

MODELING THE EFFECT OF TEMPERATURE AND MAGNETIC FIELD ON THE INTERZONE MAGNETO-OPTIC ABSORPTION COEFFICIENT IN QUANTUM-SIZED SEMICONDUCTORS

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, temperature dependence of magneto-optical absorption coefficients in straight-band nanostructured semiconductors is applied. Two-dimensional combined density of states $\alpha_B^{2d}(N_S^{2d}(B), T)$ oscillations were used to calculate the temperature dependence of magneto-optical absorption coefficient oscillations. A mathematical model for determining $\alpha_B^{2d}(N_S^{2d}(B), T)$ was developed for quantum-sized straight-band semiconductor materials.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МЕЖЗОННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КВАНТОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

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 применена температурная зависимость коэффициентов магнитооптического поглощения в прямозонных наноструктурированных полупроводниках. Двумерные комбинированные осцилляции плотности состояний $\alpha_B^{2d}(N_S^{2d}(B), T)$ были использованы для расчета температурной зависимости осцилляций коэффициента магнитооптического поглощения. Разработана математическая модель определения $\alpha_B^{2d}(N_S^{2d}(B), T)$ для квантоворазмерных прямозонных полупроводниковых материалов.

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

KVANT O'LCHAMLI YARIMO'TKAZGICHLARDA ZONALARARO MAGNITOOPTIK YUTILISH KOEFFITSIENTIGA HARORAT VA MAGNIT MAYDONNING TA'SIRINI MODELLASHTIRISH

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 to'g'ri zonali nanostrukturali yarimo'tkazgichlarda magnitooptik yutilish ko'efficientlarini haroratga bog'liqligi tadbiq etilgan. Magnitooptik yutilish ko'efficienti ossilyatsiyalarini haroratga bog'liqligini hisoblashda ikki o'lchamli kombinirlangan holatlar zichligi $\alpha_B^{2d}(N_S^{2d}(B), T)$ ossilyatsiyalaridan foydalanilgan. Kvant o'lchamli to'g'ri zonali yarimo'tkazgichli materiallar uchun $\alpha_B^{2d}(N_S^{2d}(B), T)$ ni aniqlashning matematik modeli ishlab chiqildi.

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

Kirish

Yorug'lik nurlarini boshqarish uchun samarali magnitooptik sistemalarni olish va ular asosidagi qurilmalarni yaratish – fotonika, plazmonika, sensorika, spintronika hamda mikro, nano va opto elektronikaning muhim muammolaridan biri hisoblanadi. Nanostrukturali yarimo'tkazgichlarni zonalar tuzilishini o'rganish va uni tajribalarda mukammal tekshira olish metodlaridan eng samaralisi magnitooptik effektlar hisoblanadi. Jumladan, har bir materialning ta'qiqlangan zona kengligini aniqlashning eng ishonchli usuli optik taxlillar yordamida aniqlashdir. Magnitooptik yutilishlardan biri bu zonalararo yutilish mexanizmidir. Zonalararo yutilish qonuniyatini magnitooptik yutilish ko'effitsienti orqali o'rganiladi.

Adabiyotlar taxlili

Kichik o'lchamli yarimo'tkazgichlar va ular asosidagi geterostrukturalarning optik xossalari va xususiyatlarini ifodalaydigan, yorug'lik chastotasiga bog'liq bo'lgan asosiy fizik parametrlari – bu kompleks sindirish ko'rsatkichi va yorug'likning yutilish ko'effitsientlari hisoblanadi [1-3]. Agar yorug'likning tarqalishi izotrop holatda OX o'qi bo'ylab yo'nalgan bo'lsa, u holda dispersiya qonuni uchun kompleks sindirish ko'rsatkichini yorug'lik vektoriga bog'liqligi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi [4]:

$$F(x, t) = F_0 \exp \left[i\omega \left(\frac{N(\omega) \cdot x}{c} - t \right) \right] \quad (1)$$

Bu yerda, F – yorug‘lik vektori (yorug‘likning elektr maydon kuchlanganligi bo‘yicha vektori); $N(\omega)=n(\omega)+iK(\omega)$ - kompleks sindirish ko‘rsatkich; $n(\omega)$ – moddaning sindirish ko‘rsatkichi; $k(\omega)$ – yorug‘likning yutilish ko‘rsatkichi.

Erkin zaryad tashuvchilarning valent zona shipidan o‘tkazuvchanlik zona tubiga optik o‘tishlari natijasida yorug‘likning yutilishi zonalararo yutilish deb ataladi. Hajmiy va nano o‘lchamli materiallarda bu turdagi yutilish mexanizmi optoelektronik va spintronik asboblarda foydalanish nuqtai nazardan eng kuchli va muhim hisoblanadi.

