

Dadamirzaev Muzaffar G‘ulomqodirovich

Namangan davlat texnika universiteti katta o‘qituvchisi

Erkaboyev Ulug‘bek Inoyatillayevich

Namangan davlat texnika universiteti professori

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

**TOR ZONALI KVANT O‘RANING RUXSAT ETILGAN ZONALARIDAGI
IKKI O‘LCHOVLI ENERGETIK HOLATLAR ZICHLIGINI HARORAT
VA MAGNIT MAYDONGA BOG‘LIQLIGI**

Annotatsiya. Ushbu maqolada tor zonali kvant o‘raning ruxsat etilgan zonalaridagi ikki o‘lchovli energetik holatlar zichligining harorat va magnit maydonga bog‘liqligi nazariy jihatdan tadqiq etilgan. Tadqiqotda Gauss delta-funksiyasining haroratga bog‘liqligi tahlil qilinib, uning yordamida kvant o‘lchamli yarimo‘tkazgichlarda energetik sathlarning o‘zgarish qonuniyatlari aniqlangan. Noparabolik (tor zonali) va parabolik (keng zonali) dispersiya qonunlari uchun energetik holatlar zichligi ossillyasiyalarining harorat va magnit maydonga bog‘liqligini matematik modeli taklif etilgan.

Kalit so‘zlar. Kvant o‘ra, magnit maydon, diskret sathlar, tor zona, harorat, holatlar zichligi, ta‘qiqlangan zona, effektiv massa, Landau sathlari.

Дадамирзаев Музаффар Гуламкадирович

Наманганский государственный технический университет ст.преподаватель

Эркабоев Улугбек Инаятиллаевич

Наманганский государственный технический университет проф.

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

**ЗАВИСИМОСТЬ ДВУМЕРНОЙ ПЛОТНОСТИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В РАЗРЕШЁННЫХ ЗОНАХ
УЗКОЗОННОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Аннотация. В данной статье теоретически исследована зависимость двумерной плотности энергетических состояний в разрешённых зонах узкозонной квантовой ямы от температуры и магнитного поля. Проанализирована температурная зависимость гауссовой дельта - функции, с помощью которой определены закономерности изменения энергетических уровней в полупроводниках квантовых размеров. Для непараболического (узкозонного) и параболического (широкозонного) законов дисперсии предложена математическая модель зависимости осцилляций плотности энергетических состояний от температуры и магнитного поля.

Ключевые слова. Квантовая яма, магнитное поле, дискретные уровни, узкая зона, температура, плотность состояний, запрещённая зона, эффективная масса, уровни Ландау.

Dadamirzaev Muzaffar Gulamkadirovich

Namangan state technical university Senior Lecturer.

Erkaboev Ulugbek Inayatillaevich

Namangan state technical university pfof.

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

DEPENDENCE OF THE TWO-DIMENSIONAL DENSITY OF ENERGY STATES IN THE ALLOWED BANDS OF A NARROW-GAP QUANTUM WELL ON TEMPERATURE AND MAGNETIC FIELD

Annotation. This article theoretically investigates the dependence of the two-dimensional density of energy states in the allowed zones of a narrow-gap quantum well on temperature and magnetic field. The temperature dependence of the Gaussian delta function is analyzed, which makes it possible to determine the regularities of energy level variations in quantum-sized semiconductors. For nonparabolic (narrow-gap) and parabolic (wide-gap) dispersion laws, a mathematical model describing the dependence of energy state density oscillations on temperature and magnetic field is proposed.

Key words. Quantum well, magnetic field, discrete levels, narrow gap, temperature, density of states, band gap, effective mass, Landau levels.

