

Negmatov Ulug'bek Mirzabahrom o'g'li
Namangan Davlat texnika universiteti, katta o'qituvchi
tel.: 97-370-35-74, e-mail: unegmatov@gmail.com

UO'K 621.315.592; 537.311.322

O'ZGARUVCHAN DINAMIK MAGNIT MAYDONDAGI KVANT

O'RANING LANDAU SATHLARINI VAQTGA BOG'LIQLIGI

Annotatsiya: Ushbu ishda tibbiyotda, texnikada, avtomatikada va mikro va nanoelektronika sohalarida ularning asosiy murakkab tizimlarining dinamik, statik va kinetik jarayonlarni o'rganish, oldindan bashorat qilish va hamda o'zaro ta'sirlarni abstrakt qilishga qodir matematik modellarga bo'lgan ehtiyoji dolzarb masalalardan biri bo'lib kelmoqda. Ayniqsa, differensial tenglamalar asosida qurilgan dinamik jarayonlarni aks ettiruvchi, modellar – biologik, texnik va elektronik mexanizmlarini aniq namoyon etish uchun xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: dinamik va statik magnit maydonlar, fazalar portretlari, bioobyekt, de Gaaz-van Alfen ossillyatsiyalari, deformatsion qarshilik, ossillyatsiya, tenzoqarshilik effekti, yarimo'tkazgichlar.

Негматов Улугбек Мирзобахром угли
Наманганский Государственный технический университет, старший
преподаватель
тел.: 97-370-35-74, e-mail: unegmatov@gmail.com

ЗАВИСИМОСТЬ УРОВНЕЙ ЛАНДАУ КВАНТОВОЙ ЯМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ВРЕМЕНИ

Аннотация: В данной работе рассматривается актуальная проблема необходимости построения математических моделей, способных изучать, предсказывать и абстрагировать взаимодействия динамических, статических и кинетических процессов в основных сложных системах, таких как медицина, техника, автоматизация и микро- и нанoelektronika. Особенно важно применение моделей, построенных на основе дифференциальных уравнений, для отражения динамических процессов, которые служат для точного отображения биологических, технических и электронных механизмов.

Ключевые слова: динамические и статические магнитные поля, фазовые портреты, биологические объекты, осцилляции де Газа-ван Алфена, деформационное сопротивление, осцилляция, эффект тензорного сопротивления, полупроводники.

Negmatov Ulugbek Mirzabahrom ugli
Namangan State technical university, senior teacher
Phone: 97-370-35-74, e-mail: unegmatov@gmail.com

DEPENDENCE OF LANDAU LEVELS OF A QUANTUM WELL UNDER THE INFLUENCE OF AN ALTERNATING MAGNETIC FIELD ON TIME

Abstract: *This paper addresses the relevant issue of the need to develop mathematical models capable of studying, predicting, and abstracting the interactions of dynamic, static, and kinetic processes in major complex systems such as medicine, engineering, automation, and micro- and nanoelectronics. The application of models based on differential equations is especially important for reflecting dynamic processes that serve to accurately represent biological, technical, and electronic mechanisms.*

Keywords: *dynamic and static magnetic fields, phase portraits, biological objects, de Gaaz-van Alphen oscillations, deformation resistance, oscillation, tensor resistance effect, semiconductors.*

Kirish

Hozirgi kunda, tibbiyotda, texnikada, avtomatikada va mikro va nanoelektronika sohalarida ularning asosiy murakkab tizimlarining dinamik, statik va kinetik jarayonlarni o'rganish, oldindan bashorat qilish va hamda o'zaro ta'sirlarni abstrakt qilishga qodir matematik modellarga bo'lgan ehtiyoji dolzarb masalalardan biri bo'lib kelmoqda. Ayniqsa, differensial tenglamalar asosida qurilgan dinamik jarayonlarni aks ettiruvchi, modellar – biologik, texnik va elektronik mexanizmlarini aniq namoyon etish uchun xizmat qiladi. Matematik modellarning formulalar orqali, raqamli simulyatsiya qilish va boshqa matematik apparat yordamida qurish mumkin [1-3]. Biroq, mikro va nanoelektronika mexanizmlarini dinamik jarayonlarini vaqt o'tishi bilan simulyatsiya qilish va ushbu modellarning fizik interfeyslarini vizual tarzda tahlil qilish murakkab tizim hisoblanadi.

