

Dadamirzaev Muzaffar G‘ulomqodirovich

Namangan davlat texnika universiteti katta o‘qituvchisi (PhD)

Erkaboyev Ulug‘bek Inoyatillayevich

Namangan davlat texnika universiteti professori

Sayidov Nozimjon Abdunosirovich

Namangan davlat texnika universiteti dotsenti

G‘ayratov Saydullo Iqboljon o‘g‘li

Namangan davlat texnika universiteti magistranti

Tel: 99-436-77-55 E-mail: muzaffardadamir81@gmail.com

TOR ZONALI KVANT O‘RANING TA‘QIQLANGAN ZONA KENGLIGINI HARORAT VA MAGNIT MAYDONGA BOG‘LIQLIGI

Annotatsiya. Ushbu maqolada tor zonali kvant o‘ralarda ta‘qiqlangan zona kengligining harorat va magnit maydonga bog‘liqligi nazariy jihatdan o‘rganilgan. Tadqiqotda InAs/GaP tipidagi tor zonali kvant o‘lchamli geterostrukturalar asosida elektron va kovaklarning energiyasi, ularning to‘lqin funksiyalari hamda energetik holatlar zichligining o‘zgarishi tahlil qilingan. Shuningdek, harorat oshishi bilan kvant o‘raning ta‘qiqlangan zonasi torayishi, energiya holatlar zichligidagi ossillyatsiyalar pasayishi aniqlangan. Taklif etilgan model yordamida past haroratlarda va kuchli kvantlovchi magnit maydon sharoitida kvant o‘raning ta‘qiqlangan zona kengligini nazorat qilish imkoniyati asoslab berilgan.

Kalit so‘zlar: Tor zonali kvant o‘ra, geterostruktura, magnit maydon, harorat, ta‘qiqlangan zona, energetik holatlar zichligi, Landau sathlari, effektiv massa.

Дадамирзаев Музаффар Гуламкадирович

Наманганский государственный технический университет ст.преп. (PhD)

Эркабоев Улугбек Инаятиллаевич

Наманганский государственный технический университет проф.

Сайидов Нозимжон Абдуносирович

Наманганский государственный технический университет доц.

Гайратов Сайдулло Икболжон угли

Наманганский государственный технический университет магистр

Tel: 99-436-77-55 e-mail: muzaffardadamir81@gmail.com

ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЁННОЙ ЗОНЫ УЗКОЗОННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация. В данной статье теоретически исследована зависимость ширины запрещённой зоны узкозонных квантовых ям от температуры и магнитного поля. В исследовании на основе узкозонных квантово-размерных гетероструктур типа InAs/GaP проанализированы энергия электронов и дырок, их волновые функции, а также изменение плотности энергетических состояний. Установлено, что с повышением температуры ширина запрещённой зоны квантовой ямы уменьшается, а амплитуда осцилляций плотности энергетических состояний снижается. С помощью предложенной модели обоснована возможность управления шириной запрещённой зоны квантовой ямы при низких температурах и в условиях сильного квантующего магнитного поля.

Ключевые слова: узкозонная квантовая яма, гетероструктура, магнитное поле, температура, запрещённая зона, плотность энергетических состояний, уровни Ландау, эффективная масса.

Dadamirzaev Muzaffar Gulamkadirovich

Namangan state technical university Senior Lecturer (PhD)

Erkaboev Ulugbek Inayatillaevich

Namangan state technical university pfof.

Sayidov Nozimjon Abdunosirovich

Namangan state technical university associate professor

Gayratov Saydullo Iqboljon o'g'li

Namangan state technical university master's student

Tel: 99-436-77-55 E-mail: muzaffardadamir81@gmail.com

DEPENDENCE OF THE BAND GAP WIDTH OF NARROW-BAND QUANTUM WELLS ON TEMPERATURE AND MAGNETIC FIELD

Annotation. In this paper, the dependence of the band gap width of narrow-band quantum wells on temperature and magnetic field is theoretically investigated. Based on narrow-band quantum-sized heterostructures of the InAs/GaP type, the energies of electrons and holes, their wave functions, and the variation of the density of energy states are analyzed. It is established that, with increasing temperature, the band gap width of the quantum well decreases, while the amplitude of oscillations in the density of energy states diminishes. Using the proposed model, the possibility of controlling the band gap width of a quantum well at low temperatures and under strong quantizing magnetic fields is substantiated.

