

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI HUZURIDAGI
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

SAYIDOV NOZIMJON ABDULNOSIROVICH

**KUCHLI ELEKTROMAGNIT MAYDON TA'SIRIDAGI NANO O'LCHAMLI
YARIMO'TKAZGICHLARDA MAGNITOOPTIK YUTILISH
KOEFFITSIENTI VA MAGNITOQARSHILIK OSSILLYATSIYALARINING
HARORATGA BOG'LIQLIGINI MODELLASHTIRISH**

01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Namangan-2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Sayidov Nozimjon Abdulnosirovich

Kuchli elektromagnit maydon ta'siridagi nano o'lchamli yarimo'tkazgichlarda magnitooptik yutilish koeffitsienti va magnitoqarshilik ossillyatsiyalarining haroratga bog'liqligini modellashtirish..... 3

Сайидов Нозимжон Абдулносирович

Моделирование температурной зависимости коэффициента магнитооптического поглощения и осцилляции магнитосопротивления в наноразмерных полупроводниках под влиянием сильного электромагнитного поля..... 21

Sayidov Nozimjon Abdulnosirovich

Modeling the temperature dependence of the magneto-optical absorption coefficient and the magnetoresistance oscillations in nano-sized semiconductors under the influence of a strong electromagnetic field..... 39

E'lon qilingan ishlar ro'yhati

Список опубликованных работ

List of published works.....43

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI HUZURIDAGI
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

SAYIDOV NOZIMJON ABDULNOSIROVICH

**KUCHLI ELEKTROMAGNIT MAYDON TA'SIRIDAGI NANO O'LCHAMLI
YARIMO'TKAZGICHLARDA MAGNITOOPTIK YUTILISH
KOEFFITSIENTI VA MAGNITOQARSHILIK OSSILLYATSIYALARINING
HARORATGA BOG'LIQLIGINI MODELLASHTIRISH**

01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Namangan-2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.1.PhD/FM416 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Namangan muhandislik-texnologiya institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasiga (www.nammti.uz) va Ziyonet Axborot-ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Erkaboyev Ulugbek Inayatillayevich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Onarqulov Karimberdi Egamberdiyevich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Nosirov Murodjon Zokirovich

fizika-matematika fanlari nomzodi, professor

Yetakchi tashkilot:

Qarshi davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Namangan muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli Ilmiy kengashning 2024 yil “__” _____ soat ____ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz, Namangan muhandislik-texnologiya instituti 3-bino, 1-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan muhandislik-texnologiya institutiining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (____raqam bilan ro‘yxatga olingan.) Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi, 7-uy. Tel: (99869) 225-10-07.

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil “__” _____ da tarqatildi.
(2024 yil «__” _____ dagi № ____ raqamli ryestr bayonnomasi.)

M.G‘. Dadamirzayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy Kengash
raisi o`rinbosari, f.-m.f.d., professor

A.A. Abdulkarimov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
Kengash ilmiy kotibi, PhD, dotsent

N.Yu.Sharibayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
Kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda, hozirgi kunda kvant o'ra asosidagi yarimo'tkazgichli strukturalar, spintronik va magnitofotonik kristallar, nanokompozitlar kabi sun'iy ravishda yaratilgan magnit nanostrukturalarning kvant effektlari hamda magnitoptik xossalari o'rganishga katta e'tibor qaratilmoqda. Xususan, magnitoptik va magnitoqarshilik ossillyatsiyalari kvant o'lchamli geterostrukturalarning turli xossalari va xususiyatlarini o'rganish uchun juda samarali bo'lib, u yangi magnit yarimo'tkazgichlar va istiqbolli spintronik materiallarda erkin zaryad tashuvchilarning spin polarizatsiyasini aniqlash imkonini beradi. Shuning uchun, bir qator yetuk olimlarda nano o'lchamli yarimo'tkazgichli strukturalarda kvant magnit effektlarini harorat, kuchli elektromagnit to'lqin hamda kvantlovchi magnit maydonlarga bog'liqligini o'rganish alohida ilmiy va amaliy jihatdan qiziqishga olib keladi. Ayniqsa, mikroto'lqinli maydon ta'siridagi kvant o'lchamli geterostrukturali yarimo'tkazgichlarning magnitoptik yutilish koeffitsienti va magnitoqarshilik ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligini aniqlash, ular yordamida boshqarish hamda ushbu yarimo'tkazgichli materiallarning tashqi omillarga chidamliligini oshirish muammolarini hal etish muhim ahamiyat kasb etadi.

Jahon miqyosida, tashqi omillar ta'siridagi kvant o'lchamli yarimo'tkazgichli strukturalarning kombinirlangan holatlar zichligi va magnitoqarshilik ossillyatsiyalari xususiyatlarini, jumladan kuchli elektromagnit maydon va harorat ta'sirida magnitoptik yutilish koeffitsientini aniqlash va ushbu tashqi ta'sirlarga chidamliligini oshiruvchi magnit nanostrukturali yarimo'tkazgichli asboblarni olish texnologiyasini takomillashtirish zaruriyatini keltirib chiqaradi.

Respublikamizda ilm – fan rivojiga, jumladan, nanostrukturali yarimo'tkazgichlarning elektr, magnit va optik xossalari bo'yicha kvant magnit effektlariga tashqi omillarning ta'sirini tadqiq etishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Mamlakatimizda ilm-fanni rivojlantirish va uni yanada amaliy qo'llashda muhim ahamiyatga ega bo'lgan mazkur fundamental tadqiqotlar negizida 2022-2026 yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan "Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini barcha zonalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish"¹ kabi bir qator vazifalar belgilab berilgan. Xususan, matematik modellar yordamida kichik o'lchamli yarimo'tkazgichli tuzilmalarning yorug'lik va qorong'ulikdagi ko'ndalang magnitoqarshilik va elektr o'tkazuvchanlik ossillyatsiyalarini turli magnit maydon va haroratlar ta'sirida boshqarish imkoniyatini o'rganish muhim masalalardan hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 9 sentyabrdagi PF-220-son "Energiya tejoychi texnologiyalarni joriy qilish va kichik quvvatli qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Farmoni, 2021 yil 9 apreldagi PQ-5063-son "O'zbekiston

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son "2022-2026 yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi" to'g'risidagi Farmoni

Respublikasida qayta tiklanuvchi va vodorod energetikasini rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-son "Fizika zonasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida" hamda 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-son "Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada hizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining F2 «Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik» ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Hozirgi kunda, kuchli elektromagnit maydon ta'siridagi nano o'lchamli yarimo'tkazgichlarda magnitoptik yutilish koeffitsienti va magnitoqarshilik ossillyatsiyalarining haroratga bog'liqligini juda katta qiziqish bilan o'rganib kelinmoqda. Jahonning yetuk olimlaridan N.F. Mott, D.G. Seiler, K.T. Shindo, R.P. Seysyan, V.Ya. Aleshkin, A.L. Efros, Nai-Chuan Chen, E.I.Zenkevich, Yu.I.Galperin, A.I.Veynger hamda mashhur o'zbek olimlari M.K.Baxadirxanov, S.Z. Zaynabidinov, R.A. Muminov, T.S.Shamirzaev, G.Gulyamov va boshqalar kvant o'lchamli yarimo'tkazgichli strukturalarning magnitoptik va magnitoqarshilik ossillyatsiyalarini harorat va kuchli elektromagnit maydonga bog'liqligini tadqiq etishgan. Nai-Chuan Chen rahbarligidagi bir qator Tayvand olimlari tomonidan *InGaN/GaN* kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichlarning kombinirlangan holatlar zichligini uch xil to'lqin uzunlikdagi (binafsha, ko'k va yashil) nurlanishlarga bog'liqligi tajribaviy aniqlangan. Kombinirlangan holatlarga mos keladigan holatlar zichligining past energiyali uchida ruxsat etilgan zonalarning chegara qismlarida "dum" lar paydo bo'lishi kuzatilgan va bu dumlarning mavjudligi kvant o'rali geterostrukturalarning energetik spektrini kengaytirishiga olib kelgan. Ammo, ushbu ishlarda, kombinirlangan holatlar zichligiga harorat va magnit maydonning ta'siri tadqiq etilmagan. A.I. Veynger rahbarligidagi bir qator Rossiya olimlari tomonidan *InAs/GaSb* kvant o'rali yarimo'tkazgichning magnitoqarshilik ossillyatsiyalariga kuchli mikroto'lqinli maydon va haroratning bog'liqligi tadqiq etilgan. Bunda, mikro to'lqinli elektromagnit maydonning quvvati (P) ni magnit magnit maydon kuchlanganligi (H) bo'yicha ikkinchi tartibli differensial ($\frac{d^2P}{dH^2}$) ossillyatsiyalarini magnit maydon va haroratga bog'liqligi aniqlangan. Lekin, ushbu ishlarda, tajriba natijalarini tushuntirib beruvchi mukammal model ishlab chiqilmagan. Hozirgi kunlarda, mamlakatimiz olimlaridan G'. G'ulomov va uning shogirdlari tomonidan magnitoptik yutilish koeffitsienti va magnitoqarshilik ossillyatsiyalarini tashqi omillarga bog'liqligini ham amaliy ham nazariy jihatdan hisoblash imkoniyatlari ko'rsatilgan. Biroq, ushbu ishlarda faqat hajmiy yarimo'tkazgichli tuzilmalar uchun kvant effektlarini haroratga bog'liqligi ko'rilgan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Namangan muhandislik – texnologiya instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejasining FZ-2020092433 «Yuqori harorat va kuchli mikroto'lqinli maydondagi nanostrukturali yarimo'tkazgichlarda magnitoqarshilik, magnit singdiruvchanlik va magnitoptik yutilish koeffitsiyentlarini aniqlash» (2022-2026 yy.) mavzudagi fundamental loyiha doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi kuchli elektromagnit maydon ta'siridagi nano o'lchamli yarimo'tkazgichlarda magnitoptik yutilish koeffitsienti va magnitoqarshilik ossillyatsiyalarining haroratga bog'liqligini modellashtirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

kvantlovchi magnit maydon ta'siridagi kvant o'raning ruxsat etilgan zonasida ikki o'lchovli kombinirlangan holatlar zichligi ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligi tadqiq etish;

to'g'ri zonali kvant o'ra asosidagi geterostrukturada ikki o'lchovli kombinirlangan holatlar zichligini haroratga bog'liqligiga kvantlovchi magnit maydonning ta'sirini hisoblash uchun yangi model ishlab chiqish;

taklif etilayotgan model asosida kvant o'rali yarimo'tkazgichlarning magnitoptik yutilish koeffitsientini haroratga bog'liqligini hisoblovchi umumiy matematik ifodani keltirib chiqarish;

kuchli elektromagnit maydon ta'siridagi kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlarning magnitoqarshilik ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligini tadqiq etish;

taklif qilingan matematik model asosida ossillyatsiyalarning eksperimental natijalaridan foydalangan holda yuqori haroratlarda yarimo'tkazgichli tuzilmalarda mikroto'lqinli nurlanishning yutilishini o'rganish;

Tadqiqotning ob'ekti sifatida kvant o'rali to'g'ri zonali geterostrukturali yarimo'tkazgichlar tanlab olingan.

