

Erkaboev Ulugbek Inayatillaevich
Namangan Institute of Engineering and Technology, DSc professor
Sayidov Nozimjon Abdunosirovich
Namangan Institute of Engineering and Technology, senior teacher
Asrorova Hulkarxon Abrorovna
Namangan Institute of Engineering and Technology, stage 1 student
Phone: 99-870-58-68, e-mail: sayidovnozimjon@gmail.com

UO‘K 621.315.592; 537.311.322

MODELING OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OSCILLATIONS OF HETEROSTRUCTURED SEMICONDUCTORS WITH QUANTUM WELLS DEPENDING ON STRONG ELECTROMAGNETIC FIELD AND TEMPERATURE

Abstract: In this work, as a result of applying the effects of a quantizing magnetic field and a strong electromagnetic field, it is possible to determine the main parameters of volumetric or nanoscale structures: magnetic field absorption, magnetoresistance, concentration, effective mass, mobility, g - factor, relaxation time, etc.

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

Эркабоев Улугбек Инаятиллаевич
Наманганский инженерно-технологический институт, д.н.ф.-м. профессор
Сайидов Нозимжон Абдулнасирович
Наманганский инженерно-технологический институт, старший преподаватель
Асророва Хулкархон Аброровна
Наманганский инженерно-технологический институт, студент 1-го курса
Телефон: 99-870-58-68, e-mail: sayidovnozimjon@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Аннотация: В этой работе в результате применения эффектов квантующего магнитного поля и сильного электромагнитного поля можно определить основные параметры объемных или наноразмерных структур: поглощение магнитного поля, магнитосопротивление, концентрацию, эффективную массу, подвижность, g - фактор, релаксацию время и т. д.

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

Erkaboev Ulug‘bek Inayatillaevich
Namangan muhandislik-texnologiya instituti, f.-m.f.d. professor
Sayidov Nozimjon Abdunosirovich
Namangan muhandislik-texnologiya instituti, katta o‘qituvchi
Asrorova Hulkarxon Abrorovna
Namangan muhandislik-texnologiya instituti, 1-bosqich talabasi
Tel: 99-870-58-68, e-mail: sayidovnozimjon@gmail.com

KVANT O‘RALI GETEROSTRUKTURALI YARIMO‘TKAZGICHLARNING ELEKTR O‘TKAZUVCHANLIGI OSSILYATSIYALARINI KUCHLI ELEKTROMAGNIT MAYDON VA HARORATGA BOG‘LIQLIGINI MODELASHTIRISH

Annotatsiya: Ushbu ishda kvantlovchi magnit maydon va kuchli elektromagnit maydon ta’sirlarini tadbiq etish natijasida hajmiy yoki nanoo‘lchamli strukturalarning asosiy parametrlari: magnit maydon singdiruvchanligi, magnitoqarshilik, konsentratsiya, effektiv massa, harakatchanlik, g – faktor, relaksatsiya vaqti va boshqalarni aniqlash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: geterostruktura, nanoo‘lcham, kvant o‘ra, holatlar zichligi, holatlar zichligi, ossillyatsiya, nanoo‘lcham, magnit maydon, ikki o‘lchamli, yarimo‘tkazgichlar.

Kirish

So‘nggi yillarda, kvant o‘rali yarimo‘tkazgichli strukturalarni o‘rganishga qiziqish uni kichik o‘lchamli diapazonda ishlaydigan nanotexnologik asboblarning sifatida, shuningdek, turli xil spintronik qurilmalarda qo‘llash imkoniyati bilan belgilanmoqda. Olimlar tomonidan ushbu kvant o‘lchamli strukturalarning katta e’tibor bilan o‘rganishiga asosiy sabab, bunday materiallarning fizik xususiyatlari bir qator qiziqarli ilmiy jarayonlarga ega bo‘lib, bu jarayonlarning turli xil tashqi omillar ta’sirida tubdan o‘zgarishlarini to‘liqroq tushunishga imkon beradi. Jumladan, bunday tashqi omillardan biri kvantlovchi magnit maydon va kuchli elektromagnit to‘lqin bo‘lib, u hajmiy yoki kichik o‘lchamli materiallarning kristall panjarasi bo‘ylab erkin harakatlanayotgan zaryadli zarralarning traektoriyalarini o‘zgartirib yuboradi. Bu esa, kvant Xoll effekti, Shubnikov – de Gaaz va de Gaaz – van Alfen effektlari kabi kvant – fizik hodisalarning paydo bo‘lishiga olib keladi.

