



UDK: 538.955; 621.3.082.782

Ulug'bek NEGMATOV,
Namangan muhandislik-texnologiya instituti tayanch doktoranti
Ulug'bek ERKABOYEV,
Namangan muhandislik-texnologiya instituti professori, f.-m.f.d.
Nozimjon SAYIDOV,
Namangan muhandislik-texnologiya instituti katta o'qituvchisi, PhD
Jasurbek MIRZAYEV,
Namangan muhandislik-texnologiya instituti katta o'qituvchisi, PhD
E-mail: u.negmatov@gmail.com

NamMTI professori f.-m.f.d. N.Sharibayev taqrizi asosida

O'ZGARUVCHAN KUCHSIZ MAGNIT MAYDONDA KVANT O'RANING RUXSAT ETILGAN ZONASIDAGI ELEKTRONLARNING ENERGETIK SPEKTRINI O'ZGARISHI

Аннотация

Ushbu maqolada nanostrukturali yarimo'tkazgichning kuchsiz dinamik magnit maydonlar ta'siridagi energetik holatlar zichligi ossillyatsiyalarini fazaviy portretlarini ifodalab beruvchi yangi matematik model ishlab chiqilgan.

Kalit so'zlar: Nanostruktura, kvant o'ra, geterostruktura, magnit maydon, ossillyatsiya, fazaviy portret, effektiv massa.

ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ В РАЗРЕШЁННОЙ ЗОНЕ КВАНТОВОЙ ЯМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация

В данной статье разработана новая математическая модель, описывающая фазовые портреты осцилляций плотности энергетических состояний наноструктурного полупроводника под воздействием слабых динамических магнитных полей.

Ключевые слова: Наноструктура, квантовая яма, гетероструктура, магнитное поле, осцилляции, фазовый портрет, эффективная масса.

VARIATION OF THE ELECTRON ENERGY SPECTRUM IN THE ALLOWED BAND OF A QUANTUM WELL UNDER THE INFLUENCE OF A WEAK VARIABLE MAGNETIC FIELD

Annotation

This paper presents a new mathematical model describing the phase portraits of oscillations in the density of energy states of a nanostructured semiconductor under the influence of weak dynamic magnetic fields.

Key words: Nanostructure, quantum well, heterostructure, magnetic field, oscillations, phase portrait, effective mass.

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. 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.

Bunday dinamik tizimlarning umumiy fizik jarayonlarini aniq ko'rsatib beruvchi ideal vositalardan biri. Bu fazalar portretlaridir. Fazalar portreti dinamik tizimlarda trayektoriyalar gradienti yo'nalishi hamda tizimdagi muvozanat holatlarini yaqqol ko'rsatib beradi.

Adabiyotlar tahlili. Dinamik va statik magnit maydonlarini biologik va fizik jarayonlarining xossalari ta'sirini o'rganish muhim muammolardan biri hisoblanadi. Jumladan, [1] ishlarda o'zgaruvchi kuchsiz magnit maydoni ($B_0=25$ mTl) bioobyektlarning xarakteristikalariga ta'siri aniqlangan. [2] ishda esa, statik kuchsiz magnit maydonlari va yuqori haroratlardagi kvant ossillyatsiya effektlari kuzatilgan. Bunda, de Gaaz-van Alfen ossillyatsiyalari xona harorati atrofida va kuchsiz statik magnit maydon qiymatlari 25 mTl dan 100 mTl gacha orasida eksperimental olingan. Lekin, bu ishlar asosan o'zgarimas (statik) kuchsiz maydonlarda o'rganilgan bo'lib, magnit maydoning vaqt bo'yicha o'zgarishi umuman o'rganilmagan.

Bundan tashqari [3] ishlarda ikki o'lchamli yarimo'tkazgichli materiallarning energetik holatlar zichligini harorat va magnit maydonlarga bog'liqligining ham nazariy, ham tajribaviy natijalari olingan. Bunda, diskret energetik sathlar kvantlovchi magnit maydon (~ 10 Tl) va past haroratlar ($\sim 3\div 5$ K)da kuzatilgan. Ya'ni, [4] ishlardagi taklif etilgan model diskret Landau sathlarini yuqori haroratlarda uluksiz energetik spektrlarga aylanishini ko'rsatib bergan. Lekin, bu ishlarda kuchsiz magnit maydon va yuqori haroratlar uchun energetik holatlar zichligini ham statik, ham dinamik magnit maydonlarida hisoblashning mukammal metodi ishlab chiqilmagan. Shu bilan birga, Ushbu ishlarda kuchsiz dinamik magnit maydonlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi natijasida ikki o'lchamli energetik holatlar zichligining fazaviy portretlarini ko'rishga imkoniyati ko'rib chiqilmagan.