Adabiyotlar taxlili

Ma'lumki, hajmiy va kichik o'lchamli yarimo'tkazgichlarning elektrik, optik va magnit xossalarini o'rganishda energetik holatlar zichligi asosiy rol o'ynaydigan fundamental muhim parametr hisoblanadi. Jumladan, yarimo'tkazgichlar elektromexanikasida elektr o'tkazuvchanligi energetik sathlar va energetik holatlar zichligiga bog'liq bo'ladi. Bundan tashqari, kvant ossillyatsiya effektlarini mikro- va nanostrukturali yarimo'tkazgichlarga ta'sirini aniqlashda energetik holatlar zichligi funksiyasida foydalaniladi. Energetik holatlar zichligi mikro- va nanostrukturali materiallar haqidagi ham nazariy, ham amaliy jixatdan tahlillarni ko'rsatib beruvchi asosiy instrumentlardan biridir. U orqali materiallarni

xususiyatlarini aniqlash, tahlil qilish va modellashtirish jarayonlarini amalga oshiriladi [2-3].

Yarimo'tkazgichli strukturalarda zaryad tashuvchilarining ruxsat etilgan zonada energiya holatlari bo'yicha taqsimlanishi elektron yoki kavak energiyasi spektrlarining muhim xossalardan biri hisoblanadi.

Tadqiqot metodologiyasi

Ushbu energiya holatlari bo'yicha elektronlarning taqsimlanishida energetik holatlar zichligi $N_s(E)$ dan foydalaniladi. Demak, erkin elektronlar yoki kavaklarning energetik spektrini o'zgarishi energetik holatlar zichligiga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Jumladan, statik magnit maydon ta'sir etmaganda ($B=0$), kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi energetik holatlar zichligi quyidagi formuladan topiladi [4-5]:

$$N_s^{2d}(E) = \frac{m^{\frac{1}{2}}}{\pi \hbar^2} \quad (1)$$

(1)-formuladan ko'rinib turibdiki, ikki o'lchamli energetik holatlar zichligi energiyaga bog'liq emas. Lekin, aslida zaryad tashuvchilarning effektiv massasi energiya bo'yicha ham o'zgaradi. U xolda, kvadratik anizotropik dispersiya qonuni uchun, taqsimot funksiyasi ni ($\Theta(E)$) ham hisobga olinsa, ikki o'lchamli holatlar zichligi $B=0$ da:

$$N_s^{2d}(E) = \frac{\sqrt{m_x \cdot m_y}}{\pi \hbar^2} \Theta(E) \quad (2)$$

ga teng bo'ladi.

Bu yerda, $\Theta(E)$ – Xevisayd funksiya bo'lib, bu elektronlarni sathlardagi to'ldirish ehtimolligi vazifasini bajaradi.

Agar, kvant o'rali yarimo'tkazgichlarga statik kvantlovchi magnit maydon ta'sir etsa ($B \neq 0$), u xolda energetik holatlar zichligi qo'yidagi formula orqali aniqlanadi [6-7]:

$$N_s^{2d}(E, B) = \frac{eB}{\pi \hbar} \sum_{N_L=0}^{\infty} \delta[E - \hbar \omega_c (N_L + \frac{1}{2})] \quad (3)$$

Bu yerda: δ statik magnit maydon ta'siridagi delta funksiya bo'lib, ushbu funksiyalar yig'indisi ikki o'lchamli energetik holatlar zichligidan iborat ekanligini bildiradi. Agar, $B \rightarrow 0$ intilsa, (3) ifoda (2) ga o'tadi. Ammo, bu natijalar faqat statik jihatdan olingan bo'lib, dinamik jarayonlari umuman ko'rilmagan. Ya'ni, (3) formula $\frac{dE_n(B,t)}{dt}=0$ holatlar uchun o'rinli.