Adabiyotlar taxlili

Kvantlovchi magnit maydon va kuchli elektromagnit maydon ta’sirlarini tadbiq etish natijasida hajmiy yoki nanoo‘lchamli strukturalarning asosiy parametrlari: magnit maydon singdiruvchanligi, magnitoqarshilik, konsentratsiya, effektiv massa, harakatchanlik, g – faktor, relaksatsiya vaqti va boshqalarni aniqlash imkonini beradi [1-10]. Masalan, [4-7] ishlarda hajmiy yarimo‘tkazgichli materiallarga kichik konsentratsiyali aralashmalar kiritish natijasida magnitoqarshilik ossillyatsiyalarining

kuchli elektromagnit to'liq ta'sirida o'zgarishlarini eksperimental natijalari keltirilgan. Bunda, past haroratlarda aralashma turi va konsentratsiyasini o'zgartirish natijasida magnitoqarshilik ossillyatsiya grafiklarini yaqqol siljishi kuzatilgan. Lekin, ushbu eksperimental tadqiqotlarning yuqori haroratlardagi ossillyatsiya jarayonlari nazariy jihatdan mukammal o'rganilmagan. Bundan tashqari, [3, 8] ishlarda kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichlarning magnitoqarshilik ossillyatsiyalariga kuchli elektromagnit maydon, magnit maydon va haroratlarning ta'sirlari tadbiiq etilgan. Chunonchi, ushbu ishlarda, ilk bora InAs/GaSb kvant o'ra asosida geterostruktura uchun o'ta yuqori chastotali elektromagnit maydon quvvati (P) dan magnit maydon kuchlanganligi (H) bo'yicha birinchi (dP/dH) va ikkinchi tartibli (d²P/dH²) differensial signallarning ossillyatsiyalari turli haroratlarda tajribada aniqlangan. Bunda, harorat ortishi bilan ossillyatsiya amplitudalarini keskin ravishda kamayishi kuzatilgan, lekin ushbu tajribalarda aynan shu fizik jarayonni sababi keltirib o'tilmagan. Ishning asosiy maqsadi kuchli elektromagnit maydondagi kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanlik ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligini aniqlashdan iborat.

Tadqiqot metodologiyasi

Kuchli elektromagnit madondagi bir jinsli tizimdagi tok zichligi quyidagi ifodaga ega [11];

$$j = \sigma(T_e) E_E \text{ yoki } j = j(E_E) \quad (1)$$

Bu yerda, T_e - kuchli elektromagnit maydondagi erkin elektron temperaturasi; E_E - kuchli elektromagnit maydonning elektr maydon kuchlanganligi.

Ushbu $j(E_E)$ xarakteristikalarini uchun differensial elektr o'tkazuvchanlikka σ_d bog'liqligi haqida fikr yuritish qulaylik paydo qiladi, yani;

$$\sigma_d(E_E) = \frac{dj}{dE_E} = \sigma + E \frac{d\sigma}{dE_E} \quad (2)$$

Ushbu (2) ifodani o'zgaruvchan maydonda xisoblash uchun Furrye komponentlari qo'llash orqali $j(\omega)$ va $E_E(\omega)$ lar tadqiq etiladi. ω -o'zgaruvchan elektromagnit maydon chastotasi. Shuning uchun, biz xozirda na'munaga ta'sir qilayotgan kuchli elektromagnit maydoni vaqt bo'yicha o'zgarmas ta'sir qilayapti deb faraz qilamiz.