Taxlil va natijalar. Ma'lumki, statik kvantlovchi magnit maydoning kvant o'rani ruxsat etilgan zonasiga ta'siri natijasida o'tkazuvchan va valent zonadagi zaryad tashuvchilarining energetik spektrlarini tubdan o'zgarishiga olib keladi. Bu esa, diskret Landau sathlarini hosil bo'lishidan dalolat buradi. Statik ko'ndalang kuchli magnit maydoni ($B \parallel Z$) kvant o'raga ta'siridan erkin elektronning energiyasi quyidagicha aniqlanadi:

$$E_n = \left(N_L + \frac{1}{2}\right) \pi \frac{eB}{m^*} + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2 \quad (1)$$

Bunda, N_L – diskret Landau sathlarining soni, B – statik kuchli magnit maydon induksiyasi, d – kvant o'ra qalinligi, m^* – erkin elektron effektiv massiasi, n_z – o'lchamli kvantlar soni. (1) ifodadan ko'rinib turibdiki, OXY tekisligida $(N_L + \frac{1}{2}) \hbar \frac{eB}{m^*}$ diskret energetik sathlar, OZ o'qida esa $\frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2$ o'lchamli kvant sathlar hosil bo'lmoqda. Bu esa, erkin elektronlarning har tomonlama kvanlanishiga olib kelmoqda. Xuddiki, elektron harakati kvant nuqta analogiyasi o'tmoqda. Bunday diskret energetik sathlar juda past haroratlarda namoyon bo'ladi. Sababi, $kT \ll \hbar \frac{eB}{m^*}$ sharti bajarishi kerak. Lekin, shunday nanostrukturasi yarimo'tkazgichlar borki, yuqori haroratlar va statik kuchsiz magnit maydonlarda ham diskret energetik sathlar hosil bo'ladi. Masalan, [5] ishlarda $CdB_xF_{2-x} / p - CdF_2 - QW / CdB_xF_{2-x}$ kabi kvant o'rali yarimo'tkazgichli materiallarda magnitosingdiruvchanlik va magnitoqarshilik ossillyatsiyalari $T = 280 K \div 340 K$ va $B = 25 mTl \div 100 mTl$ oraliqlarida kuzatilgan. Buni sababini quyidagicha tushuntirish mumkin: Tajribalardan ma'lum buladiki [6], $p - CdF_2$ kvant o'rali materiallari uchun erkin elektronini effektiv massasi $m^* \approx 10^{-4} m_0$ munosabatda topildi. Chunki, $p - CdF_2$ kvant o'raning zonasi juda ham kichik bo'lib, juda tor zona hisoblanadi. U holda $\hbar \frac{eB}{m^*}$ dan ko'rinib turibdiki, $\hbar \omega_c$ statik magnit maydon energiyasi (kT) kattaroq bo'lishi uchun, B-ni qiymati mTl atrofida o'zgarishi yetarli. Bundan kelib chiqadiki, ushbu kvant o'rali materiallar yuqori haroratlardan ham (hatto xona haroratidan yuqori), $\hbar \omega_c \gg kT$ sharti bajarilmoqda. Demak, kuchsiz statik magnit maydonlarda ham diskret Landau sathlari hosil bo'lmoqda. Xulosa qilib aytish mumkinki, kuchsiz statik magnit (mTl) maydonlarida ham kvant ossillyatsiya jarayonlari paydo bo'lar ekan.

Keling, endi kuchsiz dinamik magnit maydondagi kvant o'raning ruxsat etilgan zonasidagi erkin elektronlarni energetik spektrini o'zgarishini ko'rib chiqaylik. O'zgaruvchan magnit maydon induksiyasini vaqt bo'yicha o'zgarishini qo'yidagi sinusoidadan qonuniyatga asoslanib, taklif etaylik:

$$B = B_0(1 + \sin(\omega t)) \quad (2)$$

Bunda, B_0 – dinamik magnit maydon induksiyasining amplitudaviy qiymati, ω – o'zgaruvchan magnit maydonning siklik chastotasi, t – dinamik maydonning kvant o'raga ta'sir etish vaqti.

