explains the experimental results in nanoscale, regular field, parabolic dispersion semiconductors.

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

KVANT O'RALI GETEROSTRUKTURALARDA KOMBINATSIYALANGAN HOLATLAR ZICHLIGIGA MAGNIT MAYDON VA HARORATNING TA'SIRI

Annotatsiya

Bu ishda to'g'ri burchakli kvant o'ralar asosidagi geterostrukturalarda kombinatsiyalangan (birlashgan) holatlar zichligi ossillyatsiyasining kuchli magnit maydoniga bog'liqligi o'rganilgan. 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 so'zlar: geterostruktura, nanoo'lcham, kvant o'ra, holatlar zichligi, holatlar zichligi, ossillyatsiya, nanoo'lcham, magnit maydon, ikki o'lchamli, yarimo'tkazgichlar.

Kirish. Bu ishda to'g'ri burchakli kvant o'ralar asosidagi geterostrukturalarda kombinatsiyalangan (birlashgan) holatlar zichligi ossillyatsiyasining kuchli magnit maydoniga bog'liqligi o'rganilgan. 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.

Adabiyotlar taxlili. Ma'lumki, tashqi omillar (harorat, magnit maydoni va bosim)ning kvant o'lchamli geterostrukturalarga ta'siri zaryad tashuvchilarning energetik satx holatlari o'zgarishiga va, natijada, magnitooptik yutilish chegarasining siljishiga olib keladi [1]. Nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning magnitooptik yutilish spektri ruhsat etilgan sohaning turli minimumlari orasidagi energetik masofa bilan aniqlanadi. Bundan kelib chiqadiki, kvant o'rasining ta'qiqlangan sohasi kengligi tashqi omillar ta'sirida yoki torayadi, yoki kengayadi. Shunday qilib, magnitooptik yutilish

spektrini uning chegarasi yaqinida o'rganish zaryad tashuvchilarning o'tkazish sohasi quyi chegarasi yaqinidagi va kvant o'rasining valent sohasi yuqori chegarasi yaqinidagi energetik spektri strukturasi to'g'risida ma'lumot beradi. Bu esa nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning magnit, optik va elektrik xususiyatlarini aniqlashda juda muhimdir [2].

Kvant o'rasining kombinatsiyalangan holat zichliklari sohalararo magnitooptik yutilish ossillyatsiyasida muhim rol o'ynaydi. Shuning uchun, ko'p hollarda, Brilliyen sohasi doirasida (p_{cv}) matritsa elementi kam o'zgaradi. Binobarin, spektrning strukturasi asosan kvant o'lchovli geterostrukturalardagi holatlarning kombinatsiyalangan zichligini aniqlaydi [3].

Tadqiqot metodologiyasi. Ushbu tadqiqotning maqsadi kuchli magnit maydonining kvant o'ramli geterostrukturalarda kombinatsiyalangan holatlar zichligiga ta'sirini aniqlashdan iborat. Magnit maydoni ta'sirida o'tkazish sohasi energetik holatlari va kvant o'rasidagi valent sohasi zichligining zaryad tashuvchilarning energetik spektriga bog'liqligi pogona funksiyalarni tashkil qiladi (1-rasm) [4-5]:

$$g_c(E) = \frac{m_n^e}{\hbar^2 \pi} \sum_n \theta(E - E_n)$$

$$g_v(E) = \frac{m_n^h}{\hbar^2 \pi} \sum_m \theta(E - E_m) \quad (1)$$

Bu yerda, m_n^e i m_n^h – n va m o'lchamli kvant o'rasida o'lchamli kvantlash soha ostidagi elektronlar va teshiklarning effektiv massalari, $\theta(E)$ – Xevisaydning pog'onali funksiyasi.