U holda, muvozanat (balans) tenglamasi [12]:

$$e(v_d, E_E) = \frac{\frac{2}{3} \langle E \rangle - kT}{\tau_e} \quad (3)$$

(3) dan foydalanib, (2) ni quyidagi ko'rinishga keltirish mumkin:

$$\sigma E_E^2 = nk \frac{T_e - T}{\tau_e} \quad (4)$$

(4) ifodada o'ng tomonda keltirilgan had kuchli elektromagnit maydonning quvvatini (P) ifodalaydi. U holda, (4) dan:

$$P = \sigma E_E^2 \quad (5)$$

ifoda kelib chiqadi.

Demak, (5) dan ko'rinib turibdiki, kuchli elektromagnit maydon quvvati materialning elektr o'tkazuvchanligi va elektromagnit to'lqinning elektr kuchlanganligini kvadratiga bog'liq ekan.

Endi, (5) ifodadan foydalanib, kuchli elektromagnit maydondagi kvant o'rali geterostrukturalarni yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalarini ko'rib chiqamiz. Kuchli magnit maydondagi kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi $\tau(E, B)$ quyidagicha aniqlanadi [4, 13]:

$$\sigma(E, B) = e^2 n_s \langle \tau(E, B) \rangle \quad (6)$$

bunda, n_s -ikki o'lchamli materiallar uchun erkin elektronlar konsentratsiyasi;

$\langle \tau(E, B) \rangle$ -kuchli magnit maydondagi zaryad tashuvchilarning o'rtacha relaksatsiya vaqti. Ikki o'lchovli materiallarda erkin zaryad tashuvchilarning o'rtacha relaksatsiya vaqti quyidagi ko'rinishga ega:

$$\langle \tau(E, B) \rangle \geq \frac{\int N_s^{2d}(E, B) \left(\frac{\partial f}{\partial E} \right) \tau(E) E dE}{n_s} \quad (7)$$

bunda, $N_S^{2d}(E, B)$ - 2d o'lchamli yarimo'tkazgichning energetik holatlar zichligi.

[1, 13] ishda 2d o'lchamli materiallar uchun energetik holatlar zichligini magnit maydon va haroratga bog'liqligini analitik ifodasi keltirib chiqarilgan. Bunda, mualliflar Gauss taqsimot funksiyasidan foydalangan. Yani,

$$N_S^{2d}(E, B, N_L, d, n_z) = \sum_{N_L, N_z} \frac{eB}{\pi \hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \exp \left(\frac{- \left(E - \left(\hbar \omega_c \left(N_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} N_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right) \quad (8)$$

Bu yerda, N_L – diskret Landau sathlari soni; d – kvant o'ra kengligi; n_z – o'lchamli kvantlar soni; ω_c – siklotron chastotasi.

Kichik o'lchamli yarimo'tkazgichlar uchun sochilish mexanizmlarini elastik sochilish yaqinlashuvida $\tau(E, T)$ relaksatsiya vaqti hamda (6), (7) va (8) ifodalardan foydalanib, kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlar uchun kvantlovchi magnit maydondagi elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalarini haroratga bog'liqligi quyidagi ko'rinishga keladi:

$$\sigma_{\perp}^{2d}(E, B, T, d) = \frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{G} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \omega_c \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2 \right]}{G} \right)^2 \right] \gamma_{\perp} \quad (9) \quad (9)$$