Kirish

Jaxonda, foto va optoelektrik o'zgartirgichlar sifatida keng qo'llaniladigan mikro va nanostrukturali yarimo'tkazgichlarning elektr, optik va magnit xossalarini o'rganish shiddat bilan rivojlanib bormoqda. Mikro va nano o'lchamli yarimo'tkazgichli strukturalarning asosiy fundamental kattaliklaridan biri ta'qiqlangan zona kengligi, sirt va hajmiy energetik holatlar zichligi bo'lib, ularning energetik kengliklari yarimo'tkazgich asosidagi qurilmalarning ekspluzion parametrlarini oldindan bashorat qilish imkonini beradi. Shu jixatdan, kichik o'lchamli yarimo'tkazgichlarning sirt va hajmiy energetik holatlar zichligi va ta'qiqlangan zona kengliklarini harorat, magnit maydon va deformatsiyalarga bog'liqligini tadqiq etish, ular yordamida boshqarish hamda tashqi ta'sirlarga bardoshlilikini oshirish muammolarini hal etish muhim ahamiyat kasb etadi.

Adabiyotlar tahlili

Hozirgi kunda, mikro va nanoelektronikaning asosiy kinetik va dinamik parametrlarini tashqi omillarga bog'liqligini aniqlashda statistik fizikani tadbiq etish muhim ahamiyat kasb etadi. Ayniqsa, kvant o'lchamli yarimo'tkazgichli materiallarning energetik spektrlariga harorat va magnit maydon ta'sirini hisoblashda, nazariy fizikaning asosiy umumlashgan funksiyalardan biri delta-funksiyani qo'llash zaruriyati kelib chiqadi. Sababi, kvant o'raning ruxsat etilgan zonalardagi o'lchamli kvant sathlar-diskret sathlar bo'lib, bu esa ularning kinetik, dinamik va issiqlik xossalarini hisoblashda, diskret delta-funksiyalarga muxtojligidan dalolat beradi. Ma'lumki, matematik nuqtai nazardan delta-funksiyaning umumiy ko'rinishi quyidagicha bo'ladi [1-6].

$$\delta_t(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{x^2}{t}} \quad (1)$$

(1) ni ixtiyoriy amaliy dasturlash paketi orqali $t > 0$ shart bilan quyidagicha aniqlash mumkin:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta_t(x) dx = 1 \quad (2)$$

(2) dan ko‘rinib turibdiki, agar $t \rightarrow 0$ ga intilsa, $\delta_t(x)$ funksiya o‘z xususiyatlarini yo‘qotadi, ya’ni $x=0$ da $\delta(x)$ funksiya ∞ (cheksizlikka) intiladi.

Ushbu (1) va (2) delta-funksiyalarning kvant statistikasida turlicha tadbiq qilingan. Turli haroratlarda statistik taqsimot funksiyalarini energiyaga bog‘liqligini ko‘rib chiqaylik. Fermi-Dirak taqsimot funksiyasidan energiya bo‘yicha hosilasi $\frac{df_0}{dE}$, Gauss va Lorens delta-funksiyalarining haroratga bog‘liqligi quyidagicha:

$$\begin{aligned} Gauss(E, T) &= \frac{1}{kT} \exp \left(- \frac{(E - E_i)^2}{(kT)^2} \right) \\ Lorentz(E, T) &= \frac{1}{1 + \frac{(E - E_i)^2}{(kT)^2}} \\ \frac{\partial f_0(E, \mu, T)}{\partial E} &= - \frac{1}{kT} \frac{\exp((E - \mu) / kT)}{[1 + \exp((E - \mu) / kT)]^2} \end{aligned} \quad (3)$$