Tadqiqotning predmeti kombinirlangan holatlar zichligi, magnitoptik yutilish koeffitsienti hamda magnit maydon induksiyasi bo'yicha ikkinchi tartibli differensial magnitoqarshilik ossillyatsiyalari hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida qo'yilgan masalani yechish uchun nazariy fizikani taqribiy usullari, delta – funksiyalarni qatorga yoyish usuli, birinchi va ikkinchi tartibli differensial tenglamlarni yechish bo'yicha olingan murakkab matematik ifodalarni sonli hisoblash (Maple dasturidan foydalanib) usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor, to'g'ri zonali nanostrukturali yarimo'tkazgichlarda zonalararo magnitoptik yutilish koeffitsienti ossillyatsiyalarining haroratga bog'liqligini kombinirlangan holatlar zichligining delta-funksiyalarini qatorga yoyish usuli yordamida asoslangan;

kuchli magnit maydondagi kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlarning kombinirlangan holatlar zichligini haroratga bog'liqligini hisoblashning yangi metodi taklif etilgan;

ikki o'lchamli kombinirlangan holatlar zichligi ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligini matematik modeli ishlab chiqilgan;

o'ta yuqori chastotali elektromagnit maydondagi kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanlik ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligini ifodalovchi yangi analitik ifodalar topilgan;

taklif etilayotgan model yordamida, to'g'ri zonali nanostrukturali yarimo'tkazgichlarning kvant effekti ossillyatsiyalarini harorat, magnit maydon kuchlanganligi va kuchli elektromagnit to'lqin quvvatlariga bog'liqligini differensial tenglamalari keltirib chiqarilgan va ular asosida tajriba natijalari tushuntirilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichlarning magnitoptik yutilish koeffitsientlarini haroratga bog'liqligini aniqlash usuli ishlab chiqilgan;

kuchli elektromagnit maydon ta'siridagi nanostrukturali yarimo'tkazgichlarning magnitoqarshilik ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligini aniqlash uchun kompyuter dasturi yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi: kichik o'lchamli yarimo'tkazgichli tuzilmalarning elektr o'tkazuvchanlik ossillyatsiyalarini nazariy hisoblash natijalari tajriba bilan mos kelishi, shuningdek tajriba qiymatlaridan foydalangan holda past haroratlarda olingan differensial magnitoqarshilik ossillyatsiyalarini yuqori haroratlarda tadqiq etish ishlab chiqilgan matematik modellashtirish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqotda olingan natijalarning ilmiy ahamiyati taklif etilayotgan matematik model kichik o'lchamli yarimo'tkazgichli tuzilmalarda ko'ndalang magnitoqarshilik ossillyatsiyalarini yorug'lik va haroratga bog'liq bo'lishini tushuntirish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, taklif etilayotgan modellashtirish usullaridan yangi kvant o'rali geterotuzilmalar, nano o'lchamli magnetodiodlarni ishlab chiqarishda foydalanish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Kuchli elektromagnit maydon ta'siridagi nanostrukturali yarimo'tkazgichlarda magnitoptik yutulish koeffisienti va magnitoqarshilik ossillyatsiyalarining haroratga bog'liqligini modellashtirish natijalari asosida:

nanostrukturali yarimo'tkazgichlarning magnitoptik yutulish koeffisientini haroratga bog'liqligini hisoblashda olingan natijalardan "To'g'ri zonali bo'lmagan yarimo'tkazgichli kvant nuqtalar: lokallashtirilgan eksiton spinlarining dinamikasi va rekombinatsiyasi" mavzusidagi № 19-02-00098 raqamli amaliy loyihada bajarishga qo'llanilgan (Rossiya fanlar akademiyasi Sibir bo'limi A.V.Rjanov nomidagi yarimo'tkazgichlar fizikasi institutining 2024 yil 9 yanvardagi № 15307-26-6804 sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanishda loyihadagi kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlarning magnitoptik yutulish koeffisientini 1.3% ga oshirish imkonini bergan;

o'ta yuqori chastotali elektromagnit maydondagi nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarda kvant effekti ossillyatsiyalarini haroratga bog'liqligini aniqlashda olingan natijalardan "O'ta yuqori chastotali elektromagnit maydondagi deformatsiyalangan p-n-o'tish volt-ampere xarakteristikasiga yorug'likning ta'sirini tadqiq etish" mavzusidagi OT-F2-71 raqamli fundamental grantni bajarishda

qo'llanilgan (Namangan muhandislik-qurilish institutining 2024 yil 8 fevraldagi №06/10- 09/122 sonli malumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanishda loyihadagi magnitoqarshilik kattaligini 3.5% ga kamaytirishga erishilgan;

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 18 ta, jumladan 11 ta xalqaro va 7 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 36 ta ilmiy ish, shulardan 2 ta monografiya, O'zbekiston respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi xuzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 14 ta ilmiy maqola, jumladan 6 tasi Scopus ma'lumotlar bazasida kiritilgan horijiy jurnallarda nashr qilingan hamda tadqiqot mavzusi bo'yicha 2 ta EHM uchun dasturiy guvohnomalar olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 101 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida o'tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari hamda ob'ekt va predmetlari tavsiflangan, uning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar taraqqiyotining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Kuchli elektromagnit maydondagi nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarda kvant ossillyatsiya hodisalari**» deb nomlangan birinchi bobida adabiyotlar sharhi taxlil qilingan, unda nanostrukturali yarimo'tkazgichlarda magnitoptik yutilish koeffitsienti, kombinirlangan holatlar zichligi va magnitoqarshilik ossillyatsiyalariga kuchli elektromagnit to'lqin va haroratning ta'sirini o'rganish tendensiyalari adabiyotlar asosida tahlil qilingan. Mavjud nazariy va eksperimental ma'lumotlarni tahlil qilish asosida masalani qo'yilishi shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning «**Kvant-o'lchamli geterostrukturalarda ikki o'lchamli kombinirlangan holatlar zichligining tashqi faktorlar (harorat va magnit maydoni) ga bog'liqligini aniqlash**» deb nomlangan ikkinchi bobida to'g'ri burchakli kvant o'ralar asosidagi geterostrukturalarda kombinirlangan (birlashgan) holatlar zichligi ossillyatsiyalarining kuchli magnit maydoniga bog'liqligi tadqiq etilgan. To'g'ri zonali kvant o'rali geterostrukturalarda kombinirlangan holatlar zichligini haroratga bog'liqligiga kvantlovchi magnit maydonning ta'siri tadqiq etilgan. Kvantlovchi magnit maydonlarida kvant o'ralarini ikki o'lchamli kombinirlangan holat zichligining haroratga bog'liqligini hisoblash uchun yangi matematik model ishlab chiqilgan. Taklif etilgan model nanoo'lchamli, to'g'ri zonali, parabolik qonunga bo'ysunuvchi yarimo'tkazgichlardagi eksperimental natijalarni tushuntirgan.

Agar kvant o'rali strukturalarda elektron va teshik holatlari barcha uchta kvaziimpuls komponentlar bo'yicha o'lchamli-kvantlangan bo'lsa, u holda bunday strukturaning ruxsat etilgan zonasida holatlarning kombinirlangan zichligi Gauss funksiyasi ko'rinishda bo'ladi. U holda, kombinirlangan holat zichligi $\delta(E)$ – Dirak delta-funksiyasi deb ataluvchi funksiya yordamida ifodalanadi:

$$N_{jds}^{0d}(E) = \sum_{l,m,n} \delta(E - E_{lmn}) \quad (1)$$

Kombinirlangan holatlar zichligi cheksiz qisqa va baland cho'qqilarning majmuasidan iborat bo'ladi. Kuchli magnit maydoni mavjud bo'lganda, kvant o'raning kombinirlangan holatlar zichligini hisoblash uchun energiyaning saqlanish qonunini parabolik dispersiya qonuniyati uchun foydalaniladi. Ya'ni; $E_c^{2d}(B, d, n_z)$ va $E_v^{2d}(B, d, n_z)$ lar uchun, spinni hisobga olmaganda, magnitoptik o'tishlar energiyaning saqlanish qonuniga mos keladi:

$$E_{cv}^{2d}(B, d, n_z) = E_c^{2d}(B, d, n_z) - E_v^{2d}(B, d, n_z)$$

$$E_{cv}^{2d}(B, d, n_z) = E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega_c^v + \frac{\hbar^2\pi^2}{2m_{cv}^*d^2} n_z^2 \quad (2)$$

$$h\nu \geq E_{cv}^{2d}(B, d, n_z)$$

Bu yerda, N_L^c, N_L^v – kvan o'raning ruxsat etilgan zonasidagi zaryad tashuvchilarning Landau satxlari soni; ω_c^c, ω_c^v – kvant o'raning o'tkazuvchan va valent zonalarida magnit maydonining siklotron chastotasi; d – kvant o'ra qalinligi; 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; $m_s^c g_c \mu_B H, m_s^v g_v \mu_B H$ – ruxsat etilgan zonadagi spin energiyasi; $E_g^{2d}(0)$ – absolyut nol haroratda kvant o'rasi ta'qiqlangan zonasining kengligi; V – magnit maydoni induksiyasi, $h\nu$ – yutilayotgan foton energiyasi, $\frac{1}{m_{cv}^*} = \frac{1}{m_c^*} + \frac{1}{m_v^*}$ – kombinirlangan (keltirilgan) effektiv massa. OZ o'qi yo'nalishi buyicha, kuchli magnit maydoni zaryad tashuvchilar uchun energiya va to'liqin vektori orasidagi nisbatni o'zgartirmaydi. Biroq, zaryad tashuvchilarning magnit induksiyasiga perpendikulyar yo'nalishdagi (XY tekislikda) harakati uchun energetik sathlarning avvalgi kvazi uzluksiz qatori Landauning diskret satxlari sistemasi bilan almashadi. Elektronlar va teshiklarning effektiv massalari teng deb olinayotganligi sababli, Landau sathlari orasidagi masofa kvant soniga bog'liq bo'lmaydi va u $\hbar\omega_s$ ga teng bo'ladi. Demak, kvant o'raning o'tkazuvchan va valent zonalarida erkin elektronlar va teshiklarning har uchchala yo'nalish bo'yicha harakati cheklangan. Kvantlovchi magnit maydoni ta'sirida kvant o'ra xuddiki, kvant nuqta analogiga aylanadi. (1) formulaga muvofiq, $\delta(E - E_{lmn})$ argumentda E ni $h\nu$ ga va E_{lmn} ni $E_{cv}^{2d}(B, d, n_z)$ ga almashtirib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)) = \frac{eB}{\pi\hbar} \sum_{N_L^c, N_L^v, n_z} \delta(h\nu - E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)) \quad (3)$$