dan ko'rinib turibdiki, kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlarning ossilyatsiyalash jarayoni asosan 2d o'lchamli energetik holatlar zichligi hisobiga paydo bo'lmoqda. Ammo, (9) da kuchli elektromagnit maydon ta'siri hisobga olinmagan. (5) da esa, elektromagnit to'lqin quvvatining materialni elektr o'tkazuvchanligiga bog'liqligi keltirilgan. U holda, (5) va (9) ifodalardan foydalanib, kuchli elektromagnit maydon quvvati P ni kvantlovchi magnit maydon B , kvant o'ra kengligi d , harorat T , elektr maydon kuchlanganligi E_E larga bog'liqligi $(P \propto 2d(B, T, E_E, d))$ kelib chiqadi. Ya'ni:

$$P^{2d}(B, T, E_E, d) = \sigma^{2d}(E, B, T, d) \cdot E_E^2 \quad (10)$$

yoki,

$$P^{2d}(H, N_L, n_z, d, E_E, T) = \frac{e^3 B}{2 \pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{G} \int_0^\infty \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \cdot \frac{eH}{m^* c} \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 m^* d^2} n_z^2 \right]}{G} \right)^2 \right] \gamma_\perp \quad (11)$$

Ushbu keltirib chiqarilgan formula, bir qator tajriba natijalarini tushuntirishga va ulardan fizik jarayonlar mohiyatini izohlashga xizmat qiladi.

Tahlil va natijalar

[3-4] ishlarda tajriba tadqiqotlari, ya'ni kvant o'lchamli materiallarning elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalarini kuchli elektromagnit maydon ta'sirini aniqlashda elektroparamagnit rezonans (EPR) o'rnatish bo'yicha o'tkazilgan. Sababi, EPR usuli kvant o'rali geterostrukturali materiallarning magneto qarshilik yoki elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalarini tashqi maydonlarga bog'liqligini aniqlash imkonini beradi. Bunda, kuchli elektromagnit maydon quvvatining maksimal kamayishi (dP) EPR ta'sirini to'g'ridan-to'g'ri o'lchashda elektromagnit to'lqinining energiyasi tufayli energetik sathlar o'rtasida (bir sathdan ikkinchi sathga) o'tishlar hisobiga sodir bo'ladi. Ya'ni, dP ning yo'qolishlari elektromagnit to'lqinining energiyasi kvanlovchi magnit maydondagi (H) erkin zaryad tashuvchilarini tezlashtirishlariga xizmat qiladi. Bu energetik sathlar Landau sathlari bo'lib, ushbu sathlar soni magnit maydon kuchlanganligi (dH) ga bog'liq. Bundan kelib chiqadiki, kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalarida ko'proq mikroto'lqinli maydon yutulishini kuzatish uchun o'ta yuqori chastotali elektromagnit maydon quvvatini oshirib boorish darkor. Aniqroq qilib aytadigan bo'lsak, dH qanchalik ortsa Landau sathlari soni ortib boradi.

Har bir Landau diskret sathlarida EPR hodisasini kuzatish uchun dP ni orttirib borish kerak. Umuman olganda $\frac{dP^{2d}(H, T, d, E_E, N_L, n_z)}{dH}$ nisbat kvant o'lchovli yarimo'tkazgichlarda EPR tajribalarini o'tkazishida muhim ahamiyatga ega. Bu

tajribalar nazariyasini, uning yangi modulini ishlab chiqishda (11) formuladan foydalanish mumkin.

Kvant o'rali geterostrukturalarda o'ta yuqori chastotali elektromagnit maydonning elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalari sezgirligini kuzatish maqsadida (11) formuladan magnit maydon kuchlanganligi bo'yicha birinchi tartibli hosila olinadi. Natijada (11) formula:

$$\frac{dP^{2d}(H, T, d, E_E, N_L, n_z)}{dH} = d\dot{\omega} \quad (12)$$

Ushbu (12) formula yordamida o'ta yuqori chastotali maydondagi kvant o'rali geterostrukturalarning elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalarini hisoblash mumkin. Agar, yanada kvant o'raning har bir diskret Landau sathlaridagi mikroto'lqinli maydon yutulishni yuqoriroq aniqlikda kuzatishga sabab tug'ilsa, (12) dan magnit maydon kuchlanganligi bo'yicha hosila olinadi [11]. Ya'ni:

$$\frac{d^2 P^{2d}(H, T, d, E_E, N_L, n_z)}{dH^2} = d^2\ddot{\omega} \quad (13)$$

(12) va (13) formulalar asosida yangi matematik model ishlab chiqildi. Bu yangi matematik model, albatta bir qator tajriba natijalarini tushuntirishga xizmat qiladi.