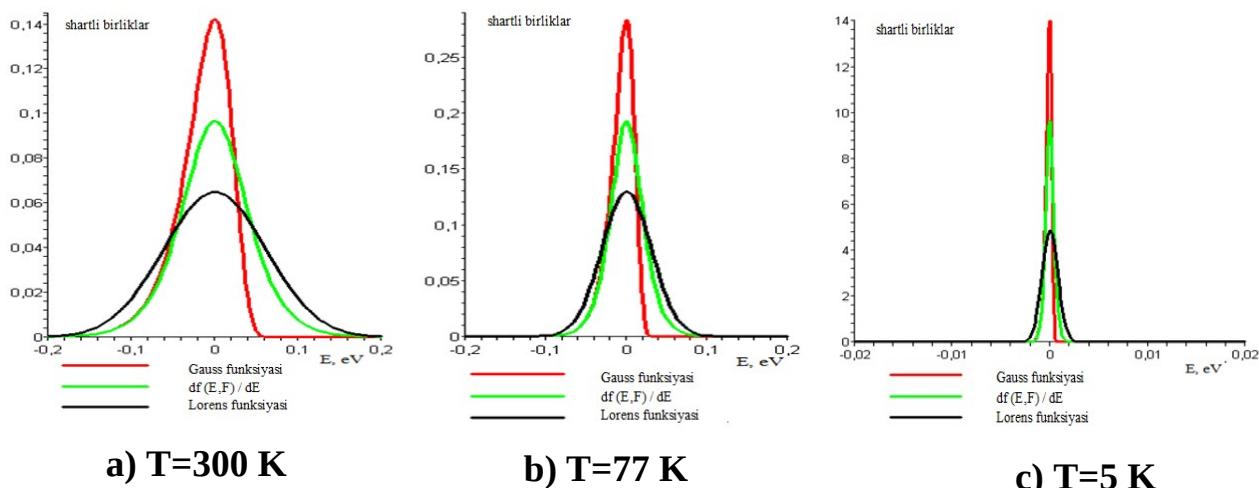
(3) dan foydalanib, ularning harorat dinamikasi bo‘yicha o‘zgarishini ko‘raylik.

1-rasmda (a, b, c) $T_1=300K$, $T_2=77K$, va $T_3=5K$ haroratlar uchun (3) da keltirilgan delta-funksiyalarning grafiklari solishtirilgan. Ushbu grafiklardan ko‘rinib turibdiki, Gauss taqsimot funksiyasining (delta-funksiya) “cho‘qqi”si Lorens va $\frac{df_0}{dE}$ ga nisbatan yuqori ekanligi aniqlangan.

Bu muhim natija, kelgusida kvant o‘lchamli materiallarga delta-funksiyalarni tadbiq etishda, Gauss taqsimot funksiyasidan foydalanishga asos bo‘la oladi.

Zamonaviy elektronikaning nano o‘lchamli elementlar yo‘nalishi bo‘yicha rivojlanishi yarimo‘tkazgichli strukturalarning sirtga yaqin qatlami holatining

imkoniyatlarini oshiradi. Tashqi omillar ta'sirida ajratish chegaralarida yuzaga keladigan beqaror jarayonlar ushbu elementlarning ishlash parametrlarini aniqlaydi. Xususan, kremniy sirtiy to'siq strukturalari bugungi kunda ham bunday tadqiqotlarning dolzarb mavzusi bo'lib qolmoqda [7-9].



1-rasm. Fermi-Dirak taqsimot funksiyasidan energiya bo'yicha hosilasi $\frac{df_0}{dE}$, Gauss va Lorens delta-funksiyalarining haroratga bog'liqligi.

Imliy adabiyotlardan ma'lumki, kuchli magnit maydon ta'siridagi tor zonali kvant o'raning ruxsat etilgan zonalaridagi zaryad tashuvchilarning energiyasini o'zgarishi ikki o'lchamli energetik holatlar zichligi $N_s^{2d}(E)$ ga kuchli ta'sir qiladi. Bu esa, kvant o'radagi elektron va kovaklarning diskret sathlarda joylashuvi va tok tashuvchilarning taqsimoti bo'yicha yetarlicha ma'lumot olishga imkon beradi.

Lekin, shu kungacha, mavjud adabiyotlarda tor zonali kvant o'raning energetik holatlar zichligini magnit maydon va haroratga bog'liqligi yetarlicha o'rganilmagan. Tor zonali kvant o'raning elektronlari va kovaklari energiyasi kvadratik bo'lmagan dispersiya qonuniga bo'ysunadi.