Agar, yuqoridagi ifodalarni hisobga olinsa va ularni (3) ga qo'yilsa, u holda $N_s^{2d}(E, B)$ qo'yidagi ko'rinishga keladi:

$$N_s^{2d}(E, B, t, N_L, d) = \frac{eB(t)}{\pi\hbar} \sum_{N_L} \delta \left(E - \left[\hbar \frac{eB(t)}{m} \left(N_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m d^2} n_z^2 \right] \right) \quad (4)$$

(4)-formula dinamik kuchsiz magnit maydon ta'siridagi kvant o'raning energetik holatlar zichligini vaqtga bog'liqligini anglatadi. Ushbu formuladan ko'rinib turibdiki, ikki o'lchamli energetik holatlar zichligi vaqt bo'yicha o'zgaruvchi delta-funksiyalar $\delta(E, B, t)$ yig'indisiga proporsional bo'lmoqda, ya'ni, $E = \left[\hbar \frac{eB(t)}{m} \left(N_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m d^2} n_z^2 \right]$ shart bajarilsa, $\delta(E, B, t)$ cheksizlikki intiladi.

Bundan kelib chiqadiki, matematik nuqtai nazardan olsak, $\delta(EB)$ ga vaqt (t) ni ta'siri ko'rilmogda. Biroq, bu jarayon fizik jihatdan yangi, chunki shu kungacha $\delta(EB)$ hisoblanganda kuchsiz dinamik magnit maydon ta'sir ettirish vaqti o'zgarmas ($t = \text{const}$ deb olingan).

Endi, (4) formuladagi qonuniyat bajariladigan va biror fizik parametr o'zgarishi hisobiga delta-funksiya hosil bo'ladigan mexanizmni ko'rib ko'rib chiqaylik.

[8-10] ishlarda statik magnit maydon ta'siridagi ikki o'lchamli energetik holatlar zichligini aniqlashning yangi metodi taklif qilingan. Bunda, kvant o'raning energetik holatlar zichligi Gauss cho'qqilarining yig'indisidan tashkil topganligi aniqlangan:

$$N_s^{2d}(E, B) = \frac{eB}{2\pi\hbar} \cdot \sum_{N_L} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\Gamma} \cdot \exp \left[-2 \cdot \left(\frac{E - \left[\hbar \frac{eB}{m} \left(N_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m d^2} \right]}{\Gamma} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Bu yerda, Γ – materialning kengayish parametri bo'lib, u o'zgaras bo'ladi. Kengayish parametri har bir material uchun alohida qiymatga ega bo'ladi. (5) formulaga nisbatan solishtirish qiyin emas. Ya'ni, (5) formuladagi $\exp\left[-2 \cdot \left(E - \left[\hbar \omega_c \left(N + \frac{1}{2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2\right]\right)\right]$ ifoda $\delta(E, B)$ delta-funksiyalarga ega bo'lib, asosiy Gauss cho'qqilarini (diskret Landau sathlari ushbu ifoda hosil qiladi. Bundan tashqari, (10) formula, spin ta'sirini hisobga olmagan holda keltirilgan. Sababi, ushbu tadqiqotning fazifasiga spinni energiyasini bog'liqligi kiritilmagan.

Agar, kvant o'raning energetik holatlar zichligiga o'zgaruvchan kuchsiz magnit maydon ta'sir etsa, u holda (3) va (4) ni (5) ga qo'yiladi va quyidagi ifoda kelib chiqadi"

$$N_s^{2d}(E, B, t, N_L, \omega, d) = \frac{e B_0 (1 + \sin \omega t)}{2 \pi c \hbar} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\Gamma} \cdot \sum_{N_L} \exp\left[-2 \cdot \left(E - \left[\hbar \frac{e B_0}{m^*} \left(N_L + \frac{1}{2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2\right]\right)\right] \quad (61)$$

Endi, (6) formula asosida kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichning energetik holatlar zichligini o'zgaruvchan dinamik kuchsiz magnit maydon va vaqtga bo'g'liqligini ko'rib chiqaylik.