Keywords: narrow-band quantum well, heterostructure, magnetic field, temperature, band gap, density of energy states, Landau levels, effective mass.

Kirish. Hajmiy va kichik o'lchamli yarimo'tkazgichli strukturalarning asosiy fundamental fizik kattaligi ta'qiqlangan zona kengligi bo'lib (E_g^{3d}, E_g^{2d}), uning energetik kengligi yarimo'tkazgich asosidagi qurilmaning eksplutasion parametrlarini oldindan bashorat qilish imkonini beradi. Shuning uchun, E_g^{3d} va E_g^{2d} larni aniqlash (agar yangi yaratilgan materiallarning ta'qiqlangan zona kengligi ma'lum bo'lmasa) yarimo'tkazgichli geterostrukturalar texnologiyasini asosiy vazifalaridan biri hisoblanadi. Bundan tashqari, E_g ni yana muhim xususiyatlaridan biri, uning tashqi ta'sirlarga moyilligi kuchli bo'lib, xattoki, ushbu ta'sir natijasida E_g ni o'zgarishi, yarimo'tkazgichli asbobning fizik va kimyoviy xossalarini tubdan o'zgartirib yuboradi.

Adabiyotlar tahlili. [1-4] ishlarda tor zonali kvant o'rali yarimo'tkazgichlarning (InAs/GaP va GaSb/InSb) ruxsat etilgan zonalarining elektrik va optik xususiyatlari o'rganilgan. Jumladan, 1-rasmda InAs/GaP (kvant o'ra InAs) materialning zonaviy strukturasi keltirilgan. Bu zonalar strukturasi

ko‘rinib turibdiki, $\frac{\pi^2 \hbar^2}{2d^2} \left(\frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_n} \right)$ xadni hisobiga InAs kvant o‘raning ta’qiqlangan zona kengligi E_g^{3d} dan E_g^{2d} ga (ortishi) o‘zgarishi kuzatilmoqda. Lekin, ushbu ishlarda kvantlovchi magnit maydonni ta’siri umuman tadbiq etilmagan.

Tor zonali kvant o‘raning o‘tkazuvchanlik va valent zonasidagi erkin elektronlar va kovaklarning E_n^e , E_n^p energetik spektri hamda ushbu zaryad tashuvchilarning χ_n^e, χ_n^h to‘lqin funksiyalari $B=0$ (magnit maydon ta’sir etmaganda) quyidagi Shredenger (bir elektronli xolat uchun) tenglamalari topiladi.

$$\begin{cases} \left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + E_c(z) \right) \chi_n^e(z) = E_n^e \chi_n^e(z) \\ \left(\frac{\hbar^2}{2m_p} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + E_v(z) \right) \chi_n^p(z) = E_n^p \chi_n^p(z) \end{cases} \quad (1)$$

Bunda, m_e , m_h - elektronlar va kovaklarning effektiv massalari. E_c , E_v tor zonali kvant o‘raning o‘tkazuvchanlik va valentlik zonalarining chekka sohalari, $E_c(z)$, $E_v(z)$ esa tor zonali kvant o‘raning ifodalovchi energiyaga bog‘liq funksiyalardir. Tor zonali yarimo‘tkazgichlarning o‘tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlarning harakati va kvant o‘raning valentlik zonasi XY tekisligi bo‘ylab cheksiz bo‘lib qoladi yoki bunday tekislikdagi elektronlar va kovaklarning energetik spektri uzluksiz bo‘ladi. Bu holda elektronlar va kovaklarning harakat energiyasi Z o‘qi bo‘ylab kvantlanadi, ya’ni harati cheklangan bo‘ladi. Shunday qilib, kvant o‘raning o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar va valentlik zonasidagi kovaklarning umumiy energiyasi dispersiyaning nokvadratik qonuniga muvofiq quyidagicha ifodalanadi [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_c^{2d, nonparab}(k, d) = -\frac{E_g}{2} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{4P^2}{E_g^2} * \frac{2m_n}{h^2} \left(\frac{h^2 k_x^2}{2m_{nx}} + \frac{h^2 k_y^2}{2m_{ny}} + \frac{\pi^2 h^2}{2m_{nz}} n_z^2 \right) \right]^{1/2} \right\} \\ E_v^{2d, nonparab}(k, d) = -\frac{E_g}{2} \left\{ 1 + \left[1 + 4 \frac{\frac{h^2 k_x^2}{2m_x} + \frac{h^2 k_y^2}{2m_y} + \frac{\pi^2 h^2}{2md^2} n_z^2}{E_g^2} \right] \right\} \end{array} \right. \quad (2)$$