Kvadratik dispersiya qonuni uchun [10] 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 [11]:

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

Bu modelni yaratishda, energrtik holatlar zichligini delta funksiyalar $\delta(x)$ ni energiya bo'yicha qatorga yoyish usulidan foydalanilgan [12,13]. Mutloq nol xaroratda ($T \rightarrow 0$), Lorens, Gauss, Fermi-Diraktdan energiya bo'yicha olingan

hosila $\left(\frac{\partial f_0}{\partial E} \right)$ va GN [3] funksiyalar $\delta(E)$ shakliga keladi. [11] ishlarning mualliflari $N_s^{k,2d}(E, B, T)$ aniqlashda, asosan Gauss (E,T) delta-funksiyanini tadbiq etilgan. Bunda, taklif etalayotgan modelni asosan keng zonali (yoki klassik) kvant o'rali geterostrukturalar uchun qo'llanilgan. Bundan tashqari, olingan $N_s^{k,2d}(E, B, T)$ model keng zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlarga ta'lluqli bo'lgan.

Tahlil va natijalar

Tor zonali kvant o'raning valentlik zona shipidagi yengil kovak energiyasini magnit maydonga bog'liqligi quyidagi ifoda orqali ifodalanadi:

$$E_v^{2d, nonparab}(E_g(B, d), B, d, n_z, N_L^p) = - \frac{\left(E_g(0) + \frac{1}{2} \hbar\omega_c^p + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2 \right)}{2} * \left\{ 1 + \left[1 + 4 \frac{\left(N_L^p + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^p + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2}{\left(E_g(0) + \frac{1}{2} \hbar\omega_c^p + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2 \right)^2} \right]^{1/2} \right\} \quad (5)$$

Tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlarning energiyasini magnit maydonga bog'liqligi quyidagi ifoda orqali ifodalanadi:

$$E_n^{2d, nonparab}(E_g(B, d), B, d, n_z, N_L^e) = - \frac{E_g(B, d)}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(E_g(B, d))^2 + 4E_g(B, d) \left[\left(N_L^e + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^e + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2 \right]} \quad (6)$$

(5) va (6) bog‘lanishlardan foydalanib, $N_{s,c}^{2d,nk}(E_c^{nk,2d}, B, T, d)$ va $N_{s,v}^{2d,nk}(E_v^{nk,2d}, B, T, d)$ larni ko‘rib chiqaylik.

Bitta haqiqiy argumentning $\delta(x)$ funksiyasi quyidagi shartlar bajarilganda o‘rinli bo‘ladi:

$$\delta(x) = \begin{cases} -\infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$$

[14] ishida, ikki o‘lchamli materiallar uchun holatlar zichligini energiyaga bog‘liqligini delta-funksiyalar yig‘indisidan iborat ekanligi keltirilgan:

$$N_s^{2d}(E, B) = \frac{eB}{\pi \hbar} \sum_{N_L, N_Z} \delta(E - E(N_L, n_Z)) \quad (8)$$

Ushbu (8) ifoda umumlashgan formula bo‘lib, shu kunga qadar barcha (klassik, keng va tor zonali) kvant o‘lchamli yarimo‘tkazgichlar uchun qo‘llanilib kelingan.

Yuqorida keltirilganidek, $T \rightarrow 0$ sharti bajarilganda, Gauss funksiyasi $Gauss(E, T)$ $\delta(E, T)$ ga o‘tadi. Ya’ni:

$$\lim_{T \rightarrow 0} Gauss(E, T) \rightarrow \delta(E, T), \quad Gauss(E, T) = \frac{1}{kT} \exp \left(- \frac{(E - E_i)}{(kT)^2} \right) \quad (9)$$

(9) da keltirilgan E_i energiya, tor zonali kvant o‘raning valentlik zona shipi yoki o‘tkazuvchanlik zona tubiga to‘g‘ri keladi. Lekin (9) ifoda magnit maydonga bog‘liq emas, (8) ifodaga esa, haroratning ta’siri o‘rganilmagan.