(3) formuladan tushunarliki, $h\nu > E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_Z)$ bo'lganda, kombinirlangan holatlar zichligi energiyalar funksiyasi sifatida o'zida deltasimon tabiatni aks ettiradi. Tajribalarning ko'rsatishicha, elektronlar va teshiklarning holat zichliklari haroratga bog'langan. Kvant o'radagi elektronlar va teshiklarning holatlar zichligini haroratga bog'liqligi Landau diskret sathlarining termik kengayishi orqali izohlanadi. Yetarlicha katta haroratlarda, kvant o'raning o'tkazuvchan zonasidagi elektronlar holat zichligi diskret Landau sathidan uzluksiz energetik spektrga aylanadi. Past haroratlarda esa, uzluksiz energetik spektr Landau sathlariga ajralishi bilan bir qatorda, kvantlovchi magnit maydoni kvant o'rani ruhsat etilgan zonasining holatlar zichligiga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Bu holatda, harorat ko'tarilgani sari, zaryad tashuvchilarning o'zaro to'qnashuvlari va issiqlik harakati Landau diskret sathlarini kvant o'rani holatlar zichligining uzluksiz spektriga aylantirib, "chaplab" yuboradi. Bundan kelib chiqadiki, zaryad tashuvchilarning diskret Landau sathlarini haroratga bog'liqligi kvant o'ralarining kombinirlangan holatlar zichligini deltasimon funksiyalar qatoriga yoyilmasi orqali ifodalanishi mumkin. Ikki o'lchovli kombinirlangan holatlar zichligini deltasimon funksiyalar qatoriga yoyish yo'li bilan tadqiq qilish orqali kvant o'rali geterostrukturalarda zonalararo magnitoptik yutilish ossillyatsiyasining haroratga bog'liqligini tushuntirishga erishiladi. T=0 bo'lganda, Gauss taqsimot funksiyasi deltasimon bo'ladi va quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$Gauss(E, T) = \frac{1}{kT} \cdot \exp\left(-\frac{(E - E_i)^2}{(kT)^2}\right) \quad (4)$$

Bundan tashqari, zonalararo magnitoptik yutilishni ifodalash uchun, odatda, kvant o'raning har bir energetik spektrini "termik yuvilish" parametri Gauss qonuni bo'yicha kengayadi deb faraz qilinadi. Bunday yondoshish kvant o'rasida ikki o'lchovli kombinirlangan holatlar zichligining haroratga bog'liqligi bilan ifodalanishiga olib keladi. Bundan kelib chiqadiki, chekli T haroratda, nanoo'lchamli yarim o'tkazgichli strukturalar uchun hisoblash $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_Z))$ ning Gauss funksiyalari bo'yicha qatorga yoyishga olib kelinadi. (3) formulada ikki o'lchovli kombinirlangan holatlar zichligining termik kengayishi hisobga olinmaydi. Agar $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_Z))$ ni (4) formula bo'yicha qatorga yoysak, u holda kvant o'raning ruhsat etilgan zonasida ikki o'lchovli kombinirlangan holatlar zichligining haroratga bog'liqligini hisobga olish mumkin. T=0 bo'lganda, (4) formula quyidagi deltasimon funksiya ko'rinishini oladi:

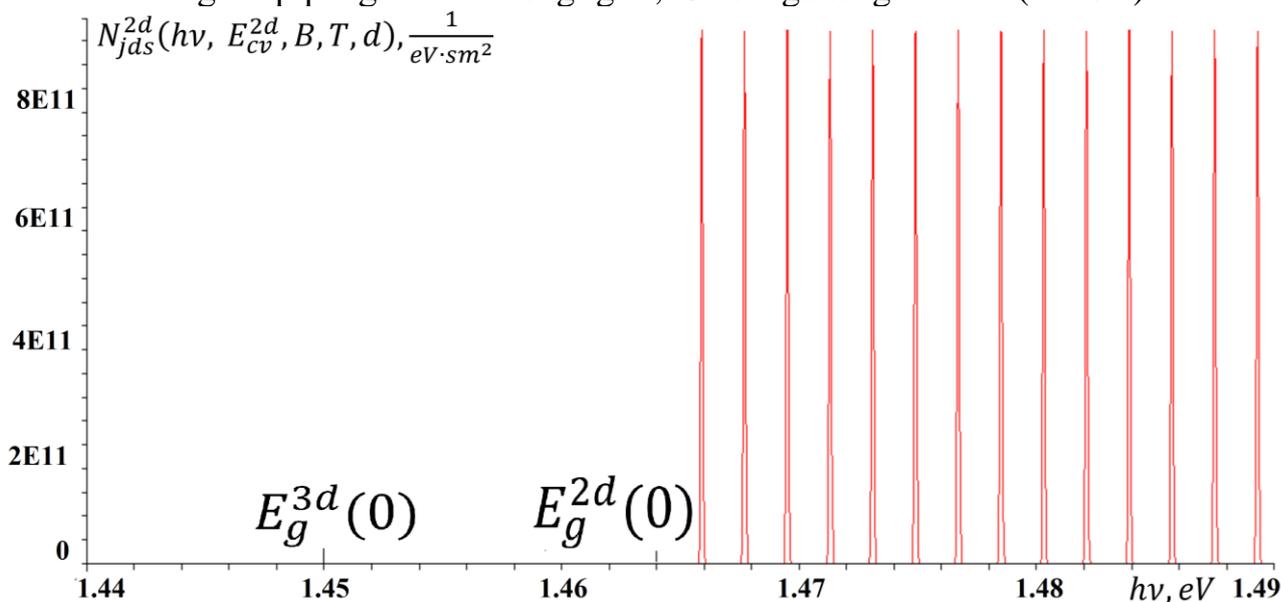
$$Gauss(E, E_i, T) \xrightarrow{T \rightarrow 0} \delta(E - E_i) \quad (5)$$

Shunday qilib, (2), (3), (4) va (5) formulalardan kelib chiqadiki, kvantlovchi magnit maydon ta'sir qilganda, kvant o'rani kombinirlangan holatlar zichligining haroratga bog'liqligi quyidagi analitik ifodaga olib kelinadi:

$$N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z)) = \frac{eB}{\pi\hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \sum_{N_L^c, N_L^v, n_z} \exp \left[- \frac{\left(h\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^v + \frac{\hbar^2\pi^2}{2m_{cv}^*d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (6)$$

Bu yerda, $N_{jds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z))$ – kuchli magnit maydoni mavjud bo‘lganda, kvant o‘raning ruxsat etilgan zonasida kombinirlangan holatlar zichligi ossillyatsiyalarining haroratga bog‘liqligi. Ushbu yangi analitik formula kvantlovchi magnit maydondagi kvant o‘rali geterostrukturalarda ikki o‘lchamli kombinirlangan holatlar zichligining haroratga bog‘liqligiga ta‘sirini ifodalaydi. Olingan bu ifoda turli magnit maydonlari va haroratlardagi kvant o‘ralarida, zonalararo magnitoptik yutilish ossillyatsiyasining eksperimental ma‘lumotlarini qayta ishlash uchun qulaydir. Shunday qilib, tashqi faktorlar (harorat va magnit maydoni) ning nanoo‘lchamli yarimo‘tkazgich strukturalarda ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligiga ta‘sirini ifodalovchi matematik model yaratildi.

Ushbu ishda², qalinligi 14 nm, to‘siq qatlamlarida ozgina (3%) alyumniy aralashgan, *GaAs/AlGaAs* kvant o‘rali, yuqori sifatli geterostrukturalar olingan. Ushbu geterostrukturalar 4K haroratda o‘rganilgan. Magnit maydoni bo‘lmaganda, *GaAs* kvant o‘raning ta‘qiqlangan zona kengligi 1,464 eV ga teng bo‘ladi (1-rasm).



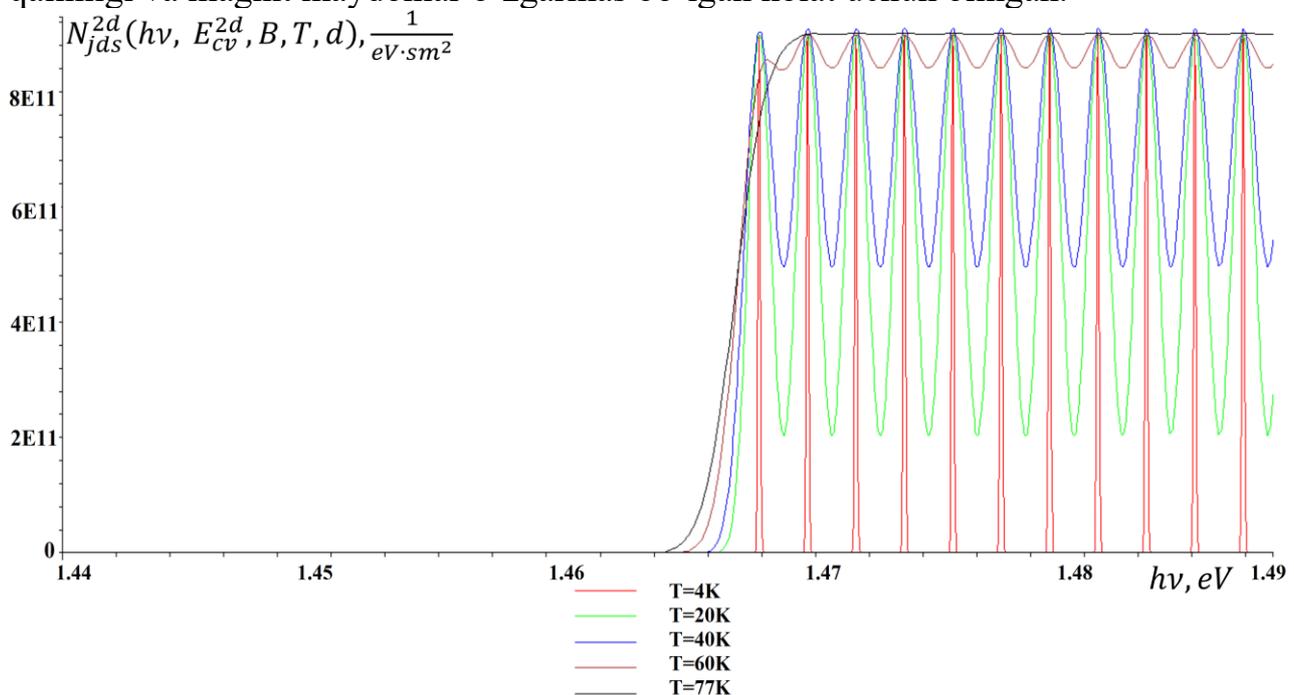
1-rasm. T=4 K haroratda va B=9 Tl kvantlovchi magnit maydonidagi *GaAs/AlGaAs* (d=14 nm) kvant o‘rali geterostrukturalarda ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligining fotonning yutuvchi energiyasiga bog‘liqligi

1-rasmda T=4 K haroratda va B=9 Tl kvantlovchi magnit maydonidagi *GaAs* d=14 nm ($n_z=1$) kvant o‘rasi uchun ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligining

² A.V. Mikhailov, A.V. Trifonov, O.S. Sultanov, I.Yu. Yugova, I.V. Ignatiev. *Semiconductors*. 2022, Vol.56, No.7, pp. 672-676

fotonning yutuvchi energiyasiga bog‘liqligi keltirilgan. Ushbu grafik (6) formula bo‘yicha amalga oshirilgan sonli hisoblashlar asosida qurilgan. Ushbu rasmda zaryad tashuvchilarning diskret Landau sathlari soni 14 ga teng. Bu cho‘qqilar zaryad tashuvchilarning diskret Landau sathlari ($N_L^{cv}=14$) *GaAs* kvant o‘raning ruxsat etilgan zonasida kuzatiladi. Unda, $T=4K$, $kT=4\cdot 10^{-4}$ eV, $\frac{\hbar\omega_c}{kT} = 50$, $kT \ll \hbar\omega_c$. bo‘lganda $\hbar\omega_c = 0,02$ eV kvantlovchi magnit maydonidagi ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligi ko‘rsatilgan. Bu holda, zaryad tashuvchilarning Landau satxlarning “termik yuvilishi” juda kuchsiz va ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligi ideal formadan chetlanishni sezmaydi. Ushbu grafikda valent zona va o‘tkazuvchanlik zona simmetrik energetik spektrlar sifatida olingan. U holda, boshlang‘ich ($N_{L(V)}=0$) dan $N_{L(V)}=6$ gacha bo‘lgan teshiklarning diskret Landau sathlari kvant o‘rani valent zonasining shiftidan (potologidan) yuqorida bo‘ladi.