Tahlil va natijalar. Kvadratik dispersiya qonuni uchun [6] ishlarda kvant o'raning energetik holatlar zichligini magnit maydon va haroratga bog'liqligi mukammal o'rganilgan. Natijada, $N_s^{k,2d}(E, B, T, d)$ bo'yicha yangil model taklif qilingan [7]:

$$N_{S,Z}^{2d}(E, B, T, d) = \sum_{N_L, N_Z}^{\infty} \frac{eB}{\pi h} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \exp \left(- \frac{\left(E - \left(\left(N_L + \frac{1}{2} \right) h \omega_c + \frac{\pi^2 h^2}{2m^* d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right) \quad (3)$$

Bu modelni yaratishda, energtik holatlar zichligini delta funksiyalar $\delta(x)$ ni energiya bo'yicha qatorga yoyish usulidan foydalanilgan [8].

Shunday qilib, kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonalaridagi elektronlar va kovaklarning diskret Landau sathlarining haroratga bog'liqligini tahlil qilaylik. Tor zonali to'g'ri burchakli kvant o'raning ruxsat etilgan chegara zonalariga ko'ndalang va kvantlovchi magnit maydon kuchli ta'sir qiladi. Bu ta'sir tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasi tubi va valentlik zonasi shipining "siljishi" ga sabab bo'ladi. Bu energetik holatlar zichligidagi ossillyatsiyalarda ham o'z aksini topadi. Bu holda tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonalaridagi zaryad tashuvchilarning energiyasi XY tekisligi bo'ylab kvantlanadi, ya'ni bu yo'nalishda harakat cheklanadi. Shunday qilib, (2) formula asosida, spinni inobatga olmagan holda, ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon ta'sirida tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar va valentlik zonasidagi kovaklarning energiyasini quyidagicha ifodalash mumkin [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_n^{2d, nonparab}(E_g(B, d), B, d, n_z, N_L^e) = -\frac{E_g(B, d)}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(E_g(B, d))^2 + 4E_g(B, d) \left[(N_L^e + \frac{1}{2}) \hbar \omega_c^e + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2 \right]} \\ E_v^{2d, nonparab}(E_g(B, d), B, d, n_z, N_L^p) = -\frac{\left(E_g(0) + \frac{1}{2} \hbar \omega_c^p + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2 \right)}{2} * \left\{ 1 + \left[1 + 4 \frac{\left(N_L^p + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c^p + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2}{\left(E_g(0) + \frac{1}{2} \hbar \omega_c^p + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2 \right)^2} \right]^{1/2} \right\} \end{array} \right. \quad (4)$$

Bu yerda N_L^e va N_L^p - kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonasidga Landau sathlari soni. Kichik o'lchamli materiallarning muhim xususiyatlaridan biri kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonalaridagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalari hisoblanadi. Ayniqsa, kichik o'lchamli materiallarga kvantlovchi magnit maydonining ta'siri zaryad tashuvchilar energetik spektrining o'zgarishiga va shu bilan birga ruxsat etilgan zonaning holatlar zichligi ossillyatsiyalarining o'zgarishiga olib keladi. Endi, ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon ta'sirida tor zonali kvant o'rali to'g'ri burchakli geterostrukturalarning o'tkazuvchanlik va valentlik zonalaridagi holatlar zichligi ossillyatsiyalarining haroratga bog'liqligini ko'rib chiqamiz.

Ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon ta'sirida tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonalaridagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalariga harorat ta'sirini o'rganish orqali kvant o'ra ta'qiqlangan zonasining haroratga bog'liqligini hisoblash mumkin. (3) formulani qatorga yoyish orqali tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonasidagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalarini aniqlanadi. Jumladan,

tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasi uchun:

$$N_{s,z}^{e,2d}(E, B, T, d) = \sum_{N_L, n_z} \frac{eB}{\pi \hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \exp \left(- \frac{\left(E + \frac{E_g(B, d)}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(E_g(B, d))^2 + 4E_g(B, d) \left(\left(N_L^e + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c^e + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2 \right)} \right)^2}{(kT)^2} \right) \quad (5)$$

tor zonali kvant o'raning valentlik zonasi uchun:

$$N_{s,z}^{v,2d}(E,B,T,d) = \sum_{N_L, n_h} \frac{eB}{\pi \hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \exp \left[- \frac{\left(E + \frac{\left(E_g(0) + \frac{1}{2} \hbar \omega_c^p + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_h \right)}{2} \right) * \left\{ 1 + \left[\frac{\left(N_L^p + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c^p + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_p^2}{\left(E_g(0) + \frac{1}{2} \hbar \omega_c^p + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_p^2 \right)^2} \right]^{1/2} \right\}^2}{(kT)^2} \right] \quad (6)$$