To'g'ridan-to'g'ri sohalararo o'tishlarda holatlarning kombinatsiyalangan zichligi egergiya bo'yicha konversiyadan ibora bo'lib, u ham energiya bo'yicha pog'onali funksiya ko'rinishiga ega [6]:

$$N_{jds}^{2d}(E) = \frac{m_{mn}^*}{\hbar^2 \pi} \sum_{m,n} \theta(E - E_{mn}) \quad (2)$$

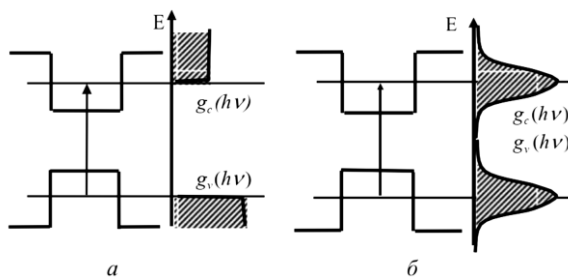
Bu yerda, m_{mn}^* – ushbu: $(m_{mn}^*)^{-1} = (m_n^e)^{-1} + (m_m^h)^{-1}$ munosabat bilan aniqlanuvchi, n va m o'lchamli soha osti kvantlash uchun zaryad tashuvchilarning keltirilgan effektiv massasi.

Agar GeSi strukturalarda elektron va teshik holatlari barcha uchta kvaziimpuls komponentlar bo'yicha o'lchamli-kvantlangan bo'lsa, ya'ni, zaryad tashuvchilar uchun kvant nuqtalari bo'lsa, u holda bunday strukturaning ruxsat etilgan sohasida holatlarning kombinatsiyalangan zichligi Gauss funksiyasi ko'rinishda bo'ladi (1-rasm). U holda, ruxsat etilgan sohada kamaymaydigan diskret funksiyadan iborat bo'lgan nol-o'lchovli kombinatsiyalanga holat zichligi mavjud bo'ladi [7].

Ushbu holda, kombinatsiyalangan holat zichligi $\delta(E)$ – Dirak delta-funksiyasi deb ataluvchi funksiya yordamida ifodalanadi:

$$N_{jds}^{0d}(E) = \sum_{l,m,n} \delta(E - E_{lmn}) \quad (3)$$

Kombinatsiyalangan holatlar zichligi cheksiz qisqa va baland cho'qqilarning majmuasidan iborat bo'ladi (1-rasm). Yuqorida olingan barcha natijalar kvantlovchi magnit maydoni, harorat va bosim ta'siri bo'lmagan holatlar uchun o'rinli. Quyidagi aniq savollar paydo bo'ladi:



1-rasm. GeSi/Si kvant-o'ra tuzilmalarida elektron holatlar zichligining energiya taqsimoti [8]: a – kvant o'ra, b – kvant nuqta.

Kuchli magnit maydoni mavjud bo'lganda, geterostrukturalarning kvanto'lchamli to'g'ridan-to'g'ri o'tishlaridagi kombinatsiyalangan holatlar zichligi qanday aniqlanadi? Harorat ko'tarilish dinamikasi ushbu jarayonga qanday ta'sir ko'rsatadi?

Keling, to'g'ridan-to'g'ri ruxsat etilgan o'tishli ikki o'lchovli yarimo'tkazgichlarda kombinatsiyalangan holatlar zichligining kvantlovchi magnit maydoniga bog'liqligini hisoblaymiz. Kvantlovchi magnit maydonida, kombinatsiyalangan holatlar zichligi magnitooptik o'tishda energiyani saqlanish qonuniga bo'ysinuvchi, kvant o'rasining o'tkazuvchan sohasida E_c energiyali, valent sohasida E_v energiyali barcha holatlar bo'yicha integral orqali aniqlanadi. Kuchli magnit maydon ta'sirida, kvant yamali to'g'risohali geterostrukturaning ta'qiqlangan sohasi chegarasi yaqinida soha strukturasi eng sodd modelini tahlil qilamiz. Ya'ni, kvant o'rasining valent sohasi zaryad tashuvchilar bilan to'la, o'tkazuvchan soha esa – bo'sh. Bu yerda, tegishli holatlarning to'ldirish funksiyalari $f_v=1$, $f_c=0$ ga teng. Bundan tashqari, ushbu modelda shovqinlanish darajasining parabolik dispersiya qonunli kvant o'rasining kombinatsiyalangan holat zichligiga bog'liqligini hisobga olmaslik mumkin. Magnit maydoni induksiyasi ko'ndalang (OZ o'qiga parallel) va XOY tekisligiga parallel yo'nalgan bo'ladi. Bu ko'ndalang kvant magnit maydoni deb ataladi.