2-rasmda kvantlovchi magnit maydon ta‘siridagi *GaAs/AlGaAs* ($d=14$ nm) kvant o‘rali, to‘g‘ri zonali geterostrukturalarda ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligining fotonning yutuvchi energiyasi bog‘liqligiga haroratning ta‘siri ko‘rsatilgan. Bu yerda, kvantlovchi magnit maydoni induksiya soni 9 Tl ga teng va $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_g^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z))$ grafiklar 4 K, 20 K, 40 K, 60K, 77 K haroratlar uchun qurilgan. Rasmdan ko‘rinib turibdiki, harorat ortishi bilan Landau satxlarning keskin cho‘qqilari silliqqlana boradi va yetarlicha yuqori xaroratlarda diskret energetik holatlar zichliklari uzluksiz energetik spektrlarga aylanadi. Ushbu natijalar kvant o‘rasi qalinligi va magnit maydonlar o‘zgarmas bo‘lgan holat uchun olingan.

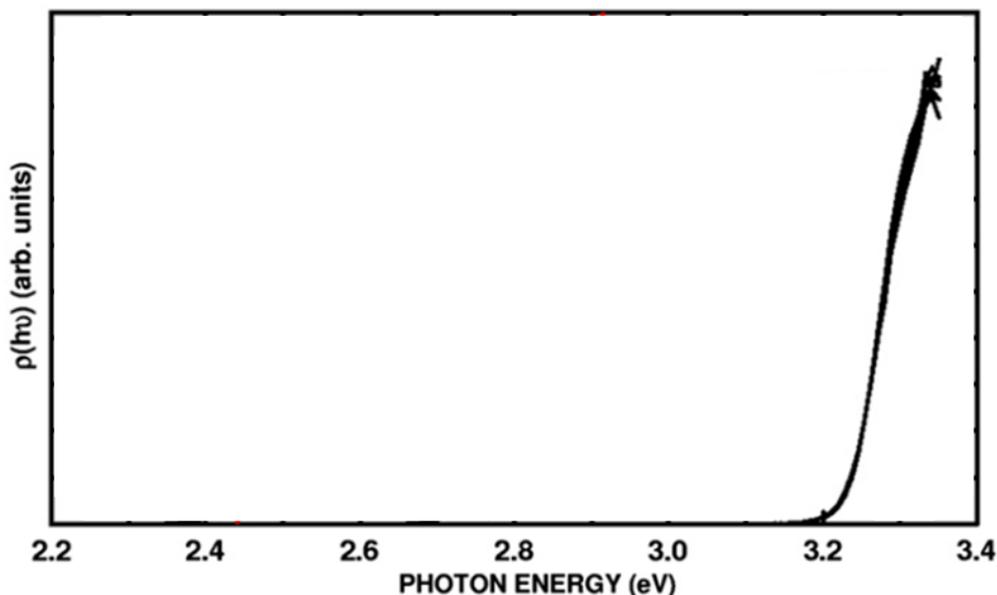


2-rasm. $B=9$ Tl kvantlovchi magnit maydon ta‘siridagi to‘g‘ri zonali *GaAs/AlGaAs* ($d=14$ nm) geterostrukturalarda ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligining fotonning yutuvchi energiyasi bog‘liqligiga haroratning ta‘siri.

Harorat ortishi bilan zaryad tashuvchilar Landau satxlarning keskin cho‘qqilari silliqлана boradi (2-rasm) va $kT \approx \hbar\omega_c^{cv}$ bo‘lganda asta sekin yo‘qolib ketadi. Shuningdek, yetarlicha yuqori $kT > \hbar\omega_c^{cv}$ $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_Z))$ haroratlarda ular kvant o‘raning uzluksiz kombinirlangan holatlar zichligiga aylanadi va kvantlovchi magnit maydonining ta‘sirini sezmay qoladi.

Bundan tashqari, harorat ortishi bilan ruxsat etilgan kvant o‘rasida elektronlar va teshiklar energiya sathlari kvantlanishi bilan bog‘liq zaryad tashuvchilar Landau satxlarning keskin cho‘qqilari ham asta sekin silliqланadi. Bu $T=40K$, $kT=3,5 \cdot 10^{-3}$ eV, $kT \approx \hbar\omega_c^{cv}$ bo‘lganda kvant o‘raning zaryad tashuvchilar diskret Landau satxlarning sezilmay qolishiga olib keladi. 77K haroratda, *GaAs/AlGaAs* kvant o‘raning ruxsat etilgan zonasida diskret Landau sathlari deyarli sezilmaydi va magnit maydoni bo‘lmagan holdagi ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligi bilan bir xil bo‘ladi. Bundan kelib chiqadiki, kvant o‘raning o‘tkazuvchan va valent zonalarida ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligi $kT < \hbar\omega_c^{cv}$ bo‘lganda kuzatiladi.

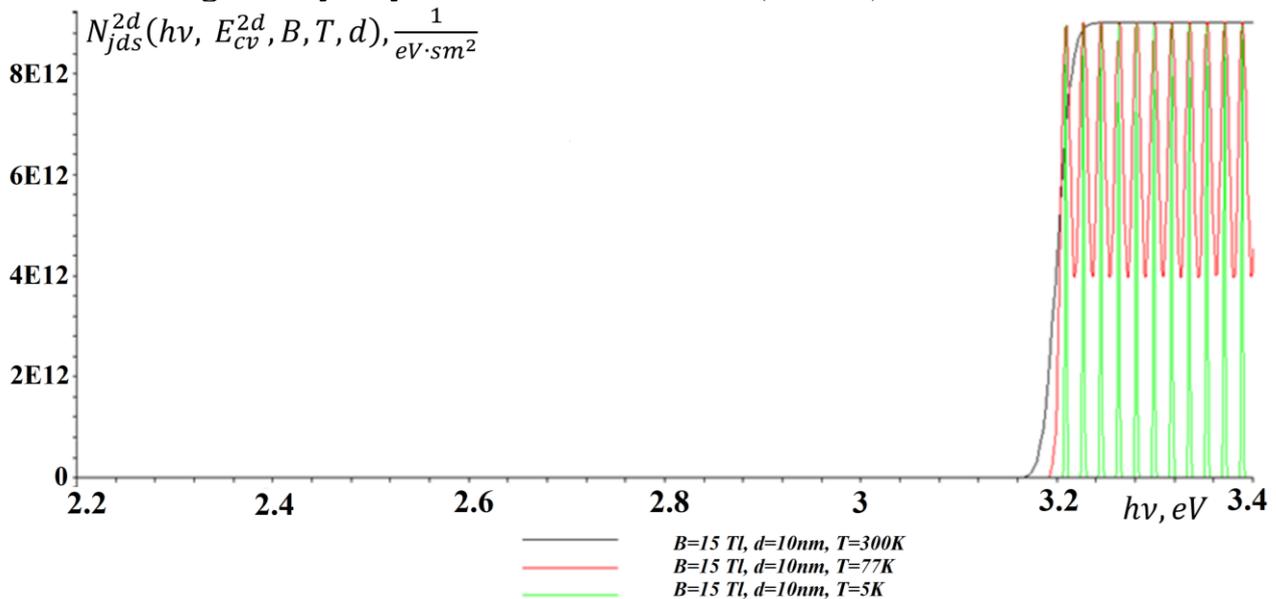
Ushbu ishda³, har xil toklarda ishlovchi turli to‘lqin uzunligidagi (binafsha, ko‘k, yashil rangli) nurlashishli *InGaN/GaN* kvant o‘ralari asosida geterostrukturalarning ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligi tadqiq qilingan (3-rasm). Natijalar shuni ko‘rsatadiki, tok orttirilganda nurlanishning ko‘k siljishi ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligining o‘zgarishi bilan bog‘liq. Ushbu ishda, *InGaN/GaN* kvant o‘rasining ikki o‘lchovli kombinirlangan holatlar zichligining magnit maydoni bo‘lmaganda va $T=300$ K haroratda foton yutilishiga bog‘liqligi topilgan. Bu yerda *InGaN/GaN* kvant o‘rasi ta‘qiqlangan zonasi kengligi $E_g(0)=3.2$ eV ga teng.



3-rasm. $T=300$ K va $B=0$ da *InGaN/GaN* to‘g‘ri zonali kvant o‘rali yarimo‘tkazgichda kombinirlangan holatlar zichligiga yutilayotgan foton energiyasining bog‘liqligi³.

³ Yu-Shou Wang, Nai-Chuan Chen, Chun-Yi Lu, Jenn-Fang Chen. *Physica B*. 2011. Vol.406. Iss.22. pp. 4300–4303.

Taklif etilgan yangi modelni *InGaN/GaN* materialiga tadbiiq qilaylik. 4-rasmda turli haroratlar uchun *InGaN/GaN* kvant o‘rali yarimo‘tkazgichning kombinirlangan holatlar zichligi ossilyatsiyalarini yutilayotgan foton energiyasiga bog‘liqligiga kvantlovchi magnit maydonning ta’siri ko‘rsatilgan. Bu yerda, $B=10\text{Tl}$, $T=300\text{K}$, 77K va 5K . 3 va 4-rasmlardan ko‘rinib turibdki, xona xaroratida olingan natijalar magnit maydon ta’sirida va magnit maydon bo‘lmagan xollarda deyarli bir xil bo‘lib ko‘rinmokda. Bundan kelib chiqadiki, yangi model tadbiiqi ba’zi qonuniyatlarga bo‘ysunmoqda, demak, taklif etilayotgan model to‘g‘ri ekanligidan dalolat beradi. (6) formuladan foydalanib, turli past haroratlarda ham ikki o‘lchamli kombinirlangan holatlar zichligi ossilyatsiyalarini kuzatish mumkin (4-rasm).



4-rasm. *InGaN/GaN* to‘g‘ri zonali kvant o‘rali yarimo‘tkazgichda kombinirlangan holatlar zichligiga yutilayotgan foton energiyasining bog‘liqligiga harorat va kvantlovchi magnit maydonning ta’siri. Yangi taklif qilingan model asosida hisoblangan.

Dissertatsiyaning «**To‘g‘ri zonali nanostrukturali yarimo‘tkazgichlarda magnitoptik yutulish koefitsientlarini haroratga bog‘liqligini modellashtirish**» deb nomlangan uchinchi bobida to‘g‘ri zonali nanostrukturali yarimo‘tkazgichlarda magnitoptik yutulish koefitsientlarini haroratga bog‘liqligi tadbiiq etilgan. Magnitoptik yutulish koefitsienti 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 chiqilgan.