Tadqiqot metodologiyasi

Kuchli magnit maydon ta’siridagi kvant o‘rali yarimo‘tkazgichlarda to‘g‘ri zonalararo yutilish koeffitsientini haroratga bog‘liqligini ko‘rib chiqaylik. Bunda, masalani soddaroq yechish uchun, magnit maydon va harorat ta’sirini faqatgina ikki o‘lchamli kombinirlangan holatlar zichligi orqali aniqlash maqsadga muvofiq bo‘ladi. Yarimo‘tkazgichlarning zonalar nazariyasiga ko‘ra, magnit maydon ta’siridagi erkin elektronlarning energetik spektri va to‘lqin funksiyalarini Shredinger tenglamasini effektiv massa yaqinlashuvida yechimi orqali topiladi, ya’ni:

$$\left\{ \frac{-\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(r) \right\} \psi(r) = E \psi(r) \quad (2)$$

Bu yerda $V(r)$ – kuchli magnit maydon ta’siridagi erkin elektron energiyasi. Z o‘qi bo‘yicha joylashgan qatlamlarga perpendikulyar bo‘lgan kvant o‘rali geterostrukturalar uchun (2) tenglama quyidagi ko‘rinishga keladi:

$$\left\{ \frac{-\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(z) \right\} \psi(r) = E \psi(r) \quad (3)$$

(3) tenglamani yechish uchun to‘lqin funksiya bilan o‘zgaruvchilarni ajratish usulidan foydalaniladi. U holda, (3) tenglamaning yechimi quyidagi ko‘rinishga keladi:

$$\Psi_{k_{\perp} m}(r) = \frac{1}{\sqrt{S}} \exp(i k_{\perp} r_{\perp}) \varphi_m(z) \quad (4)$$

Bu yerda, S – kvant o‘raning Z o‘qiga tik bo‘lgan ko‘ndalang kesim yuzasi, $k_{\perp}=k_x i+k_y j$ – kvant o‘ra tekisligi bo‘ylab erkin harakatlanishni ifodalaydigan, ikki o‘lchamli to‘lqin vektori [5-7].

U holda, yorug‘likning zonalararo yutilish vaqtida kvant o‘raning ruxsat etilgan zonasidagi erkin zaryad tashuvchilarning boshlang‘ich va oxirgi xolatlarini (4) ga ko‘ra, quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\begin{aligned}\Psi_{vk\perp j}(r) &= \frac{1}{\sqrt{S}} \exp(i k_{\perp} r_{\perp}) \phi_{vj}(z) u_v(r) \\ \Psi_{ck\perp i}(r) &= \frac{1}{\sqrt{S}} \exp(i k_{\perp} r_{\perp}) \phi_{ci}(z) u_c(r)\end{aligned}\quad (5)$$

bu yerda, $u_v(r)$ va $u_c(r)$ – kvant o‘rali yarimo‘tkazgichlarning valentlik zonasining shipi va o‘tkazuvchanlik zonasining tubiga mos keladigan Blox to‘lqin funksiyalarining davriy qismlari.

(5) da keltirilgan erkin zaryad tashuvchilarning to‘lqin funksiyalaridan hamda formulalardan foydalangan holda, kvantlovchi magnit maydon ta’siridagi kvant o‘raning valent zonasi shipi va o‘tkazuvchanlik zonasi tubidan boshlab hisoblanadigan energiya qiymatlari quyidagicha topiladi:

$$\begin{aligned}E_c^{2d}(B, d, n_{cZ}) &= E_c + E_{ci} + \left(N_L^c + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^c + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2 m_c d^2} n_{eZ}^2 \\ E_v^{2d}(B, d, n_{vZ}) &= E_v - E_{vi} - \left(N_L^v + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^v - \frac{\hbar^2 \pi^2}{2 m_v d^2} n_{vZ}^2\end{aligned}\quad (6)$$

Bu yerda, $N_L^c, N_L^v - i$ kvant o‘raning ruxsat etilgan zonasidagi zaryad tashuvchilarning Landau satxlari soni; $\omega_c^c, \omega_c^v - i$ kvant o‘raning o‘tkazuvchan va valent zonalarida magnit maydonining siklotron chastotasi; d – kvant o‘ra qalinligi; $n_{eZ}^2, n_{vZ}^2 - i$ kvant o‘raning o‘tkazuvchan va valent zonalarida o‘lchamli kvantlash qism-zonasining tartib raqami; n_{eZ}, n_{vZ} – mos ravishda Z o‘qi bo‘yicha elektronlar va teshiklarning kvantlash satxlari tartib raqamlari; elektron va valent zonalar simmetrik deb faraz qilamiz, u holda, $n_{eZ}=n_{vZ}=n_Z$ shart bajariladi; B – magnit maydoni induksiyasi.