Xulosa

Kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlar uchun elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalari kuchli elektromagnit maydonga bog'liqligi tadbiq etiladi. Kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichlarda mikroto'lqinli maydon quvvatidan (dP) magnit maydon kuchlanganligi (dH) bo'yicha olingan birinchi va ikkinchi tartibli differensial ifodalarini $(\frac{dP}{dH}, \frac{d^2 P}{dH^2})$ analitik ko'rinishi keltirib chiqarildi. Hajmiy va kichik o'lchamli yarimo'tkazgichli materiallar uchun kvant ossilyatsiya effektlarini mikro to'lqinli maydon quvvati, kvantlovchi magnit maydon kuchlanganligi va haroratlargabog'liqligini aniqlovchi matematik model ishlab chiqildi. Kvant o'lchamli

va hajmiy yarimo'tkazgichli strukturalarda olingan eksperiment natijalarini taklif qilinayotgan model asosida yuqori haroratlar dinamikasi uchun tushuntirishga imkon topildi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. А.И. Вейнгер, И.В. Кочман, В.И. Окулов, Т.Е. Говоркова. Особенности магнитных осцилляций в монокристалле HgSe с примесями кобальта низкой концентрации (<1 ат%) // Физика и техника полупроводников, 2022, том 56, вып. 1. Стр.69-75. DOI: 10.21883/FTP.2022.01.51819718
2. И.В. Кочман, М.П. Михайлова, А.И. Вейнгер, Р.В. Парфеньев. Магнитофонные осцилляции магнитосопротивления в квантовой яме InAs/GaSb с инвертированным зонным спектром // Физика и техника полупроводников, 2021, том 55, вып. 4. Стр.313-318. DOI: 10.21883/FTP.2021.050731.9569
3. А.Н. Шарибаев, Р.Н. Шарибаев, Б.Т. Абдулазизов, М.Р. Тохиржонова Текущее состояние обучения с подкреплением и направления на будущее, "Мировая наука" №6(75), 141-143, 2023
4. P.J. Baymatov, A.G. Gulyamov, B.T. Abdulazizov, Kh.Yu. Mavlyanov, M.S. Tokhirjonov// 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>
5. G. Gulyamov, P.J. Baymatov. Effects of band nonparabolicity and band offset on the electron gas properties in InAs/AlSb quantum well. Journal of Modern Physics 7 (13), 1644-1650, DOI: 10.4236/jmp.2016.713149
6. А.И. Вейнгер, И.В. Кочман, В.И. Окулов, Т.А. Говоркова, М.Д. Андрийчук, Л.Д. Паранчич. Особенности электронного парамагнитного

резонанса примеси железа в кристаллах HgSe // Физика и техника полупроводников, 2019, том 53, вып. 3. Стр.317-322. DOI: 10.21883/FTP.2019.03.47281.8980

7. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I., Negmatov U.M., Sayidov N.A. Influence of the two-dimensional density of states on the temperature dependence of the electrical conductivity oscillations in heterostructures with quantum wells // *International Journal of Modern Physics B*. 2023. <https://doi.org/10.1142/S0217979224501856>
8. 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.
9. 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.
10. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Negmatov U.M., Sayidov N.A., Mirzaev J.I. Influence of a strong magnetic field on the temperature dependence of the two-dimensional combined density of states in InGaN/GaN quantum well heterostructures // *Romanian Journal of Physics*. 2023. Vol.68, Iss.5-6, pp.614-1-614-14.