G‘alayonlanish nazariyasining birinchi yaqinlashuvida yorug‘likning zaryadli zarralar tomonidan yutilishi elektron yoki kovaklarning quyi sathidan yuqori energiyasi holatlariga optik o‘tishlari natijasida sodir bo‘ladi. Umuman olganda, to‘g‘ri zonali hajmiy va kichik o‘lchamli yarimo‘tkazgichli strukturalar uchun yutilish koefitsientining umumiy ifodasi quyidagi ko‘rinishga ega:

$$\alpha(\omega) = \frac{2\hbar\omega}{nc\varepsilon_0 F_0^2 V} \sum_{i,j} \sum_k w_{ji}(k) [f_0(E_{jk}) - f_0(E_{ik})] \quad (7)$$

Bu yerda,

$$w_{ji}(k) = \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{eF_0}{2m_0\omega} \right)^2 |P_{ij}(k)|^2 \delta(E_{ik} - E_{jk} - \hbar\omega) \quad (8)$$

(8) ifoda – elektronning ψ_{jk} to‘lqin funksiyali holatdan ψ_{ik} holatiga optik o‘tish ehtimolligini anglatadi. (7) va (8) larni hisobga olgan holda hamda valent zona shipi (V_j) va o‘tkazuvchanlik zonasi tubi (C_i) kabi chegara zonalarini yaqin joyida ($k=0$ nuqtaga yaqin joyda) optik o‘tishlar uchun yorug‘lik yutilish koeffitsientini chastotaga bog‘liqligi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\alpha(\omega) \cong \frac{C}{\omega} \sum_{i,j} |P_{civj}|^2 \rho_{civj}(\omega) \quad (9)$$

Bu yerda, C – sindirish ko‘rsatkichini hisobga olganda ruxsat etilgan zonaning chegara zonalarida chastotaga kuchsiz bog‘liq bo‘lgan proporsionallik koeffitsienti. P_{civj} – matritsali element impulsi. $\rho_{civj}(\omega)$ – chastotaga bog‘liq bo‘lgan kombinirlangan holatlar zichligi. Nanostrukturali yarimo‘tkazgichlar uchun kombinirlangan holatlar zichligi yorug‘lik chastotasiga bog‘liq bo‘lgan delta-funksiyalarni qatorga yoyish orqali aniqlanadi ((5) va (6) ifodaga qarang):

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 $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_Z))$ orqali aniqlashga imkon topiladi. Yuqoridagi (6) va (9) 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 chiqariladi:

$$\alpha_B^{2d}(\hbar\nu, B, T, d) = \frac{2\pi e^2 |P_{cv}|^2}{nc\epsilon_0 m_0^2 2\pi\nu V} \sum_{ij} |S_{civj}|^2 N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_Z)) \quad (10)$$

yoki

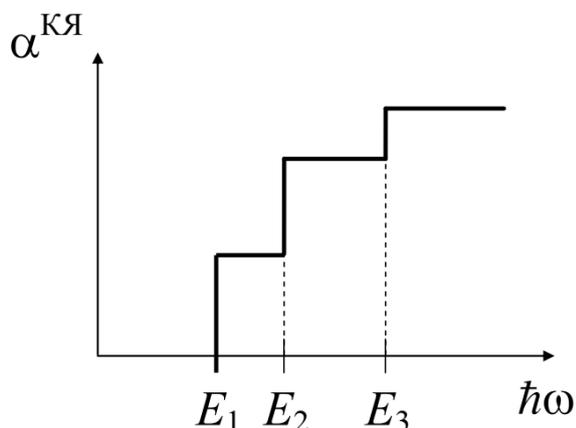
$$\alpha_B^{2d}(\hbar\nu, B, T, d) = \frac{2\pi e^2 |P_{cv}|^2}{nc\epsilon_0 m_0^2 2\pi\nu V} \frac{eB}{\pi\hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \frac{m_{op} S}{2\pi\hbar^2} \times \sum_{ij} |S_{civj}|^2 \sum_{N_L^c, N_L^v, n_Z} \exp \left[- \frac{\left(\hbar\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_{cv}^* d^2} n_Z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (11)$$

Agar, $S/V = a^{-1}$ va $A_{cv}^{2d} \approx \frac{m_{op} e^2 |P_{cv}|^2}{nc\epsilon_0 m_0^2 \hbar a}$ kabi o‘zgarmas kattaliklar kiritib olinsa, (11) ifoda qo‘yidagi ko‘rinishga keladi:

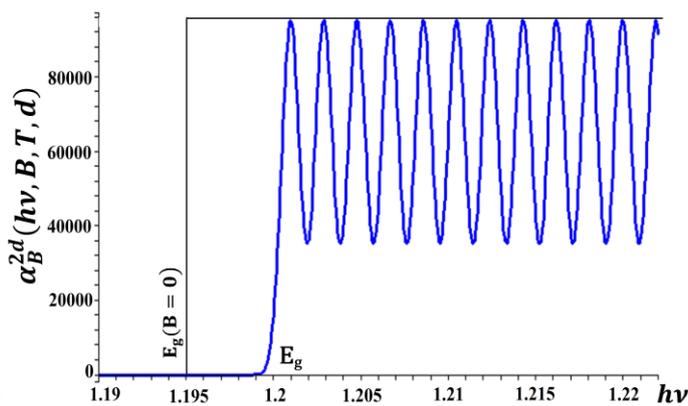
$$\alpha_B^{2d}(\hbar\nu, B, T, d) = A_{cv}^{2d} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_{op}} \cdot \frac{1}{kT} \times \sum_{ij} |S_{civj}|^2 \sum_{N_L^c, N_L^v, n_Z} \exp \left[- \frac{\left(\hbar\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_{cv}^* d^2} n_Z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (12)$$

6-rasmda, Landau sathlari soni 12 ga teng bo‘lib, uni 5-rasmdan farqi, 9 Tl magnit maydon induksiyasi ta’sirida *InGaAs* kvant o‘raning yutilish koeffitsientini ossillyatsiyalanish jarayonlari yaqqol kuzatilmoqda. Ossillyatsiya jarayonlari 5-rasmda keltirilgan E_1 energiyadan keyingi Landau sathlari hisoblanadi. Ya’ni, 5-

rasmdagi birinchi va ikkinchi “zinasimon” energetik spektrlar orasidagi diskret Landau sathlari soni 6-rasmda keltirilgan.



5 – rasm. Magnit maydon mavjud bo‘lmaganda kvant o‘rali yarimo‘tkazgichlarda optik yutilish ko‘effitsientini yutilayotgan fotonning energiyasiga bog‘liqligi.



6-rasm. InGaAs kvant o‘rali fotoelement (InGaAs/GaAs) uchun yutilish ko‘effitsientini foton energiyasiga bog‘liqligiga kvantlovchi magnit maydonning ta‘siri. Bunda, T=8 K, B=9 Tl, d=9 nm, E_g(d=9 nm)=1.2 eV.

Sababi, (12) formula $n_z=1$ (o‘lchamli kvant soni) deb hisoblangan. Matematik modelni asoslash uchun birinchi o‘lchamli kvantlar sonidan keyingi Landau sathlarini olish yetarli hisoblanadi. Bundan tashqari, 6-rasmdan ko‘rinib turibdiki, kvantlovchi magnit maydon ta‘siridagi kvant o‘raning yutilish ko‘effitsienti foton energiyasi $h\nu=1.209$ eV ga teng bo‘lganda (qizil chegara), ossillyatsiyalanish jarayoni boshlanmoqda. Bundan xulosa qilish mumkinki, (12) da keltirilgan E_1 energiya 0.09 eV ga siljimoqda. Bu esa, induksiyasi 9 Tl ga teng bo‘lgan magnit maydon energiyasiga to‘g‘ri keladi. Ya‘ni, (12) dan:

$$E_1 = E_g^{ko} + \hbar\omega_c \quad (13)$$

Bundan kelib chiqadiki, (12) formula (taklif etilayotgan model) bo‘yicha, bir qator tajriba natijalarini tushuntirishga imkon beradi.

Dissertatsiyaning «**Kvant o‘lchamli yarimo‘tkazgichli strukturalarda magnitoqarshilik ossillyatsiyalariga kuchli elektromagnit maydonning ta‘siri**» deb nomlangan to‘rtinchi bobida kvant o‘lchamli yarimo‘tkazgichlar uchun elektr o‘tkazuvchanlik ossillyatsiyalari kuchli elektromagnit maydonga bog‘liqligi tadbiiq etilgan. Kvant o‘rali geterostrukturali yarimo‘tkazgichlarda mikroto‘lqinli maydon quvvatidan (dP) magnit maydon kuchlanganligi (dH) bo‘yicha olingan birinchi va ikkinchi tartibli differensial ifodalarini ($\frac{dP}{dH}, \frac{d^2P}{dH^2}$) analitik ko‘rinishi keltirib chiqarilgan. Hajmiy va kichik o‘lchamli yarimo‘tkazgichli materiallar uchun kvant ossillyatsiya effektlarini mikro to‘lqinli maydon quvvati, kvantlovchi magnit maydon kuchlanganligi va haroratlargabog‘liqligini aniqlovchi matematik model ishlab chiqildi.

Kuchli magnit maydondagi kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi $\tau(E, B)$ quyidagicha aniqlanadi:

$$\sigma(E, B) = \frac{e^2 n_s \langle \tau(E, B) \rangle}{m^*} \quad (14)$$

Ikki o'lchovli materiallarda erkin zaryad tashuvchilarning o'rtacha relaksatsiya vaqti quyidagi ko'rinishga ega:

$$\langle \tau(E, B) \rangle = \frac{\int N_S^{2d}(E, B) \left(\frac{\partial f}{\partial E} \right) \tau(E) E dE}{n_s} \quad (15)$$

Kichik o'lchamli yarimo'tkazgichlar uchun sochilish mexanizmlarini elastik sochilish yaqinlashuvida $\tau(E, T)$ relaksatsiya vaqti hamda (14) va (15) ifodalardan foydalanib, kvant o'lchamli yarimo'tkazgichlar uchun kvantlovchi magnit maydondagi elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalarini haroratga bog'liqligi quyidagi ko'rinishga keladi:

$$\sigma_{\perp}^{2d}(E, B, T, d) = \frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi G}} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \omega_c \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_L^2 \right]}{G} \right)^2 \right] \gamma_{\perp}(k_0 T)^{\beta} E^{\alpha + \frac{3}{2}} \left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E} \right) dE \quad (16)$$

(16) va kuchli elektromagnit maydon quvvati P ni kvantlovchi magnit maydon B , kvant o'ra kengligi d , harorat T , elektr maydon kuchlanganligi E_E larga bog'liqlik munosabatini ($P^{2d}(B, T, E_E, d)$) keltirib chiqarish mumkin:

$$P^{2d}(B, T, E_E, d) = \sigma^{2d}(E, B, T, d) \cdot E_E^2 \quad (17)$$

yoki,

$$P^{2d}(H, N_L, n_z, d, E_E, T) = \frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi G}} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \frac{eH}{m^* c} \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_L^2 \right]}{G} \right)^2 \right] \gamma_{\perp}(k_0 T)^{\beta} E^{\alpha + \frac{3}{2}} \left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E} \right) dE \cdot E_E^2 \quad (18)$$