(8) ifodadagi $E(N_L, n_Z)$ ning ma’nosi- kvant o‘raning ruxsat etilgan zonalaridagi zaryad tashuvchilarining diskret energetik sathlari hisoblanadi, ya’ni (5) va (6) larga to‘g‘ri keladi. Umuman olganda, (8) da kvantlovhi magnit maydon hisobiga $\delta(E - E(N_L, n_Z))$ delta funksiyaga to‘g‘ri kelsa, (9) ifodada esa, $T \rightarrow 0$ sharti bajarilishi $\delta(E, T)$ xad $\delta(x)$ ga aylanmoqda.

(6) ifoda tor zonali kvant o‘raning o‘tkazuvchanlik zonasi tubidagi erkin elektronlar energiyasini magnit maydonga, kvant o‘ra qalinligiga va kvant sathlar

soniga bog'liqligi keltirilgan ($E_{nc}^{2d}(B, d, N_L, n_z)$). Bu noparabolik dispersiya qonuni uchun o'rinli. U holda, (8) da $N_S^{2d}(E, B)$ ni $E(E_L, n_z)$ ga bog'liqligi va (4) da $\left(\left(N_L + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2 \right)$ had o'rniga (6) dagi $-\frac{E_g(B, d)}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(E_g(B, d))^2 + 4E_g(B, d) \left[\left(N_L + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n_z^2 \right]}$ ni almashtirishlar

hisobga olinsa, quyidagi ifoda kelib chiqadi:

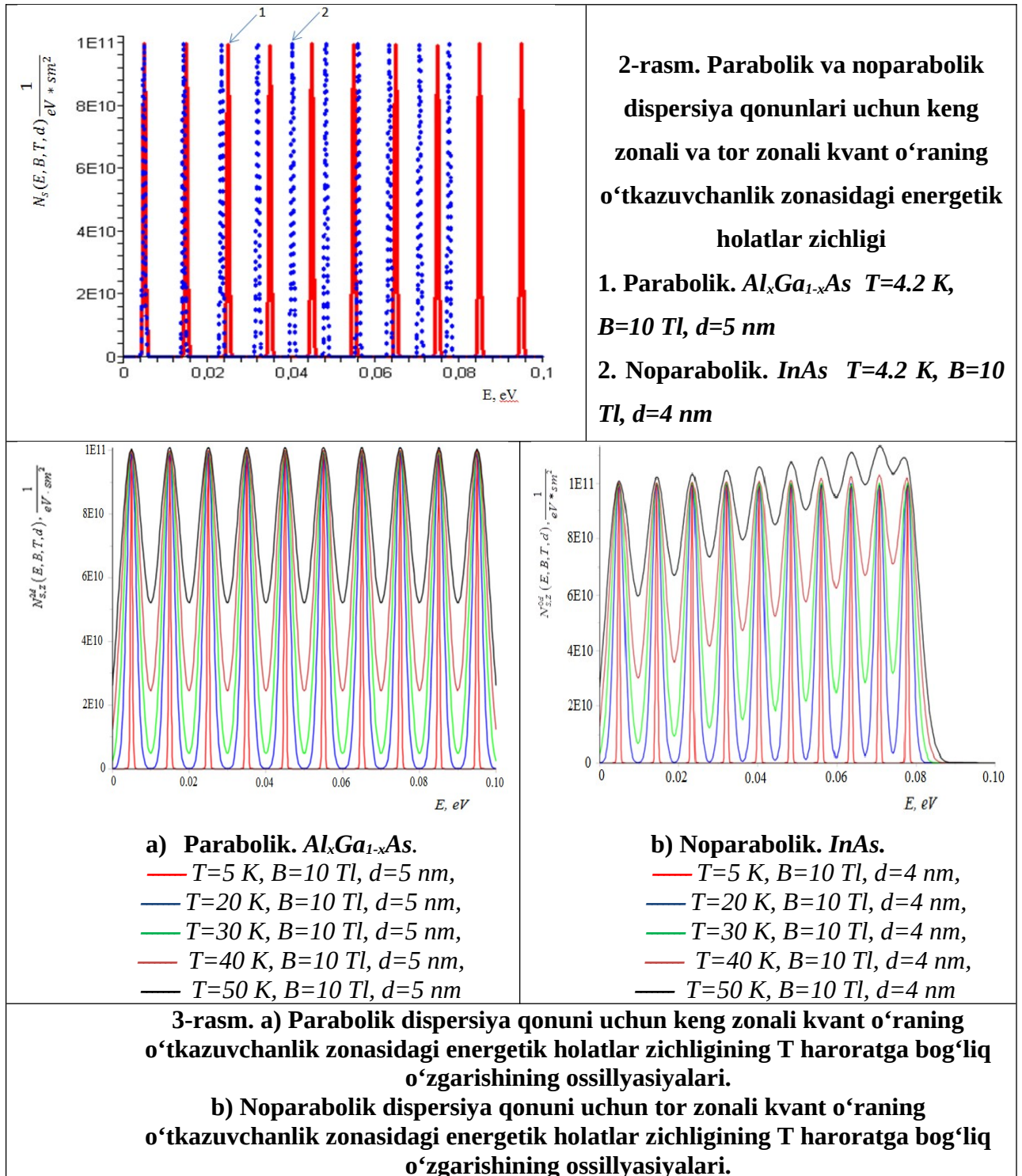
$$N_{s,z}^{c,2d}(E, B, T, d) = \sum_{N_L, n_z} \frac{eB}{\pi \hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \exp \left[- \frac{\left(E + \frac{E_g(B, d)}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(E_g(B, d))^2 + 4E_g(B, d) \left(\left(N_L + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2 \right)} \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (10)$$