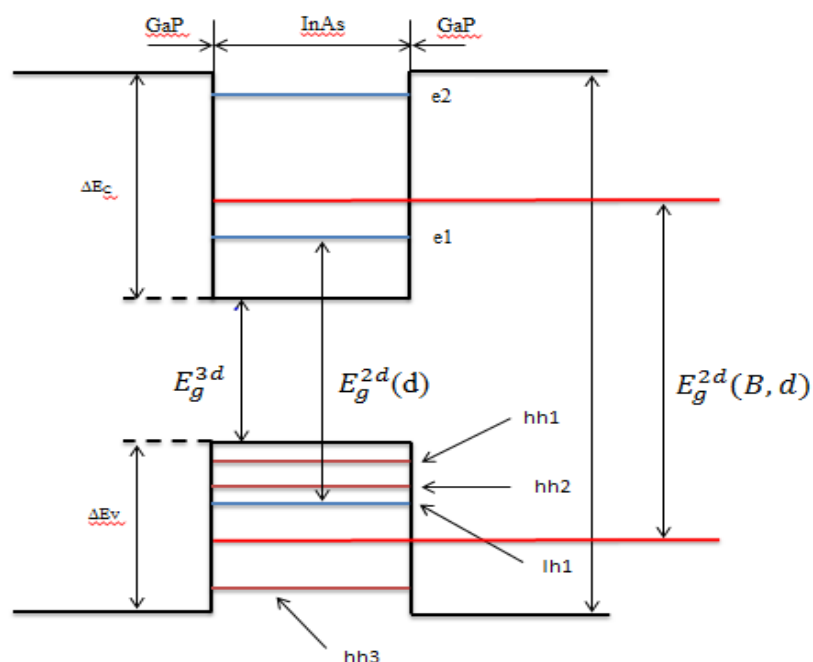
$E > E_c$ shart bajarilsa, ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon ta'sirida tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalining haroratga bog'liqligi (5) formula orqali aniqlanadi, agar $E < E_v$ bo'lsa, valentlik zonasidagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalining haroratga bog'liqligi (6) formula orqali hisoblanadi, boshqa hollarda bu ta'qiqlangan zona bo'lganligi sababli, uni hisoblash bu sharoitda mos kelmaydi. Demak, tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonasidagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalariga kuchli ko'ndalang magnit maydon va haroratning ta'sirini (5) va (6) ifodalar orqali nokvadratik dispersiya qonuniga ko'ra aniqlash mumkin.

Tor zonali kvant o'lchamli geterostrukturali materiallarning ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon ta'siridagi energetik holatlar zichligini haroratga bog'liq ossillyatsiyalarini taxlil qilaylik. 1-rasmda InAs/GaP kvant o'lchamli geterostrukturaning ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon ta'siridagi bitta kvant o'ra diagrammasi keltirilgan. InAs tor zonali kvant o'ra qalinligi $d = 1 \div 10$ nm gacha bo'lib, bu GaP qatlamining qalinligidan ancha kichik [10]. Bu geterobirikmadagi InAs ning ta'qiqlangan zona kengligi ($E_{g0} = 0.35$ eV), GaP ning ta'qiqlangan zona kengligi ($E_{g0} = 2.26$ eV). Bundan ko'rinib turibdiki GaP ning ta'qiqlangan zona kengligi InAs ning ta'qiqlangan zona kengligidan ancha kattaroqdir 1-rasm. O'tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar va valentlik zonasidagi kovaklar Z o'qi bo'ylab harakati kvantlangan. Ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon Z o'qiga parallel, XY tekisligiga perpendikulyar bo'lganda o'tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar va valentlik zonasidagi kovaklarning harakati cheklanadi. Shunday qilib, zaryad tashuvchilarning harakati barcha yo'nalishlarda to'liq kvantlanadi, bu holat kvant nuqta analogiyasini beradi. Bu fizik jarayonlarda energetik holatlar