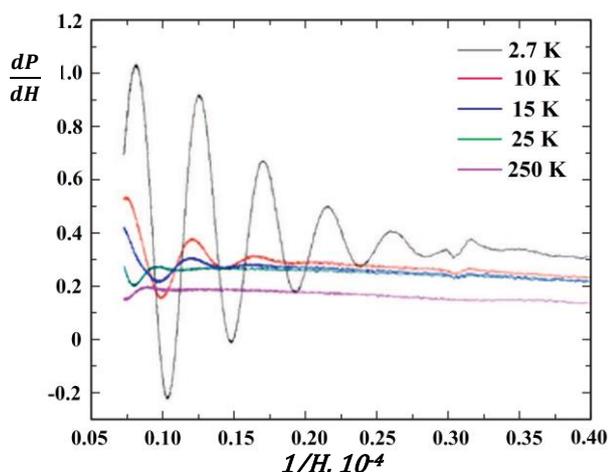
Ushbu keltirib chiqarilgan formula, bir qator tajriba natijalarini tushuntirishga va ulardan fizik jarayonlar mohiyatini izohlashga xizmat qiladi. Kvant o'rali geterostrukturalarda o'ta yuqori chastotali elektromagnit maydonning elektr o'tkazuvchanlik ossilyatsiyalari sezgirligini kuzatish maqsadida (18) formuladan magnit maydon kuchlanganligi bo'yicha birinchi tartibli hosila olinadi. Natijada (18) formula:

$$\frac{dP^{2d}(H, T, d, E_E, N_L, n_z)}{dH} = \frac{d \left[\frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi G}} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \frac{eH}{m^* c} \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_L^2 \right]}{G} \right)^2 \right] \gamma_{\perp}(k_0 T)^{\beta} E^{\alpha + \frac{3}{2}} \left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E} \right) dE \right]}{dH} \cdot E_E^2 \quad (19)$$

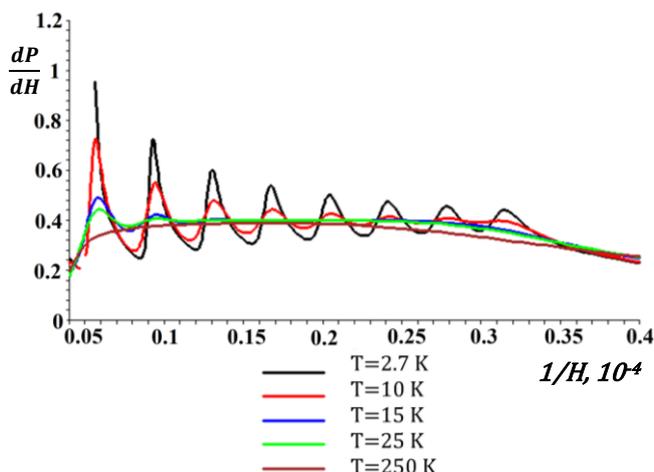
Ushbu ishda⁴ *InAs/GaSb* kvant o'ra asosidagi geterostrukturali yarimo'tkazgichlarning Shubnikov de-Gaaz ossilyatsiyalarini kuchli elektromagnit maydon va haroratga bog'liqligi tajribada aniqlangan (7-rasm). Jumladan, 7-rasmda

⁴ Kochman I.V., Mixaylova M.P., Veynger A.I., Parfen'yev R.V. FTP, 2021, T. 55, vyp.4, str.313-318.

kvant o'ra qalinligi $d=8\text{nm}$ (*GaSb* uchun) kuchli magnit maydondagi mikroto'liqlikni yutulish koefitsientini ($\frac{dP}{dH}$)ni haroratga bog'liqligi ossilyatsiyalari keltirilgan. Bu ushbu tajriba natijalari EPR ustanovkasida harorat $T=2.7\text{K} - 250\text{K}$ intervalida olingan.



7-rasm. *InAs/GaSb* kvant o'rali yarimo'tkazgichlar uchun $\frac{dP}{dH}$ ni haroratga bog'liqligi⁴.



8-rasm. *InAs/GaSb* kvant o'rali yarimo'tkazgichlar uchun $\frac{dP}{dH}$ ni haroratga bog'liqligi. Ushbu grafiklar taklif etilayotgan model bo'yicha (19) olingan

Tajribada, kuchli mikroto'liqlikni elektr maydon kattaliklari quyidagicha olingan: mikroto'liqlik chastotasi $\nu = 9.35 \text{ GGrts}$, kvant energiyasi $E = \hbar\omega = \hbar 2\pi\nu = 0.04 \text{ meV}$, elektromagnit maydon quvvati $P=1\text{mVt}$. Ushbu kattaliklar yordamida elektromagnit maydonning elektr maydon kuchlanganligini hisoblash mumkin: $E_E = \frac{\hbar 2\pi\nu}{ed} = 0.5 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{M}}$. Bundan tashqari, tajribada magnit maydon qiymati $\frac{1}{H} = 0.05 \cdot 10^{-4} \div 0.4 \cdot 10^{-4}$ ersted oralig'ida keltirilgan. Ushbu tajribada keltirilgan fizik kattaliklardan foydalanib, nazariy tahlilni boshlaymiz. Taklif etilayotgan model yordamida ((19) formula asosida) dP/dH ni $1/H$ ga bog'liqligini aniqlash mumkin. Lekin, (19) formuladan ko'rinib turibdiki, ushbu tenglama transtendent bo'lib, nazariy yo'l bilan yechimini topib bo'lmaydi. Buni, kompyuter dasturlari yordamida (Maple, Matchad, Matlab, Matematika) va grafik usulida kerakli natijalarga erishiladi. 8-rasmda yangi model bo'yicha ((19) formula) turli temperatura va $E_E = 0.5 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{M}}$, $N_L=10$ va $n_Z=1$ lar uchun dP/dH ni $1/H$ ga bog'liqligi grafigi keltirilgan. Bunda, (19) ga tajriba o'lchamli kattaliklar qo'yib, dP/dH ni $1/H$ ga bog'liqlik grafigi olingan. $kT \ll \hbar\omega_C$ sharti bajarilganligi uchun kvant ossilyatsiya amplitudalari keskin paydo bo'lmoqda.

dP/dH amplitudasining balandligi magnit maydon kuchlanganligi H qiymatiga mutanosib bo'lib, H kichiklashgan sari amplituda kamayib bormoqda. Albatta, bu qonuniyat o'zgarimas past haroratlarda bajariladi. Lekin, harorat dinamikasi ortishi bilan, $\frac{dP}{dH}$ amplitudasiga o'zgarishi $\frac{1}{H}$ emas, balki T ga bog'liq bo'lib qoladi.

XULOSALAR

Kuchli elektromagnit maydon ta'siridagi nano o'lchamli yarimo'tkazgichlarda magnitooptik yutilish koeffitsienti va magnitoqarshilik ossillyatsiyalarining haroratga bog'liqligini modellashtirish asosida quyidagi xulosalar olindi:

1. To'g'ri zonali kvant o'ra asosidagi geterostrukturalarning ikki o'lchamli kombinirlangan holatlar zichligini haroratga bog'liqligiga kuchli magnit maydonning ta'sirini hisoblash uchun yangi model ishlab chiqilgan.
2. Kuchli magnit maydonda kvant o'raning ikki o'lchamli kombinirlangan holatlar zichligini haroratga bog'liqligini "termik kengayishi" ni Gauss taqsimot funksiyasi yordamida tushuntirilgan.
3. Eksperimental natijalar kvantlovchi magnit maydonidagi kvant o'raning kombinirlangan holat zichligi ossillyatsiyasi yordamida talqin qilingan. Hisoblash natijalari har xil haroratlarda kvantlovchi magnit maydonidagi InGaN/GaN kvant o'rasiga asoslangan geterostrukturalar uchun olingan eksperimental natijalar bilan taqqoslangan.
4. Kombinirlangan holatlar zichligi ossillyatsiyalari qonuniyatidan magnitooptik yutilish mexanizmini aniqlashning yangi metodi taklif etilgan. 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 chiqilgan.
5. Kvant o'rali geterostrukturali yarimo'tkazgichlarda mikroto'lqinli maydon quvvatidan (dP) magnit maydon kuchlanganligi (dH) bo'yicha olingan birinchi va ikkinchi tartibli differensial ifodalarini ($\frac{dP}{dH}, \frac{d^2P}{dH^2}$) analitik ko'rinishi keltirib chiqarilgan.
6. Hajmiy va kichik o'lchamli yarimo'tkazgichli materiallar uchun kvant ossillyatsiya effektlarini mikro to'lqinli maydon quvvati, kvantlovchi magnit maydon kuchlanganligi va haroratlarga bog'liqligini aniqlovchi matematik model ishlab chiqilgan.
7. Kvant o'lchamli va hajmiy yarimo'tkazgichli strukturalarda olingan eksperiment natijalarini taklif qilinayotgan model asosida yuqori haroratlar dinamikasi uchun tushuntirishga imkon topilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.11.2022.FM/Т.66.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

САЙИДОВ НОЗИМЖОН АБДУЛНОСИРОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
КОЭФФИЦИЕНТА МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И
ОСЦИЛЛЯЦИИ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ В НАНОРАЗМЕРНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ СИЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО – МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Наманган – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2023.1.PhD/FM855.

Диссертация выполнена в Наманганском инженерно-технологическом институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.nammti.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель: **Эркабоев Улугбек Инаятиллаевич**
доктор физико – математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич**
доктор физико – математических наук, профессор

Носиров Муроджон Зокирович
кандидат физико – математических наук,
профессор

Ведущая организация: **Каршинский государственный университет**

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2024 года в ____ часов на заседании Научного совета PhD.03/30.11.2022.FM/Т.66.04 при Наманганском инженерно-технологическом институте по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Административное здание Наманганского инженерно-технологического института, 3-здание, 2-этаж, малый зал совещаний, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Наманганского инженерно-технологического института (зарегистрирована за № ____) по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75.

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2024 г.
(протокол рассылки № ____ от « ____ » _____ 2024 г.)

М.Г.Дадамирзаев
Заместитель председателя
Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф-м.н.,
профессор

А.А.Абдукаримов
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
PhD., доцент

Н.Ю. Шарипбаев
Председатель научного семинара
при Научном совете по
присуждению ученых степеней,
д.ф-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время большое внимание уделяется изучению квантовых эффектов и магнитооптических свойств искусственно созданных магнитных наноструктур, таких как полупроводниковые структуры на основе квантовых ям, спинтронные и магнитофотонные кристаллы, нанокомпозиты. В частности, магнитооптические и магниторезистивные осцилляции весьма эффективны для изучения различных свойств и характеристик квантоворазмерных гетероструктур, которые позволяют определять спиновую поляризацию свободных носителей заряда в новых магнитных полупроводниках и перспективных материалах спинтроники. Поэтому исследование зависимости квантовых магнитных эффектов от температуры, сильных электромагнитных и квантующих магнитных полей в наноразмерных полупроводниковых структурах представляет особый научный и практический интерес для ряда передовых ученых. Особенно важно определить температурную зависимость коэффициента магнитооптического поглощения и осцилляций магнитосопротивления квантоворазмерных гетероструктурных полупроводников под действием СВЧ-поля, управлять ими и решать задачи повышения стойкости этих полупроводниковых материалов к внешним факторам.

В глобальном масштабе существует необходимость совершенствования технологии получения магнитных наноструктурированных полупроводниковых приборов, с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям, а также определения характеристик совокупной плотности состояний и осцилляций магнитосопротивления.

В нашей Республике особое внимание уделяется развитию науки, в том числе исследованию влияния внешних факторов на квантовые магнитные эффекты таких как, электрические, магнитные и оптические свойства наноструктурированных полупроводников. На основе этих фундаментальных исследований, важных для развития науки и ее более практического применения в нашей стране, разработана новая стратегия развития Узбекистана на 2022-2026 годы, где поставлены задачи, как «Обеспечение экономики непрерывной электроэнергией и активное внедрение технологий «Зеленой экономики» во все отрасли, повышающее энергоэффективность экономики на 20%»⁵. В частности, с помощью математических моделей важно изучить возможность управления осцилляциями поперечного магнитосопротивления и электропроводности низкоразмерных полупроводниковых структур на свету и в темноте под действием различных магнитных полей и температур.