Tahlil va natijalar. Bundan kelib chiqadiki, kuchli magnit maydoni mavjud bo'lganda, kvant o'ra holatlarning kombinatsiyalangan zichligini hisoblash uchun dispersiya energiyasi qonunlaridan foydalaniladi. Ularni quyidagicha yozish mumkin:

$$E_c^{2d}(B, d, n_{cZ}) = \left(N_L^c + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^c + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_c d^2} n_{cZ}^2 + m_c^c g_c \mu_B H$$

$$E_v^{2d}(B, d, n_{vZ}) = -\left(N_L^v + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^v - \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_v d^2} n_{vZ}^2 - m_v^v g_v \mu_B H - E_g^{2d}(0)$$
(4)

Bu yerda, N_L^c, N_L^v – kvant o'rasining ruxsat etilgan sohasidagi zaryad tashuvchilarning Landau satxlari soni; ω_c^c, ω_c^v – kvant o'rasining o'tkazuvchan va valent sohalarida magnit maydonining siklotron chastotasi; d – kvant o'rasi qalinligi; n_{cZ}, n_{vZ} – kvant o'rasining o'tkazuvchan va valent sohalarida o'lchamli kvantlash qism-sohasining tartib raqami; n_{eZ}, n_{vZ} – mos ravishda Z o'qi bo'yicha elektronlar va teshiklarning kvantlash satxlari tartib raqamlari; elektron va valent sohalar simmetrik deb faraz qilamiz, u holda, $n_{eZ} = n_{vZ} = n_Z$ shart bajariladi; $m_s^c g_c \mu_B H, m_s^v g_v \mu_B H$ – ruxsat etilgan sohadagi spin energiyasi; $E_g^{2d}(0)$ – absolyut nol haroratda kvant o'rasi ta'qiqlangan sohasining kengligi; V – magnit maydoni induksiyasi.

$E_c^{2d}(B, d, n_Z)$ va $E_v^{2d}(B, d, n_Z)$ lar uchun, spinni hisobga olmaganda, magnitooptik o'tishlar energiyani saqlanish qonuniga mos keladi:

$$E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z) = E_c^{2d}(B, d, n_Z) - E_v^{2d}(B, d, n_Z)$$

$$E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z) = E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_{cv}^* d^2} n_Z^2$$

$$h\nu \geq E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z)$$
(5)

Bu yerda, $h\nu$ – yutilayotgan fotonning yutiluvchi energiyasi, ν – yorug'lik energiyasi, $\frac{1}{m_{cv}^*} = \frac{1}{m_c^c} + \frac{1}{m_v^v}$ – kombinatsiyalangan (keltirilgan) effektiv massa [9].

OZ o'qi yo'nalishi buyicha, kuchli magnit maydoni zaryad tashuvchilar uchun energiya va to'liq vektor orasidagi nisbatni o'zgartirmaydi. Biroq, zaryad tashuvchilarning magnit induksiyasiga perpendikulyar yo'nalishdagi (XY tekislikda) harakati uchun energetik sathlarning avvalgi kvaziuzluksiz qatori Landauning diskret satxlari sistemasi bilan almashadi. Elektronlar va teshiklarning effektiv massalari teng deb olinayotganligi sababli, Landau satxlari orasidagi masofa kvant soniga bog'liq bo'lmaydi va u $\hbar \omega_s$ ga teng bo'ladi. Demak, kvant o'rasining o'tkazuvchan va valent sohalarida erkin elektronlar va teshiklarning har uchchala yo'nalish bo'yicha harakati cheklangan. Kvantlovchi magnit maydoni ta'sirida kvant o'rasi kvant nuqtasi analogiga aylanadi. (3) formulaga muvofiq, $\delta(E - E_{lmn})$ argumentda E ni $\hbar\nu$ ga va E_{lmn} ni $E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z)$ ga almashtirib, quyidagiga ega bo'lamiz [9-11]:

$$N_{ds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_Z)) = \frac{eB}{\pi \hbar} \sum_{N_L^c, N_L^v, n_Z} \delta(h\nu - E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_Z))$$
(6)