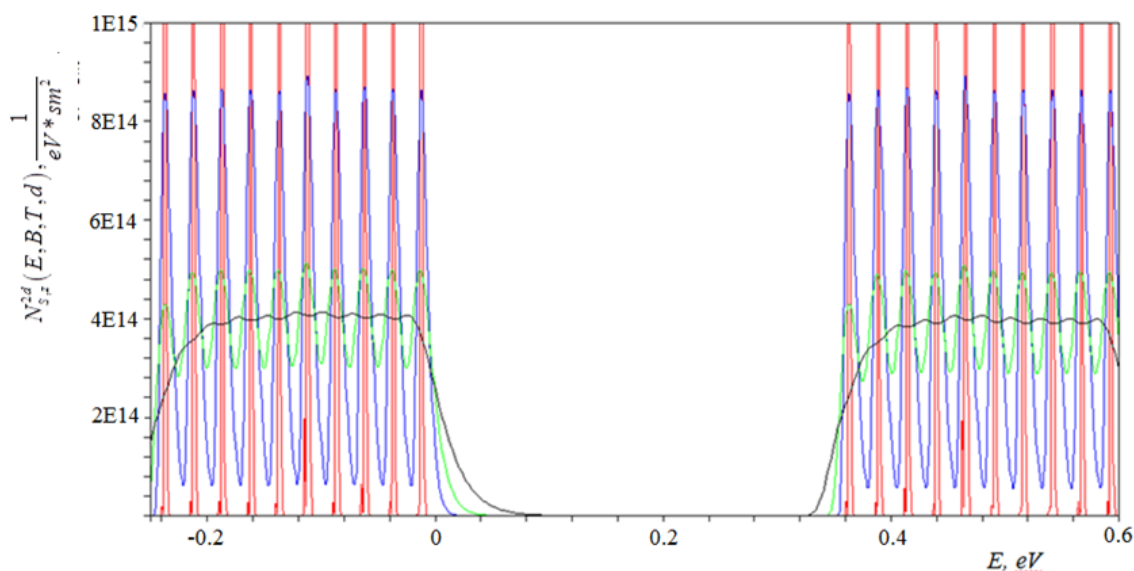
zichligidagi ossillyatsiyalarni qanday aniqlanadi va haroratning ta'siri qanday bo'ladi degan savol tug'iladi. Yangi taklif etilgan model asosida InAs kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonalaridagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalarini haroratga bog'liq holda hisoblash mumkin. 1-rasmda doimiy past haroratda va ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon ta'sirida InAs tor zonali kvant o'raning ruxsat etilgan zonalaridagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalari tasvirlangan. Bu yerda $B=10$ Tl, $d=6$ nm, $T=5$ K va $E_{g0}=0.35$ eV. Tor zonali kvant o'raning qalinligi d zaryad tashuvchilarning de-Broyl to'lqin uzunligiga teng yoki undan kichik bo'lsa (xona haroratida InAs material uchun ($\lambda_d=41$ nm), erkin elektronlarning harakati harorat o'qi bo'yicha kvantlanadi. InAs tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik va valentlik zonalaridagi elektronlar va kovaklarni zich joylashgan diskret Landau sathlarini hosil qiladi (2-rasm). $T=5$ K va $B=0$ bo'lganda InAs tor zonali kvant o'raning ta'qiqlangan zona kengligi $E_g^{2d}(0) = 0,35$ eV, sirt holatlar zichligi $N_{ss} = 4 \cdot 10^{15} eV^{-1} sm^{-1}$.

Ko'ndalang kvantlovchi magnit maydon ($B=10$ Tl) ta'siri natijasida, o'tkazuvchanlik zonasining tubi va valentlik zonasining shipi siljishi kuzatiladi. Bu hodisa Landau sathlarining paydo bo'lishi bilan bog'liq. Natijada, InAs tor zonali kvant o'raning ta'qiqlangan zonasi kengayishi kuzatiladi. Ko'plab ilmiy ishlarda kvant o'lchamli geterostrukturali materiallarda kvant o'radagi ta'qiqlangan zona kengligining kvant o'ra kengligiga bog'liqligi nazariy va tajribaviy jihatdan keng o'rganilgan. Taklif etilayotgan matematik model past haroratlarda va kvantlovchi magnit maydon ta'sirida kvant o'raning ta'qiqlangan zona kengligini boshqarish imkonini beradi. 2-rasmda GaP/InAs (InAs kvant o'ra) geterostrukturaning ta'qiqlangan zona kengligi B va T ga bog'liqligi keltirilgan. Ushbu grafik taklif etilgan model asosida qurilgan. $T=5$ K da 1-rasmdagidek $E_g^{2d} = 0.361$ eV ga tengligi hisoblangan. Lekin, 2-rasmdan ko'rinib turibdiki, $T=50$ K, 100 K va 200 K larda $E_g^{2d}(B, T)$ kamayib borishini kuzatish mumkin. Buning asosiy sababi, N.F.Mott nazariyasiga muvofiq, holatlar zichligini "dum" lari paydo bo'lmoqda. Ushbu "dum" larning paydo bo'lishi kvant o'raning ta'qiqlangan zona kengligini