[6] ishlarda, tajribalar o'tkazish jarayonida o'zgaruvchan kuchsiz magnit maydonlarining chastotasini 10 Gs dan 1 000 Gs gacha, ta'sir ettirish vaqti esa 10^{-3} s dan 50 s gacha bo'lgan. U xolda, (2) ni (1) ga qo'yishimiz natijasida:

$$E_n(B, t, d, N_L, n_z) = \left(N_L + \frac{1}{2}\right) \hbar \frac{eB_0(1 + \sin(\omega t))}{m^*} + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2 \quad (3)$$

ega bo'lamiz.

(3) ifoda, kuchsiz dinamik magnit maydonlarning kvant o'radagi erkin elektronlarning diskret energetik sathlariga bog'liqligini anglatadi.

Dinamik magnit maydonda vaqt o'tishi bilan magnit maydon induksiyasi sinusoidal o'zgarishi (2) dan ma'lum bo'lmoqda. Bu esa, o'z navbatida (3) dan ham ko'rinib turibdiki, kvant o'raning ruxsat etilgan zonalaridagi diskret energetik sathlar vaqtga kuchli bog'liq bo'lmoqda, ya'ni $E_n(t)$ sinusoidal o'zgarimoqda. Endi, (3) dan, vaqt bo'yicha hosila olib, $\frac{dE_n}{dt}$ ni o'zgarish tezligini ko'rib chiqaylik. U holda, differensiyalash qoidasiga binoan, quyidagi keli chiqadi:

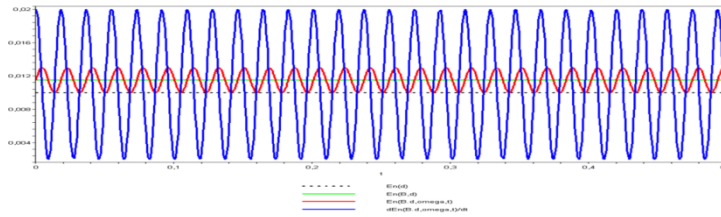
$$\frac{dE_n(\omega, t, N_L)}{dt} = \omega \cdot \left(N_L + \frac{1}{2}\right) \cdot \hbar \frac{e \cdot B_0 \cdot \cos(\omega t)}{m^*} \quad (4)$$

(4) ifodadan ko'rinib turibdiki, diskret energetik sathlarni o'zgarish tezligi $\frac{dE_n}{dt}$ dinamik magnit maydon induksiyasining amplitudaviy qiymatiga va Landau sathlari soniga bog'liq bo'lmoqda. Lekin, kvant o'raning qalinligi d va o'lchamli kvantlar soni n_z ning o'zgarish $\frac{dE_n}{dt}$ ga umuman ta'sir etmayapti. Buni fizik ma'nosi quyidagicha tushuntiriladi: $\frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z$ ($n_z = 1$) ning qiymati kuchsiz dinamik magnit maydon energiyasiga nisbatan ko'p marta kattaradi, ya'ni:

$$\frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z (n_z = 1) \gg \left(N_L + \frac{1}{2}\right) \hbar \frac{eB}{m^*} \quad (5)$$

(5) dan ko'rinib turibdiki kuchsiz dinamik magnit maydon hosil qilgan har bir diskret Landau sathlari kvant o'raning ($n_z=1$) birinchi o'lchamli sathiga nisbatan juda yaqin joylashgan bo'ladi. ($E_{n_z}(n_z = 1)$ ning shipida bo'ladi). Xulosa qilib, aytish mumkinki, faqatgina bizning hisobimiz uchun $n_z=1$ ni o'zi yetarli (ya'ni, $E_{n_z} = const$).