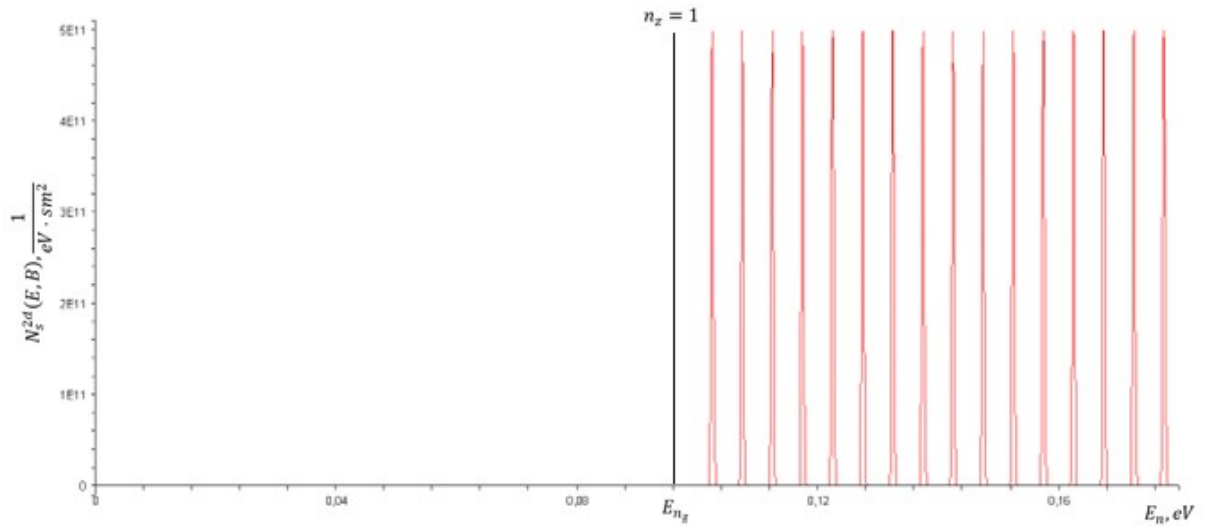
Tahlil va natijalar

[11] ishda CdTe va CdMnTe kvant o'rali yarimo'tkazgichning Shubnikov-de Gaaz ossilyatsiyalari $B=0 \div 0.3 \text{ Tl}$ uchun 10 mTl/min o'zgarish tezligida, $B=0.3 \div 1 \text{ Tl}$ uchun 15 mTl/min o'zgarish tezligida va $m_e=0.1 m_0, \Gamma=110 \text{ mkeV}, T=1160 \text{ mk}, d=20 \text{ nm}$ ga teng. 1-rasmda o'zgaras $B=0.3 \text{ Tl}, T=1.16 \text{ K}$ lar uchun CdTe kvant o'rali yarimo'tkazgichning $n_z=1$ dan keyingi diskret Landau sathlari keltirilgan. Ushbu grafik (5) formula bo'yicha olingan. Bunda, $B=\text{const}(B \neq 0)$ va ikki o'lchamli energetik holatlarning Landau sathlari barqaror (statsionar holatda). Bunda barcha Landau sathlarini ($N_L=1 \div 10$)

holatlari zichligi $N_s^{2d} = 5 \cdot 10^{11} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{sm}}$ ga tengligidan kuzatish mumkin. Umuman olganda, diskret Landau sathlarini cho'qqilari bir hil.