Bu ifoda tor zonali kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi energetik holatlar zichligini aniqlash formulasini anglatadi. 2-rasmda parabolik (keng zonali kvant o'ra) va noparabolik (tor zonali kvant o'ra) uchun ikki o'lchamli energetik holatlar zichligini o'zgarmas $T = \text{const}$ da magnit maydonga bog'liqligi solishtirilgan. Ushbu rasmdan ko'rinib turibdiki, tor zonali kvant o'radagi erkin elektronlar effektiv massasini energiyaga bog'liqligi tufayli, diskret Landau sathlarini bir hil energiya intervalida "qisilishi" (deformatsiyalanishi) kuzatilmoqda.

Bunda, tor zonali InAs [15] kvant o'raning va keng zonali GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs (kvant o'ra Al_xGa_{1-x}As) [16] grafiklari keltirilgan. Harorat $T = 1.5$ K, $B = 3$ Tl, $d = 5$ nm (Al_xGa_{1-x}As) va $d = 4$ nm (InAs) larda ossillyasiyalari hisoblangan.

3-rasmda Al_xGa_{1-x}As va InAs kvant o'rali yarimo'tkazgichlarning o'tkazuvchanlik zonasidagi ikki o'lchamli energetik holatlar zichligi ossillyasiyalarini haroratga bog'liqligi keltirilgan. Bunda, Al_xGa_{1-x}As kvant o'ra parabolik dispersiya qonuniga, InAs esa noparabolik dispersiya qonuniga bo'ysunadi. Statistik Gauss funksiyasini ushbu materiallarga tadbiqidan ko'rinib turibdiki, harorat ko'tarilgan sari diskret Landau sathining "yuvilishiga" olib kelmoqda. Lekin, 3-rasmdagi a) va b) grafiklarni solishtirgandan ma'lum bo'ldiki,

InAs kvant o'raning ossillyasiyalari ertaroq uzluksiz spektrga aylanishi kuzatilmoqda.