Keling endi sonli tahlillar olib boraylik. 1-rasmda 4 xil grafik keltirilgan. Qora rangdagi (nuqtali) chiziq vaqtga bog'liq bo'lmagan va magnit maydon $B=0$ dagi $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_z^2$ energiyaning grafigidir. Aytaylik, bir qator hisoblarga ko'ra, u $E_n = 0.0105 eV$ ga teng bo'lsin ($n_z = 1$). OY o'qi bo'yicha sanoq boshini «nol» deb olinsa, u holda OX o'qiga parallel chiziq o'raning o'tkazuvchanlik zonasini tubi hisoblanadi. Agar, $d \approx 5 nm$ bo'lsa, ushbu o'ra kvantlangan bo'lib, ushbu zona tubi 1-rasmdagi «qora» chiziqqa to'g'ri keladi. «Yashil» chiziq kvant o'raning OZ o'qiga parallel bo'lgan statik magnit maydon ta'siridagi $N_L = 1$ ga teng bo'lgan diskret Landau sathidir. Bu «yashil» chiziq (1) formula bo'yicha olingan grafik hisoblanadi. Albatta, statik kuchsiz magnit maydon vaqtga bog'liq emas, ya'ni, $B_0 = 5 mTl$ magnit maydon ta'sirida $E_n(B, d) = 0.011 eV$ (11 meV) o'zgarishga teng bo'lmoqda.



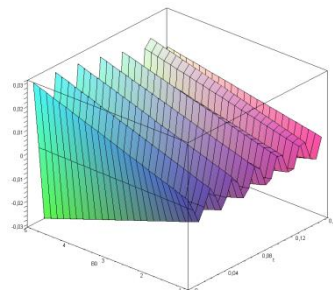
1-rasm. Dinamik kuchsiz magnit maydon ta'siridagi birinchi diskret Landau sathini vaqt bo'yicha o'zgarishi.

1-rasmdagi «qizil» rangda keltirilgan grafikni ko'rib chiqaylik. Ushbu grafik, (3) formula bo'yicha olingan bo'lib, unda dinamik kuchsiz magnit maydon ta'siridagi birinchi diskret Landau sathini vaqt bo'yicha o'zgarishi ko'rsatilgan ($E_n(B, t, d)$). Bunda, $\omega = 10 \text{ Gs}$ va vaqt davomiyligi $t = 0 \div 0.5 \text{ c}$ kabi tanlab olingan. Ushbu «qizil» rangdagi grafikdan ko'rinib turibdiki, vaqt o'tishi bilan $E_n(B, t, d)$ ni qiymati maksimal 0.0125 eV ga teng bo'lib, minimal 0.0105 eV gacha yetib bormoqda. Vaholanki, 0.0105 eV energiya $B=0$ dagi $E_n(d)$ ga to'g'ri keladi. Va nihoyat, 1-rasmdagi «ko'k» rangda keltirilgan grafikni ko'raylik. Ushbu grafik $\frac{dE_n(B,t)}{dt}$ ga tegishli bo'lib, u (4) formula bo'yicha ko'rilgan. $\frac{dE_n(B,t)}{dt}$ - funksiyani diskret Landau sathlarini vaqt bo'yicha o'zgarish tezligi deb nomlaymiz. Bu tezlik shunday o'zgaradiki, uning $\frac{dE_n}{dt}(\max) = 0.02 \text{ eV}$ gacha ($n_z = 1$ ga to'g'ri keluvchi $E_n(d)$ ga nisbatan 2 marta ko'p), $\frac{dE_n}{dt}(\min) = 0.001 \text{ eV}$ gacha (deyarli «kvantlanmagan» o'tkazuvchanlik zonasi tubiga yaqin) garmonik o'zgarimoqda.

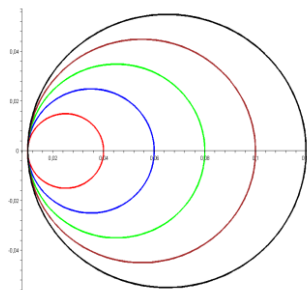
Demak, $\frac{dE_n(B,t)}{dt}$ o'zgarish tezligi kvant o'ra qalinligiga, o'lchamli kvantlar soniga bog'liq bo'lmasligi bilan bir qatorda, uning qiymati $E_{nz}(d, n_z)$ ga nisbatan 2 karra ortiq bo'lishi mumkin ekan. Yoki, aksincha, $\frac{dE_n(B,t)}{dt}$ ning qiymati shunday «minimum»ga erishadiki, bu qisqa vaqtda, erkin elektronlar o'zini 3D holatdagidek his qiladi.