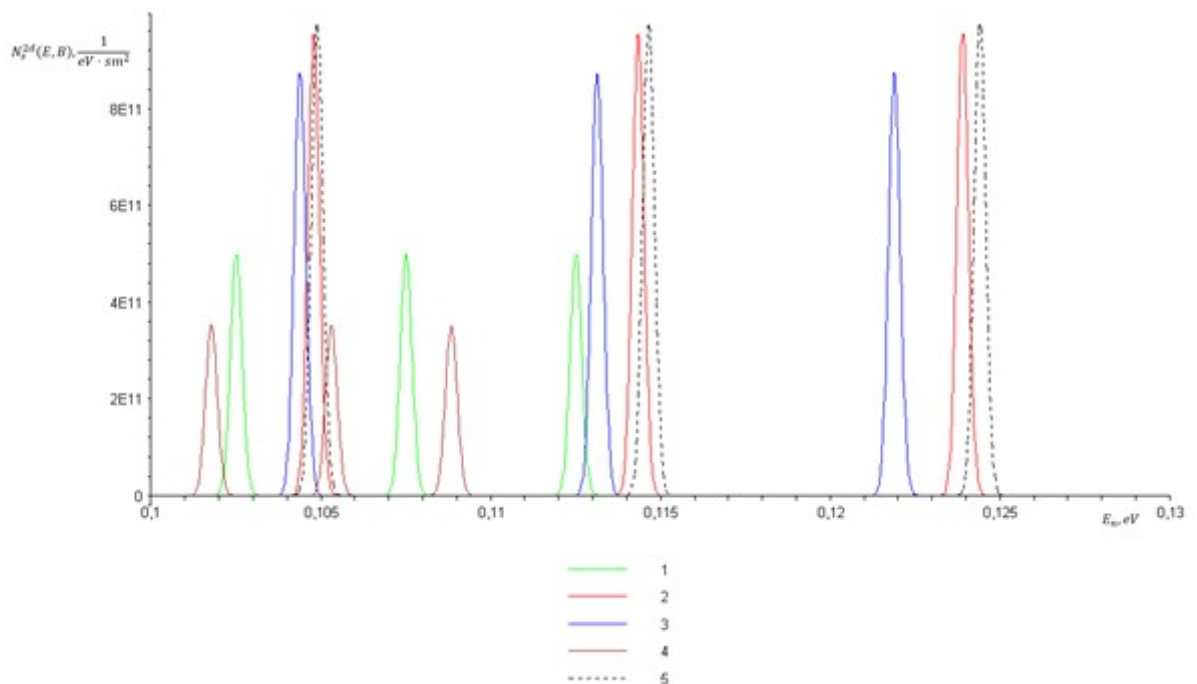
Endi o'zgaruvchan kuchsiz magnit maydon ta'sirini ko'rib chiqaylik. 2-rasmda CdTe kvant o'raning o'tkazuvchan zonasidan energetik holatlar zichligi vaqt bo'yicha o'zgaruvchi dinamik kuchsiz magnit maydon ta'siri keltirilgan. Bunda $N_s^{2d}(B, t, E, N_L, d)$ grafik (6) formula asosida ko'rilgan. $B_0 = 0.01 \text{ Tl}$ ga teng. Hozircha, faqat $N_2 = 1$ (birinchi diskret Landau sathi) uchun $N_s = (E, B, t, d)$ ni vaqt bo'yicha o'zgarishini ko'raylik. O'sib borish tartibida 5 xil vaqtni olaylik.