Xulosa

Ushbu ishda tor zonali kvant o'raning ruxsat etilgan zonalaridagi ikki o'lchovli energetik holatlar zichligining harorat va magnit maydonga bog'liqligi nazariy jihatdan tahlil qilindi. Tadqiqotda Gauss delta-funksiyasining haroratga

bog'liqligidan foydalanilib, kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlarda energetik sathlarning o'zgarish qonuniyatlari aniqlangan. Noparabolik (tor zonali) va parabolik (keng zonali) dispersiya qonunlari uchun energetik holatlar zichligining magnit maydon va harorat ta'siridagi ossillyasiyalari solishtirildi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Schoenberg D. Magnetic oscillations in metals. // New York, Wiley. 1986. pp.350-400.
2. Miura N. Physics of Semiconductors in High Magnetic Fields. // Oxford University Press. 2007 y. Chapter 8, pp.374.
3. Фихтенгольц, Г. М. Основы математического анализа: учеб. для вузов // СПб.: Лань, 2001. - (Учебники для вузов. Специальная литература). Кн. 2. 461- 464 с - ISBN 5-8114-0191-4.
4. Гулямов Г., Эркабоев У.И., Шарибаев Н.Ю., Шахобиддинов Б.Б. Квантовые осцилляционные явления в полупроводниках.// Монография. «Навруз». Ташкент. 2018 г. 161 С. ISBN 978994338-1-63-6.
5. Gulyamov G., Erkaboev U.I., Gulyamov A.G. Influence of temperature on the oscillations of longitudinal magnetoresistance in semiconductors with a nonparabolic dispersion law // Indian journal of physics, 2019, Vol.93, Iss.5, pp.639-645 (№3, Scopus, IF=1.05;
6. Gulyamov G., Erkaboev U.I., Gulyamov A.G. Shubnikov–de Haas oscillations in semiconductors at the microwave-radiation absorption // Advances in condensed matter physics. 2019, Vol.2019. Article ID 3084631, pp.1-5. <https://www.scopus.com/sourceid/18300156712>.
7. Слободзян Д.П., Павлик Б.В., Кушлик М.О. Особливості впливу Х-випромінювання та магнітного поля на електрофізичні характеристики бар'єрних структур на основі дислокаційного *p*-Si, призначеного для сонячної енергетики // Journal of Nano-and Elektronik Physics. 2015. Vol. 7 No.4, pp. 040511-1-040511-6.
8. Koman B.P. Temperature Selectivity of the Radiation Effect on Silicon

MOS Transistors // [Semiconductors. 2014. Vol.48, No5, pp. 659- 665.](#)

9. Puzanov A.S., Obolenskii S.V., Kozlov V.A. Transport of Charge Carriers through the Thin Base of a Heterobipolar Transistor Under the Impact of Radiation. // [Semiconductors. 2015. Vol.49, No.1, pp. 69-74.](#)
10. 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. ([Scopus: CiteScore: 2.1. https://www.scopus.com/sourceid/11300153732](#))
11. Gulyamov, G., & Abdulazizov, B. T. (2016). On the thermodynamics of a two-dimensional electron gas with non-parabolic dispersion. World Journal of Condensed Matter Physics, 6(4), 294-299.
12. 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.
13. Абдулазизов, Б. Т., Тохиржонов, М. С., & Байматов, П. Ж. (2016). О статистике электронов в квантовой яме InAs/AlSb. Архивариус, (3 (7)), 6-9.
14. 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.
15. Joseph Y., Mehdi H., Brenden A. M., William M., Matthieu C.D., Kasra S., Kaushini S.W., Giti A.K., Yasuhiro H.M., Yoshimitsu K., Zhuo Y., Sunil T., Christopher J.S., Javad S. Experimental measurements of effective mass in near-surface InAs quantum wells // Physical review B. 2020. Vol.101, pp.205310- 205317.
16. Hou-zhi Zheng, Aimin Song, Fu-hua Yang, and Yue-xia Li. Density of states of the two-dimensional electron gas studied by magneto capacitances of biased double – barrier structures // Physical review B. 1994. Vol. 49, No.3, pp.1802-1808.