Постановление Президента Республики Узбекистан от 9 сентября 2022 года УП-220 «О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии малой мощности», от 9 апреля 2021 года .УП-5063 «О мерах по развитию возобновляемой и водородной энергетики в Республике Узбекистан», УП-5032 от 19 марта 2021

⁵ Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года №ПФ-60 «О новой стратегии развития Узбекистана на 2022-2026 годы»

года «Меры по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики» и решение от 10 июля 2020 года УП-4779 «О дополнительных мерах по повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от продукции топливно-энергетического комплекса путем привлечения имеющихся ресурсов» и реализации задач, определенных в других нормативных актах нормативно-правовых документов, связанных с этой деятельностью, в определенной степени помогает данное диссертационное исследование.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данные исследования проводились в рамках приоритетного направления Ф2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» развития науки и технологий республики.

Степень изученности проблемы. В настоящее время с большим интересом изучаются температурные зависимости коэффициента магнитооптического поглощения и осцилляций магнитосопротивления в наноразмерных полупроводниках под действием сильного электромагнитного поля. Ведущие ученые мира Н.Ф. Мотт, Д.Г. Зейлер, К.Т. Шиндо, Р.П. Сейсян, В.Я. Алешкин, А.Л. Эфрос, Най-Чуан Чен, Е.И.Зенкевич, Ю.И.Гальперин, А.И.Веингер, а также известные узбекские ученые М.К.Бахадирханов, С.З. Зайнабидинов, Р.А. Муминов, Т.С.Шамирзаев, Г.Гулямов и другие исследовали осцилляции магнитосопротивления и магнитооптики квантоворазмерных полупроводниковых структур в зависимости от температуры и сильного электромагнитного поля. Ряд Тайваньских ученых под руководством Най-Чуана Чена экспериментально определили зависимость комбинированной плотности состояний гетероструктурных полупроводников *InGaN/GaN* с квантовой ямой от трех разных длин волн (фиолетового, синего и зеленого) излучения. На низкоэнергетическом комбинированной плотности состояний, соответствующих комбинированным состояниям, в приграничных областях разрешенных зон появляются «хвосты», наличие которых приводит к расширению энергетического спектра гетероструктур с квантовой ямой. Однако в этих работах не применялось влияние температуры и магнитного поля на плотность комбинированных состояний. Зависимость осцилляций магнитосопротивления от сильного микроволнового поля и температуры с квантовой ямой *InAs/GaSb* была изучена рядом российских ученых под руководством А.И.Вайнгера. При этом определялись дифференциальные $\left(\frac{d^2P}{dH^2}\right)$ осцилляции напряженности (P) электромагнитного поля СВЧ второго порядка относительно напряженности магнитного поля (H) в зависимости от магнитного поля и температуры. Однако в этих исследованиях не была разработана идеальная модель, объясняющая экспериментальные результаты. В настоящее время среди ученых нашей страны Г. Гуломов и его ученики показали возможности расчета коэффициента магнитооптического поглощения и зависимости осцилляций магнитосопротивления от внешних факторов как практически, так и теоретически. Однако в этих работах температурная зависимость квантовых эффектов наблюдалась только для объемных полупроводниковых структур.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.

Диссертационные исследования выполнены в рамках фундаментального проекта Наманганского инженерно-технологического института по плану научно-исследовательских работ ФЗ-2020092433 (2022-2026 гг.) на тему «Определение коэффициентов магнитосопротивления, магнитопоглощения и магнитооптического поглощения в наноструктурных полупроводниках при высоких температурах и сильных СВЧ-поле».

Цель исследования – моделирование температурной зависимости коэффициента магнитооптического поглощения и осцилляций магнитосопротивления в наноразмерных полупроводниках под действием сильного электромагнитного поля.

Задачи исследования: в соответствии с поставленной необходимо было решить следующие задачи:

температурная зависимость двумерных осцилляций плотности комбинированных состояний в разрешенной зоне квантовой ямы под действием квантующего магнитного поля;

разработка новой модели расчета влияния квантующего магнитного поля на температурную зависимость плотности двумерных комбинированных состояний в гетероструктуре на основе прямозонной квантовой ямы;

на основе предложенной модели вывести общее математическое выражение, рассчитывающее температурную зависимость магнитооптического коэффициента поглощения полупроводников с квантовой ямой;

исследование температурной зависимости осцилляций магнитосопротивления квантоворазмерных полупроводников под действием сильного электромагнитного поля;

исследование поглощения СВЧ-излучения в полупроводниковых структурах при высоких температурах с использованием экспериментальных результатов осцилляций на основе предложенной математической модели;

В качестве **объекта исследования** были выбраны гетероструктурные полупроводники с квантовыми ямами.

Предметом исследования являются комбинированная плотность состояний, коэффициент магнитооптического поглощения и осцилляции дифференциального магнитосопротивления второго порядка по индукции магнитного поля.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи в процессе исследования использованы методы приближения теоретической физики, метод разложения дельта-функций в ряд, численный расчет сложных математических выражений, полученных путем решения дифференциальных уравнений первого и второго порядка (с помощью программы Maple).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые температурная зависимость межзонных осцилляций коэффициента магнитооптического поглощения в прямозонных наноструктурных

полупроводниках основана на методе разложения в ряд дельта-функций комбинированной плотности состояний ;

предложен новый метод расчета температурной зависимости комбинированной плотности состояний квантовых полупроводников в сильном магнитном поле;

разработана математическая модель температурной зависимости двумерных осцилляций плотности комбинированных состояний;

найжены новые аналитические выражения, выражающие температурную зависимость осцилляций электропроводности гетероструктурных полупроводников с квантовыми ямами в электромагнитном поле сверхвысокой частоты;

С помощью предложенной модели получены дифференциальные уравнения зависимости осцилляций квантового эффекта полупроводников с прямозонной наноструктурой от температуры, напряженности магнитного поля и мощности сильных электромагнитных волн и на их основе объяснены экспериментальные результаты.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан метод определения температурной зависимости коэффициентов магнитооптического поглощения гетероструктурных полупроводников с квантовыми ямами;

создана компьютерная программа для определения температурной зависимости осцилляций магнитосопротивления наноструктурированных полупроводников под воздействием сильного электромагнитного поля.

Достоверность результатов исследований: результаты теоретических расчетов осцилляций электропроводности низкоразмерных полупроводниковых структур согласуются с экспериментами, а также применение полученных при низких температурах осцилляций дифференциального магнитосопротивления с использованием экспериментальных значений при высоких температурах объясняется разработанной математическое моделирование.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость полученных в исследовании результатов заключается в том, что предложенная математическая модель позволяет объяснить световую и температурную зависимость осцилляций поперечного магнитосопротивления в малых полупроводниковых структурах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что предложенные методы моделирования могут быть использованы при создании новых гетероструктур с квантовой ямой и наноразмерных магнитодиодов.

Внедрение результатов исследования. На основе моделирования температурной зависимости коэффициента магнитооптического поглощения и осцилляций магнитосопротивления в наноструктурированных полупроводниках под действием сильного электромагнитного поля были:

Применены результаты для расчета температурной зависимости коэффициента магнитооптического поглощения наноструктурированных полупроводников в практическом проекте №19-02-00098 на тему «Квантовые точки с непрямозонными полупроводниками: динамика и рекомбинация

локализованные спины экситонов» (справка № 15307-26-6804 от 9 января 2024 г. Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН). Использование научных результатов позволило увеличить в проекте коэффициент магнитооптического поглощения квантоворазмерных полупроводников на 1,3%;

результаты, полученных при определении температурной зависимости осцилляций квантового эффекта в наноразмерных полупроводниках в электромагнитном поле сверхвысокой частоты были использованы при выполнении фундаментального гранта ОТ-ФФ2-71 по теме «Исследование влияния света на вольт-амперную характеристику деформированного p-n перехода в электромагнитном поле сверхвысокой частоты» (справка №06/10-09/122 Наманганского инженерно-строительного института от 8 февраля 2024 года). Используя научные результаты удалось уменьшить размеры магнитосопротивления в проекте на 3,5%;

Апробация результатов исследования. Результаты исследований обсуждались на 18 научно-практических конференциях, в том числе 11 международных и 7 национальных.

Опубликованность результатов исследования. Всего по теме диссертации 36 научных работ, в том числе 2 монографии, 14 научных статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации основных научных результатов докторских диссертаций ВАК Республики Узбекистан, 6 в зарубежных международных журналах, включенных в базу данных Scopus, также 2 сертификата на ПО для ЭВМ по теме исследования.

Структура и объём диссертации. Состав диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составил 101 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В введении диссертации обосновывается актуальность и необходимость проводимого исследования, описываются цель и задачи исследования, а также объекты и предметы, его соответствие приоритетным направлениям развития науки и техники Республики Узбекистан, описаны научная новизна и практические результаты исследований, раскрыта научная и практическая значимость результатов, внедрение результатов исследований в практику, опубликованы работы и сведения о структуре.

В первой главе диссертации **«Квантовые осцилляционные явления в наноразмерных полупроводниках в сильном электромагнитном поле»** проводится литературный обзор, в котором анализируются тенденции исследования влияния сильной электромагнитной волны и температуры на коэффициент магнитооптического поглощения, комбинированную плотность состояний и осцилляции магнитосопротивления в наноструктурированных полупроводниках. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулирована постановка задачи.

Во второй главе диссертации под названием **«Определение зависимости плотности двумерных комбинированных состояний от внешних факторов (температуры и магнитного поля) в квантово-размерных**

гетероструктурах» исследованы зависимости осцилляций комбинированных плотностей состояния в гетероструктурах на основе прямоугольных квантовых ям, от сильного магнитного поля. Изучено влияние квантующего магнитного поля на температурную зависимость комбинированных плотностей состояний в гетероструктурах с прямой запрещенной зоной. Разработана новая математическая модель для расчета температурной зависимости двумерной комбинированной плотности состояний квантовых ям в квантующих магнитных полях. Предложенная модель объяснила экспериментальные результаты в наноразмерных прямозонных параболических полупроводниках.