Ushbu rasmdagi "yashil" chiziq $t = 0$ da, $N_s^{2d} = 5 \cdot 10^{11} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{sm}^2}$ ga teng. $t = 4 \text{ ms}$ da $N_s^{2d} = 9.5 \cdot 10^{11} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{sm}^2}$ ga ("qizil" grafik), $t = 7 \text{ ms}$ da $N_s^{2d} = 8.5 \cdot 10^{11} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{sm}^2}$ ga ("ko'k" grafik), $t = 10 \text{ ms}$ da $N_s^{2d} = 3.8 \cdot 10^{11} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{sm}^2}$ ga ("jigarrang" grafik) hamda $t = 14 \text{ ms}$ esa $N_s^{2d} = 10^{12} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{sm}^2}$ ("qora" grafik) ga teng bo'lmoqda. Ushbu tahlildan ko'rinib turibdiki, $t = 0 \div 10 \text{ ms}$ vaqt oralig'ida CdTe kvant o'raning $N_s^{2d}(E, B, t, d)$ lari kamayib bormoqda, lekin $t = 14 \text{ ms}$ esa, $N_s^{2d}(E, B, t, d)$ maksimal cho'qqiga ega bo'lmoqda. Bundan tashqari, 2-rasmda $N_L = 2$ va $N_L = 3$ larda ham $N_s^{2d}(E, B, t, d)$ larni vaqt bo'yicha o'zgarishlari keltirilgan. Bu Landau sathidan ham yuqoridagi qonuniyat bajarilmoqda (6) formula bo'yicha $N_L = 1$ uchun $N_s(E, B, t)$ ni $t = 0 \div 0.1 \text{ s}$ intervalida o'zgarishini ko'rib chiqaylik. 3-rasmdan ko'rinib turibdiki $N_s^{2d}(E, B, t, d)$ vaqt bo'yicha garmonik ravishda o'zgarmoqda. Bunda $t = 0$ da $N_s^{2d} = 5 \cdot 10^{11} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{sm}^2}$ ga teng.



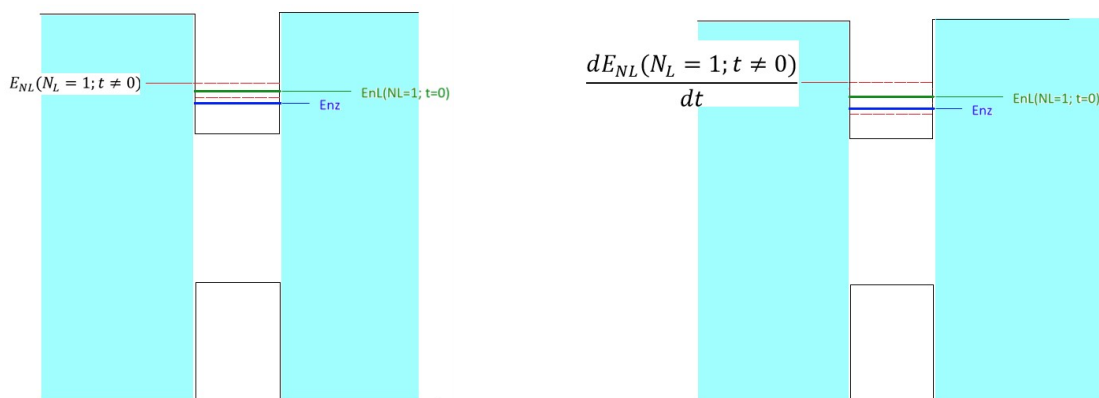
1-rasm. O'zgaras statik magnit maydondagi CdTe kvant o'rali yarimo'tkazgichning energetik holatlar zichligi ossilyatsiyalari

Bu esa, 1-rasmda keltirilgan qonuniyatni tasdiqlayapti. Agar vaqtni $t=0$ s dan $t=0.1$ s gacha o'zgartirilsa, $N_s^{2d}(E, B, t, d)$ ning qiymatining eng kichik qiymati $N_{smin}^{2d} = 2.8 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2}$ dan maksimal $N_{smax}^{2d} = 1 \cdot 10^{12} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2}$ gacha o'zgarishi kuzatilyapti. $B=0, t=0$ holatda CdTe kvant o'raning o'zkazuvchanlik zonasidan energik kontur zichligi ($n_z=1$) $N_s^{2d}(n_z, d) = \frac{e \cdot m^i}{\pi \cdot \hbar} \approx 2 \cdot 10^{11} \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2}$ ga teng.



2-rasm. Diskret Landau sathlarining vaqt bo'yicha o'zgarish dinamikasi.

Bu yerda 1) $t=0\text{ ms}$; 2) $t=4\text{ ms}$; 3) $t=7\text{ ms}$; 4) $t=10\text{ ms}$; 5) $t=14\text{ ms}$;



3-rasm. $N_s^{2d}(E, B, t, d)$ vaqt bo'yicha garmonik ravishda o'zgar

U holda, $N_L=1$ sathidan holatlar zichligi ma'lum vaqtlarda o'lchamli kvantlanish energiyasiga to'g'ri kelgan holatlar zichligiga yaqinroq bo'lyapti. Bu esa, juda qisqa vaqt oralig'ida, birinchi diskret Landau sathida o'lchamli kvantlanish sathiga teng va undan biroz kichikroq bo'lishiga olib kelmoqda.