2-rasmda $\frac{dE_n(B,t)}{dt}$ ni vaqtga va kuchsiz dinamik magnit maydon induksiyasining amplitudasiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Bunda, $B_0 = 1 \div 5 \text{ mTl}$ oraliq, va $t = 0 \div 0.16 \text{ c}$ ta'sir vaqti tanlab olingan. 2-rasmdan ko'rinib turibdiki, dinamik magnit maydon induksiyasining ta'sir qiymati ortishi bilan $\frac{dE_n}{dt}$ tezlik katta energiyalar intervalida kuchli o'zgarishi kuzatilmoqda.

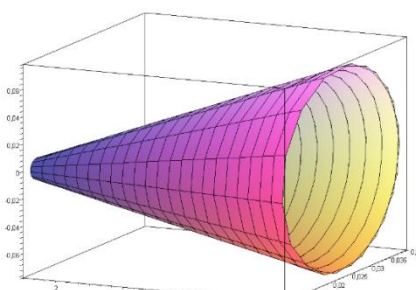
Kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlarga statik va dinamik kuchsiz magnit maydonlar ta'siri tahlilidan vaqt bo'yicha o'zgaruvchan fazaviy portretlar jarayonini o'rganish talab etiladi. Fazalar portreti qandaydir vaqtga bog'liq bo'lgani $f(t)$ va uning vaqt bo'yicha $\frac{df(t)}{dt}$ differensial bilan hosil qilingan 2D yoki 3D o'lchamli grafikka aytiladi. U holda (3) va (4) formulalar orasida ($E_n(B, t, d, N_L, n_z), \frac{dE_n(B,t,N_L)}{dt}$) koordinatalar nuqtasi bo'yicha fazalar portretini qurish mumkin. Albatta, bunda, kompyuterning amaliy matematik dasturlaridagi paketlardan (Maple) foydalaniladi. Dastur tuzishdan avval uni algoritmi ishlab chiqiladi. Albatta, (3) va (4) formulalardan ko'rinib turibdiki, magnit maydon induksiyasining amplitudaviy qiymati o'zgarimas (10 mTl), o'zgaruvchan kuchsiz magnit maydon chastotasining qiymati 12 Gs deb olinsa, ular faqat vaqtga bog'liq bo'lmoqda. Algoritmi murakkab emas, undan dasturi ham qiyinchilik tug'dirmaydi.



2-rasm. $\frac{dE_n(B,t)}{dt}$ ni vaqtga va kuchsiz dinamik magnit maydon induksiyasining amplitudasiga bog'liqligi



3- rasm. Kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlar energetik spektrini kuchsiz o'zgaruvchan magnit



4- rasm. Kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlar energetik spektrini kuchsiz o'zgaruvchan magnit

maydon ta'siridagi Landau sathlarining
fazaviy portreti

maydon ta'siridagi Landau sathlarining
3D fazaviy portreti

3-rasmda kvant o'raning o'tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlar energetik spektrini kuchsiz o'zgaruvchan magnit maydon ta'siridagi Landau sathlarining fazaviy portreti keltirilgan.

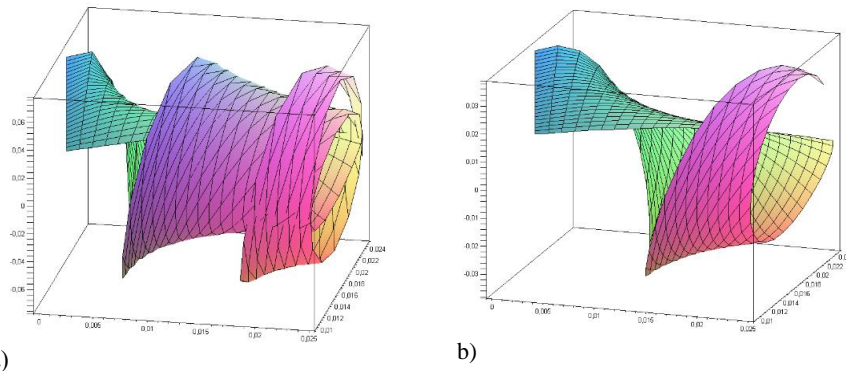
Ushbu fazalar portretidan ko'rinib turibdiki, Landau sathlari soni $N_L = 2$ da 0.06 eV, $N_L = 3$ da 0.08 eV, $N_L = 4$ da 0.1 eV hamda $N_L = 5$ da 0.12 eV ga teng bo'lmoqda. Vaqt oralig'i esa $t = 0 \div 0.1 c$ deb olingan. Umuman olganda, ushbu fazaviy portret barcha qonuniyatlarga bo'y sinmoqda. Sikl uzluksiz davom etmoqda. Ya'ni har bir fazaviy portret o'zaro bir xil $\hbar\omega_c$ dan farq qilmoqda.