(4) va (5) erkin zaryad tashuvchilarning to‘lqin funksiyalarni shaklini hisobga olgan holda formuladagi elektron impulsining matritsa elementi qo‘yidagiga teng bo‘ladi:

$$P_{civj}(k_{\perp}) = \int_V \Psi_{ck_{\perp}i}^i(r) s \hat{p} \Psi_{vk_{\perp}j}^i(r) dV = P_{cv} \cdot P_{cmvm} \quad (7)$$

Bunda

$$P_{cv} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} u_c^i(r) s \hat{p} u_v(r) dV \quad (8)$$

P_{cv} – yorug‘lik vektori proeksiyasining matritsa elementi, bu to‘g‘ri zonali kvant o‘rali yarimo‘tkazgichning ruxsat etilgan zonalarining chekka xududlarida xususiy zonalararo optik o‘tish extimolligini bildiradi. Ω - yarimo‘tkazgichning elementar yacheykasining hajmi.

Tahlil va natijalar

Yuqoridagi ifodaga ko‘ra, to‘g‘ri zonali kvant o‘ra uchun magnitooptik yutilish koeffitsientiga kuchli magnit maydon ta‘sir etganda, uning ossillyatsiyalanish jarayoni asosan ikki o‘lchamli kombinirlangan holatlar zichligi hisobiga hosil bo‘ladi. Ma‘lumki, kvant o‘lchamli yarimo‘tkazgichlar uchun kombinirlangan holatlar zichligini haroratga bog‘liqlik ifodasi $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z))$ keltirib chiqarilgan [8-10]. Agar, qo‘yilgan masalani oddiyroq, ya‘ni matritsa elementi impulsi o‘zgarishini hisobga olinmasa, ko‘rilayotgan zona – faqat parabolik dispersiya qonuni uchun o‘rinli (zaryadli zarralarning effektiv massalarini o‘zgarmas) va eng asosiysi o‘tkazuvchanlik va valent zonalarini bir – biriga nisbatan simmetrik zonalar deb olinsa, u holda zonalararo magnitooptik yutilish koeffitsienti $\alpha^{2d}(\omega, B, T, d)$ ni aynan $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z))$ orqali aniqlashga imkon topiladi. Yuqoridagi (1), (2) – (3) hamda (4)-(5) ifodalarni hisobga olgan holda, to‘g‘ri zonali kvant o‘lchamli yarimo‘tkazgichlarning magnitooptik yutilish koeffitsientini harorat va kuchli magnit maydonga bog‘liqligini belgilovchi yangi analitik formulani keltirib chiqarish mumkin:

$$\alpha_B^{2d}(h\nu, B, T, d) = 2\pi e^2 \frac{\mathfrak{I} P_{cv} \vee \mathfrak{I}^2}{nc \varepsilon_0 m_0^2 2\pi \nu V} \sum_{ij} \mathfrak{I} S_{civj} \vee \mathfrak{I}^2 N_{jds}^{2d} \left(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z) \right) \mathfrak{I} \mathfrak{I} \quad (9)$$

yoki

$$\alpha_B^{2d}(h\nu, B, T, d) = \frac{2\pi e^2 |P_{cv}|^2}{nc \varepsilon_0 m_0^2 2\pi \nu V} \frac{eB}{\pi \hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \frac{m_{op} S}{2\pi \hbar^2} \times \sum_{ij} \mathfrak{I} S_{civj} \vee \mathfrak{I}^2 \sum_{N_L^c, N_L^v, n_z} \exp \left[\frac{- \left(h\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2 m_{cv}^{\mathfrak{I}} d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \mathfrak{I} \quad (10)$$

bu yerda, m_{op} – zaryadli zarralarning optik effektiv massasi, ya'ni:

$$\frac{1}{m_{op}} = \frac{1}{m_n} + \frac{1}{m_p}$$

Agar, $S/V = a^{-1}$ va $A_{cv}^{2d} \approx \frac{m_{op} e^2 |P_{cv}|^2}{nc \varepsilon_0 m_0^2 \hbar a}$ kabi o'zgaras kattaliklar kiritib olinsa, (10) ifoda qo'yidagi

ko'rinishga keladi:

$$\alpha_B^{2d}(h\nu, B, T, d) = A_{cv}^{2d} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_{op}} \cdot \frac{1}{kT} \times \sum_{ij} |S_{civj}|^2 \sum_{N_L^c, N_L^v, n_z} \exp \left[\frac{- \left(h\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2 m_{cv}^{\mathfrak{I}} d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (11)$$