Xulosa

Ushbu maqoladan xulosa qiladigan bo'lsak, kuchsiz magnit maydon ta'sirida nanostrukturali yarimo'tkazgich tizimlaridagi energetik holatlar zichligining fazaviy portreti chuqur o'rganildi. Ularning fizik xossalarini chuqur tushunish esa ushbu tizimlarning samaradorligini oshirish va yangi avlod qurilmalarini loyihalashda muhim ahamiyat kasb etadi. Maqolada yarimo'tkazgich zarralarining magnit maydon ostida harakati nazariy modellashtirildi va ularning kvant holatlari taqsimoti maxsus hisoblash usullari yordamida tahlil qilindi. Shu bilan birga, magnit maydon zarraning impuls fazosidagi harakatiga qanday ta'sir ko'rsatishi, energetik darajalar oralig'ida qanday o'zgarishlar yuz berishi aniqlashtirildi. Kuchsiz magnit maydon mavjudligida zarralarning fazaviy portretlarida xos

rezonansli strukturaviy o'zgarishlar, energiya spektrining chiziqlanishi va zichlikning o'ziga xos maksimumlari paydo bo'lishi kuzatildi. Ayniqsa, fazaviy portretlar yordamida ushbu holatlar vizual va matematik usullar orqali tahlil qilinishi, sistemaning kvant xossalarini chuqurroq tushunishga xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Zihao Qin, Xuejun Zheng, Chenbo Li, Zhichao Fan, Bing Wang, Jian Luo, Qiang Liu, Bo Hong, Xiangwen Li. Penetration state recognition for tungsten inert gas welding via an alternating cusp-shaped magnetic field-assisted molten pool-oscillation // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol.32, pp. 273-285.
2. G.Gulyamov, U.I. Erkaboev, N.Yu. Sharibaev. Effect of temperature on the thermodynamic density of states in a quantizing magnetic field // Semiconductors. 2014, vol. 48, No.10, pp. 1323-1328.
3. G.Gulyamov, U.I. Erkaboev, N.Yu. Sharibaev. The de Haas-van Alphen effect at high temperatures and in low magnetic fields in semiconductors // Modern physics letters B. 2016, Vol. 30, No.7. pp. 1650077-1-1650077-7.
4. G.Gulyamov, U.I. Erkaboev, P.J. Baymatov. Determination of the density of energy states in a quantizing magnetic field for model Kane // Advances in condensed matter physics. 2016. Vol.2016. pp. 5434717-1-5434717-5.
5. Н.Б.Брандт, В.А.Кулбачинский. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. Москва, Физматлит. 2007. 632 С.
6. S.Glutsch, F.Bechstedt, Doan Nhat Quang. Density of states of a two-dimensional electron gas in a perpendicular magnetic field and a random field of arbitrary correlation // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. Vol.15, pp.1305–1323.
7. 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

8. 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>
9. 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
10. W. Zawadzki, A.Raymond, M.Kubisa. Reservoir model for two-dimensional electron gases in quantizing magnetic fields: A review // Phys. Status Solidi B. 2014. Vol.251, No. 2, pp. 247–262.
11. W. Zawadzki, M.Kubisa. in: High Magnetic Fields in Semiconductor Physics III, edited by G. Landwehr (SpringerVerlag, Berlin, 1992), p. 187.
12. J. Kunc, B.A. Piot, D.K. Maude, M.Potemski, R.Grill, C.Betthausen, D.Weiss, V.Kolkovsky, G.Karczewski, T.Wojtowicz. Magnetoresistance quantum oscillations in a magnetic two-dimensional electron gas // Physical review b. 2015. Vol.92, pp.085304-1-085304-8.