3-rasmda dinamik magnit maydon induksiyasining amplitudaviy qiymati o'zgarimas $B_0 = 10$ mTl deb olingan. [5] ishlarda esa, statik kuchsiz magnit maydon induksiyasining qiymati 2 mTl dan 100 mTl gacha olib, tajribalar o'tkazilgan. U holda, $N_L = 1$ va $t = 0 \div 1 c$ intervallar uchun $(B_0, E_n(B, t), \frac{dE_n(B, t)}{dt})$ koordinatalar nuqtalari yordamida fazaviy portretni qo'rish imkoni topiladi (4-rasm).

4-rasmda fazaviy portretni 3D ko'rinishdagi grafigi keltirilgan. Ushbu uch o'lchamli demonstratsiyada, birinchi diskret Landau sathlarini turli dinamik kuchsiz magnit maydonlardagi fazaviy portretlarini o'zgarishini ko'rsatadi.

4-rasmdan ko'rinib turibdiki, $B_0 = 8$ mTl dagi $N_L = 1$ uchun Landau sathining fazaviy portretining shakli $B_0 = 2$ mTl dagiga nisbatan kattaroq, aniqroq va yaqqol ko'rinishda.

Endi dinamik kuchsiz magnit maydon chastotasini diskret Landau sathlariga ta'sirini ko'rib chiqaylik. 5a va 5b-rasmda $(t, E_n(B, t), \frac{dE_n(B, t)}{dt})$ bog'lanishlarning 2 hil siklik chastota $\omega_1 = 20$ Gs (5a-rasm) $\omega_2 = 8$ Gs larda fazaviy portretlari keltirilgan.



5-rasm. $(t, E_n(B, t), \frac{dE_n(B, t)}{dt})$ bog'lanishlarning siklik chastota $\omega_1 = 20$ Gs $\omega_2 = 8$ Gs lardagi fazaviy portretlari

Xulosa. Bunda dinamik kuchsiz magnit maydoning ta'sir etish vaqt davomiyligi bir xil bo'lib, $t = 0 \div 25$ ms oraliqda olingan.

5-rasmdan ko'rinib turibdiki, $t = 10$ ms dan keyin birinchi Landau sathining fazaviy portretni yopiq sikli boshlanmoqda. $t = 25$ ms da esa, ushbu sikl to'la yopiq bo'lib, fazaviy portret uzluksiz ravishda yaqqol kuzatilmoqda. 5b-rasmda esa, xattoki, $t = 25$ ms da ham Landau sathining fazaviy portretining sikli ochiq qolmoqda. Ya'ni bu vaqt oralig'ida umuman yopiq siklli portret yo'q. Lekin, dasturiy ta'minotlar shuni ko'rsatmoqdaki, agar vaqt davomiyligi ko'p karra (100, 1000 barobar) ortirilsa, xatto juda past chastotalarda ham Landau sathlarining fazaviy portretlarini qurish uchun dinamik kuchsiz magnit maydon chastotasini yuqoriroq olish tavsiya etiladi.

ADABIYOTLAR

1. Xin Zhang , Kevin Yarema , An Xu, Biological Effects of Static Magnetic Fields // Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2017
2. 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.
3. Gulyamov G., Sharibaev N.Yu. The Temperature Dependence of the Density of States in Semiconductors //World Journal of Condensed Matter Physics 2013, №3, p.216-220
4. Erkaboiev 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- 2150112
5. Баграев Н.Т., Брилинская Е.С., Гец Д.С., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Романов В.В. Осцилляции Шубникова-де Гааза ван Альфена в кремниевых наноструктурах // *ФТП*. 2011 Т.45, вып. 11.
6. Баграев Н.Т., Гимбицкая О.Н., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Шельх И.А., Рыскин А.И., Щеулин А.С. Квантовый эффект Холла в наноструктурах на основе фторида кадмия // *ФТП*. 2009 Т.43. вып.1.