Xulosalar. Shunday qilib, kvantlovchi magnit maydon ta'sirida kvant o'rasining kombinatsiyalangan holat zichligini aniqlash uchun (6) formuladan foydalanish mumkin. Biroq, bunday formulalarda to'g'risohali kvant o'ralari uchun harorat va bosimning elektronlar va teshiklarning diskret Landau sathlariga ta'siri hisobga olinmaydi. Magnitooptik yutilish spektri ko'plab xajmli va kichik o'lchamli optoelektron asboblari uchun asosiy talab hisoblanadi. Kvant o'rali va $\alpha_B^{2d}(h\nu, B, d)$ to'g'risohali geterostrukturalarda magnitooptik yutilish jarayonini kombinatsiyalangan holatlar zichligi funksiyasi sifatida ifodalash mumkin. Kvantlovchi magnit maydoni ta'siri ostida, kombinatsiyalangan holatlar zichligi $\hbar\nu$ foton energiyasi bilan ajralgan, to'lgan valentli soha elektron holatlari bilan o'tkazuvchan sohaning bo'sh elektron holatlari orasidagi ruxsat etilgan magnitooptik o'tishlar sonining me'yorini ta'minlaydi. Taniqli ilmiy adabiyotlarda magnit maydoni mavjud bo'lgan va bo'lmagan holatlarda ruxsat etilgan soha energetik holat zichligini kombinatsiyalangan holat zichligi bilan bog'lash bo'yicha bir necha urinishlar to'g'risida ma'lumotlar berilgan. Biroq, kombinatsiyalangan holat zichligining olingan barcha empirik va soddalashtirilgan ifodalari past haroratlarda bosimning yo'qligi bilan chegaralangan.

ADABIYOTLAR

1. L.R.Ram Mohan, Peter A.Wolff. Joint density of states in interband transitions in a magnetic field // Physical Review B. 1982. Vol.26, No.12. pp. 6711-6718.
2. Anand Kulkarni, Durdu Guney, Ankit Vora. Optical absorption in nano-structures: classical and quantum models // ISRN Nanomaterials. 2013. Vol.2013, Article ID 504341, pp. 1-7. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/504341>
3. Gulyamov, G., Erkaboev, U.I., Rakhimov, R.G., Sayidov N.A. The influence of temperature on magnetic quantum effects in semiconductor structures // Journal of Applied Science and Engineering, 2020, 23(3), pp. 453–460, <https://www.scopus.com/sourceid/21100822732>
4. Erkaboev, U.I., Rakhimov, R.G., Sayidov N.A. Mathematical modeling determination coefficient of magneto-optical absorption in semiconductors in presence of external pressure and temperature // Modern Physics Letters B, 2021, 35(17), 2150293, <https://www.scopus.com/sourceid/29055>
5. 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>
6. Erkaboev U.I., Sayidov N.A., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I. 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 fields // Indian Journal of Physics, 2022, <https://www.scopus.com/sourceid/145208>
7. 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>
8. Baymatov P.J., Gulyamov A.G., Abdulazizov B.T., Mavlyanov Kh.Yu., Tokhirjonov M.// Features of the Chemical Potential of a Quasi-Two-Dimensional Electron Gas at Low Temperatures Features of the Chemical Potential of a

- Quasi-Two-Dimensional Electron Gas at Low Temperatures // International Journal of Modern Physics B 2150070 (1-13), 2021, <https://doi.org/10.1142/S0217979221500703>
10. Gulyamov G., Abdulazizov B.T., Baymatov P.J. // Three-band simulation of the g-factor of an electron in an InAs quantum well in strong magnetic fields // Journal of Nanomaterials, Volume 2021, Article ID 5542559, <https://doi.org/10.1155/2021/5542559>
 11. 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, 6(1), 32-37, DOI:10.32523/ejpfm.2022060103
 12. Abdulazizov B. T., Gulyamov G., Baymatov P. J., Inoyatov Sh. T., Tokhirjonov M. S. and Juraev Kh. N. //Peculiarities of the Temperature Dependence of the Chemical Potential of a Two-dimensional Electron Gas in Magnetic Field// SPIN Vol. 13, No. 1 (2022) 2250002, World Scientific Publishing Company, DOI:10.1142/S2010324722500023