Magnit maydon induksiyasi nolga yaqinlashib borsa, (11) formula, magnit maydon ta'siri mavjud bo'lmagandagi kvant o'ralar uchun optik yutilish koeffitsienti ifodagisi qaytadi va u qo'yidagi ko'rinishga keladi [11]:

$$\alpha_{cv}^{KYa}(\omega) = A_{cv}^{KYa} \cdot \sum_{\beta} |S_{cv\beta}^{KYa}|^2 \theta(\hbar\omega - E_{cv\beta}) \quad (12)$$

Bu yerda, S_{cv}^{ko} -bir o'lchovli kvant o'rasi zona ostilari orasidagi zonalararo optik o'tish ehtimoli uchun qo'shimcha tanlab olish qoidalarini belgilaydigan og'ish funktsiyalarining bir-birini qoplash integrali. Magnit maydon ta'sirida, ushbu kattalikni o'zgaras deb olinadi, sababi bu kattalik ossillyatsiya jarayonlarida deyarli o'zini namoyon etmaydi.

Xulosa

Demak, parabolik dispersiya qonuni uchun to'g'ri zonali kvant o'rali yarimo'tkazgichlarda magnitooptik yutilish koeffitsientini harorat va magnit maydonga bog'liqligini aniqlovchi yangi (11) formula – matematik model ishlab chiqildi. Ushbu taklif etilyotgan model asosida bir qator tajriba natijalarini turli haroratlarda va magnit maydonlar ta'sirida tushuntirish imkoni tug'ildi [12]. To'g'ri zonali kvant o'ra asosidagi yarimo'tkazgichli materiallarning optik yutilish koeffitsientiga harorat va magnit maydonning ta'siri tadqiq etildi. Kombinirlangan holatlar zichligi ossillyatsiyalari qonuniyatidan magnitooptik yutilish mexanizmini aniqlashning yangi metodi taklif etildi. Kvant o'rali to'g'ri zonali yarimo'tkazgichli strukturalarning magnitooptik yutilish koeffitsientining harorat, magnit maydon va kvant o'raning qalinligiga bog'liqligini hisoblovchi yangi matematik model ishlab chiqildi. Taklif etilayotgan model asosida, o'zgarmas past haroratlardagi magnitooptik yutilish koeffitsientini yuqori haroratlarda oralig'ida ossillyatsiyalarning o'zgarish dinamikasi mukammal tushuntirildi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. В.Д. Кревчик, А.Б. Грунин, Вас.В. Евстифеев. Магнитооптика квантовых ям с $D^{(-)}$ -центрами // Физика и техника полупроводников, 2006, том.40, вып.6, стр. 689-694.
2. Л.С. Бовкун, К.В. Маремьянин, А.В. Иконников, К.Е. Спирин, В.Я. Алешкин, М. Potemski, В. Piot, М. Orlita, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, В.И. Гавриленко. Магнитооптика квантовых ям на основе HgTe/CdTe с гигантским расщеплением Рашбы в магнитных полях до 34 Тл // Физика и техника полупроводников, 2018, том.52, вып.11, стр. 1274-1279.
3. С.В. Томилин, В.Н. Бержанский, А.Н. Шапошников, А.Р. Прокопов, А.В. Каравайников, Е.Т. Милюкова, Т.В. Михайлова, О.А. Томилина. Вертикальное смещение магнитооптической петли гистерезиса в магнитоплазмонном нанокompозите // Физика твердого тела, 2020, том 62, вып. 1. Стр. 101-109.

4. Л.Е. Воробьев, Е.Л. Ивченко, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин. Оптические свойства наноструктур: Учеб. Пособие // Под ред. Е.Л. Ивченко и Л.Е. Воробьева. СПб.: Наук, 2001.–188 с.
5. 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)
6. Erkaboev U.I., Negmatov U.M., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I., Sayidov N.A. Influence of a quantizing magnetic field on the Fermi energy oscillations in two-dimensional semiconductors // *International Journal of Applied Science and Engineering*. 2022. Vol.19, Iss.2, pp. 2021123-1-2021123-8. <https://www.scopus.com/sourceid/21100822732>).
7. 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. (<https://www.scopus.com/sourceid/11500153309>).
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. (<https://www.scopus.com/sourceid/145208>).
9. 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.
10. 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. (<https://www.scopus.com/sourceid/29055>).

11. 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.
12. 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. (<https://www.scopus.com/sourceid/26917>).