kamayishiga olib kelmoqda. Umuman olganda, model yordamida tor zonali kvant o'raning $E_g(B, T)$ ni boshqarish imkoniyati paydo bo'lmoqda.



1-rasm. Tor zonali kvant o'lchamli geterostrukturalarning energetik spektriga past haroratlarda ko'ndalang magnit maydonning ta'siri [2].



— $T=5\text{ K}, B=10\text{ Tl}, d=4\text{ nm}$, — $T=50\text{ K}, B=10\text{ Tl}, d=4\text{ nm}$,
— $T=100\text{ K}, B=10\text{ Tl}, d=4\text{ nm}$, — $T=200\text{ K}, B=10\text{ Tl}, d=4\text{ nm}$

2-rasm. GaP/InAs (InAs kvant o'ra) geterostrukturaning ta'qiqlangan zona kengligi B va T ga bog'liqligi

Xulosa. Ushbu ishda tor zonali InAs/GaP kvant o'lchamli geterostrukturalarda ta'qiqlangan zona kengligining harorat va magnit maydon ta'sirida o'zgarishi nazariy jihatdan tahlil qilindi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, harorat oshishi bilan kvant o'raning ta'qiqlangan zona kengligi kamayadi, shuningdek, energetik holatlar zichligidagi ossillyatsiyalar amplitudasi pasayadi. Kuchli kvantlovchi magnit maydon esa o'tkazuvchanlik zonasi tubi va valentlik zonasining shipi siljishiga sabab bo'lib, ta'qiqlangan zonaning kengayishiga olib keladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Zawadzki W., Raymond A., Kubisa M. Reservoir model for two-dimensional electron gases in quantizing magnetic fields: A review // Phys. Status Solidi B. 2014. 251, No. 2, p. 247–262.
<https://doi.org/10.1002/pssb.201349251>
2. Abramkin D. S., Shamirzaev T. S., Type-I Indirect-Gap Semiconductor Heterostructures on (110) Substrates // Semiconductors, 2019, Vol. 53, No. 5, pp. 703–710. <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.05.47569.9018>
3. Rached Y., Caid M., Rached D., Rached H., Benkhetrou N. Effects of stacking periodicity on the structural, electronic, optical and thermoelectric properties of GaSb/InSb superlattices // Materials Science in Semiconductor Processing, 2023, Volume 156, 107297.
4. Kasapoglu E., Effects of the magnetic field, hydrostatic pressure and temperature on binding energies and optical absorption of states with donor impurity in different type quantum wells // Optical and Quantum Electronics. 2025. Vol.57. pp.08000-3-08000-17.
5. Цидильковский И.М. Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика // Издательство «Наука» Главная редакция физико - математической литературы, М., 1972 г. С. 264-266. 640 С.
6. 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: Brief Reports and Reviews. 2021. Vol. 16, No. 9. pp.2150102:1-10.
7. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Sayidov N.A., 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. Vol.97. Iss.3. pp.1-10.
 8. Gulyamov G., Erkaboev U.I., Sharibaev N.Yu. Simulation of the temperature dependence of the density of states in a strong magnetic field // Journal of Modern Physics. - USA. 2014. –Vol. 5, No.8. –pp.680-685.
 9. Dadamirzayev M.G., Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Termirov Q.A. Torzonal kvant o‘raning Landau sathlariga magnit maydon ta’siri // O‘zbekiston milliy universiteti xabarлари. 2025 № 1 223-232 b.
 10. Abramkin D. S., Shamirzaev T. S., Type-I Indirect-Gap Semiconductor Heterostructures on (110) Substrates // Semiconductors, 2019, Vol. 53, No. 5, pp. 703–710.