Если состояния электрона и дырки в структурах с квантовыми ямами квантованы по размерам по всем трем компонентам квазиимпульса, то комбинированная плотность состояний в разрешенной зоне такой структуры имеет вид функции Гаусса. Тогда комбинированная плотность состояний $\delta(E)$ выражается так называемой дельта-функцией Дирака:

$$N_{jds}^{0d}(E) = \sum_{l,m,n} \delta(E - E_{lmn}) \quad (1)$$

Комбинированная плотность состояний состоит из бесконечного набора коротких и высоких пиков. При наличии сильного магнитного поля закон сохранения энергии используется вместо закона параболической дисперсии для расчета плотности комбинированных состояний квантовой ямы. Для $E_c^{2d}(B, d, n_Z)$ и $E_v^{2d}(B, d, n_Z)$, исключая спин, магнитооптические переходы подчиняются закону сохранения энергии:

$$\begin{aligned} E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z) &= E_c^{2d}(B, d, n_Z) - E_v^{2d}(B, d, n_Z) \\ E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z) &= E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega_c^v + \frac{\hbar^2\pi^2}{2m_{cv}^*d^2} n_Z^2 \\ & \quad hv \geq E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь N_L^c, N_L^v - число уровней Ландау носителей заряда в разрешенной зоне квантовой ямы; ω_c^c, ω_c^v - циклотронная частота магнитного поля в зонах проводимости и валентной зоне квантовой ямы; d — толщина квантовой ямы; n_{eZ}, n_{vZ} — порядковые номера уровней квантования электронов и дырок вдоль оси Z соответственно; считаем, что электронная и валентная зоны симметричны, тогда условие $n_{eZ} = n_{vZ} = n_Z$ выполняется; $m_s^c g_c \mu_B H, m_s^v g_v \mu_B H$ - энергия спина в разрешенной зоне; $E_g^{2d}(0)$ — ширина запрещенной зоны квантовой ямы при абсолютном нуле температуры; V — индукция магнитного поля, $h\nu$ - поглощенная энергия фотона, $\frac{1}{m_{cv}^*} = \frac{1}{m_c^*} + \frac{1}{m_v^*}$ - комбинированная (приведенная) эффективная масса. Вдоль оси OZ сильное магнитное поле не меняет соотношения между энергией и волновым вектором носителей заряда. Однако при движении носителей заряда в направлении, перпендикулярном магнитной индукции (в плоскости XY), прежний квазинепрерывный ряд энергетических уровней заменяется системой дискретных уровней Ландау. Поскольку эффективные массы электронов и дырок считаются равными, расстояние между уровнями Ландау не зависит от квантового числа и равно $\hbar\omega_s$. Итак, движение

свободных электронов и дырок в зонах проводимости и валентной зоне квантовой ямы ограничено во всех трёх направлениях. Под воздействием квантующего магнитного поля квантовая яма превращается в аналог квантовой точки. По формуле (1) в аргументе $\delta(E - E_{lmn})$, заменив E на $\hbar\nu$ и E_{lmn} на $E_{cv}^{2d}(B, d, n_z)$, получим:

$$N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)) = \frac{eB}{\pi\hbar} \sum_{N_L^c, N_L^v, n_z} \delta(\hbar\nu - E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)) \quad (3)$$

Из формулы (3) ясно, что при $\hbar\nu > E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z)$ плотность объединенных состояний как функция энергий отражает дельта-подобный характер. Эксперименты показывают, что плотности состояний электронов и дырок зависят от температуры. Температурная зависимость плотности состояний электронов и дырок в квантовой среде объясняется тепловым расширением дискретных уровней Ландау. При достаточно высоких температурах плотность состояний электронов в зоне проводимости квантовой катушки превращается из дискретного уровня Ландау в непрерывный энергетический спектр. При низких температурах, помимо разделения непрерывного энергетического спектра на уровни Ландау, квантующее магнитное поле оказывает сильное влияние на плотность состояний квантовой запрещенной зоны. В этом случае при повышении температуры столкновения носителей заряда и тепловое движение «сбрасывают» дискретные уровни Ландау в непрерывный спектр плотности состояний квантового порядка. Отсюда следует, что температурную зависимость дискретных уровней носителей заряда Ландау можно выразить, разложив плотность объединенных состояний квантовых состояний в ряд дельта-функций. Температурную зависимость межзонных колебаний магнитооптического поглощения в гетероструктурах с квантовыми катушками можно объяснить, изучая двумерную комбинированную плотность состояний путем разложения ее на ряд дельта-функций. Когда $T=0$, функция распределения Гаусса имеет дельта-образную форму и определяется следующим выражением:

$$Gauss(E, T) = \frac{1}{kT} \cdot \exp\left(-\frac{(E - E_i)^2}{(kT)^2}\right) \quad (4)$$

Кроме того, для представления межзонного магнитооптического поглощения обычно предполагается, что параметр «теплового размытия» каждого энергетического спектра квантовой ямы расширяется по закону Гаусса. Такой подход приводит к представлению плотности двумерных комбинированных состояний квантовой ямы через температуру.

Отсюда следует, что при конечной температуре T расчет наноразмерных полупроводниковых структур можно свести к разложению в ряд $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z))$. Формула (3) не учитывает тепловое расширение плотности двумерных комбинированных состояний. Но, если разложить $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_z))$ в ряд по формуле (4), то можно рассчитать

температурную зависимость двумерной комбинированной плотности состояний в разрешенной зоне квантовой ямы. При $T=0$ формула (4) принимает вид следующей дельта-функции:

$$Gauss(E, E_i, T) \xrightarrow{T \rightarrow 0} \delta(E - E_i) \quad (5)$$

Таким образом, из формул (2), (2), (4) и (5) следует, что при приложении квантующего магнитного поля температурная зависимость комбинированной плотности состояний квантовой ямы приводит к следующему аналитическому выражению:

$$N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z)) = \frac{eB}{\pi\hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \sum_{N_L^c, N_L^v, n_z} \exp \left[- \frac{\left(\hbar\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c + \frac{\hbar^2\pi^2}{2m_{cv}^*d^2} n_z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right]$$

Здесь $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z))$ – температурная зависимость осцилляций комбинированной плотности состояний в разрешенной зоне квантовой ямы, под влиянием сильного магнитного поля. Эта новая аналитическая формула представляет температурную зависимость двумерной комбинированной плотности состояний в гетероструктурах с квантовой точкой в квантующем магнитном поле. Полученное выражение удобно для обработки экспериментальных данных межзонных осцилляций магнитооптического поглощения в квантовых ямах при различных магнитных полях и температурах. Таким образом, создана математическая модель, отражающая влияние внешних факторов (температуры и магнитного поля) на плотность двумерных комбинированных состояний в наноразмерных полупроводниковых структурах. В данной работе⁶ были получены *GaAs/AlGaAs* — высококачественные гетероструктуры с квантовой ямой, толщиной 14 нм, с небольшой (3%) примесью алюминия в барьерных слоях. Эти гетероструктуры исследовались при температуре 4К. В отсутствие магнитного поля ширина запрещенной зоны квантовой ямы *GaAs* составляет 1,464 эВ (рис. 1). На рис. 1 представлена зависимость двумерной комбинированной плотности состояний от энергии поглощения фотонов для квантовой ямы *GaAs* $d=14$ нм ($n_z=1$) при температуре $T=4$ К и квантующем магнитном поле $B=9$ Тл. Этот график построен на основе численных расчетов, выполненных по формуле (6). На рисунке 1 количество дискретных уровней носителей заряда Ландау равно 14. Эти пики представляют собой дискретные уровни носителей заряда Ландау ($N_L^{cv}=14$), наблюдаемые в разрешенной зоне квантовой ямы *GaAs*. Он показывает двумерных комбинированных плотности состояний в квантующем магнитном поле

⁶ А.В. Михайлов, А.В. Трифонов, О.С. Султанов, И.Ю. Югова, И.В. Игнатъев. *Semiconductors*. 2022, Vol.56, No.7, pp. 672-676

$\hbar\omega_c = 0,02 \text{ eV}$ при $T=4\text{K}$, $kT=4,10^{-4} \text{ эВ}$, $\frac{\hbar\omega_c}{kT} = 50$, $kT \ll \hbar\omega_c$. При этом «термическое размытие» уровней Ландау носителей заряда очень слабое, а отклонений от идеальной формы для двумерной комбинированной плотности состояний не наблюдается. На этом графике валентная зона и зона проводимости рассматриваются как симметричные энергетические спектры. При этом дискретные уровни Ландау дырок от исходного $N_{L(V)}=0$ до $N_{L(V)}=6$ находятся выше потолка валентной зоны квантовой ямы.

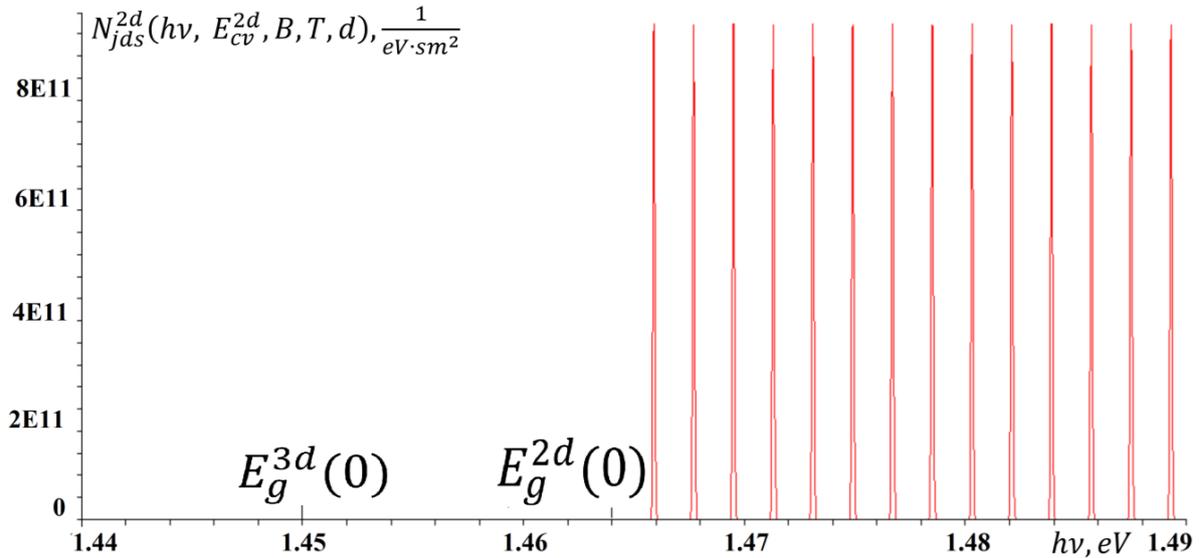


Рисунок 1. Зависимость двумерной комбинированной плотности состояний от энергии поглощения фотонов в гетероструктурах квантовой ямы $GaAs/AlGaAs$ ($d=14 \text{ нм}$) при температуре $T=4 \text{ К}$ и в квантующем магнитном поле $B=9 \text{ Тл}$

На рис. 2 показано влияние температуры на зависимость двумерной комбинированной плотности состояний от энергии поглощения фотонов в прямозонных гетероструктурах с квантовой ямой $GaAs/AlGaAs$ ($d=14 \text{ нм}$) под действием квантующего магнитного поля. Здесь число индукции квантующего магнитного поля равно 9Тл , а графики $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_g^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z))$ были построены для температур 4 К , 20 К , 40 К , 60 К , и 77 К . Как видно из рисунка, с ростом температуры острые пики уровней Ландау становятся более сглаженными, а при достаточно высоких температурах дискретные энергетические плотности состояний переходят в непрерывные энергетические спектры. Эти результаты были получены для случая, когда толщина квантовой ямы и магнитные поля постоянны. С ростом температуры острые пики уровней Ландау носителей заряда сглаживаются (рис. 2) и постепенно исчезают при $kT \approx \hbar\omega_c^{cv}$. Также при достаточно высоких температурах, т.е. $kT > \hbar\omega_c^{cv}$, $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_z))$ становятся непрерывной комбинированной плотностью состояний квантовой ямы и перестает чувствовать эффект квантующего магнитного поля. Кроме того, с ростом температуры постепенно сглаживаются острые пики уровней Ландау носителей заряда, связанные с квантованием энергетических уровней электронов и дырок в разрешенной зоне

квантовой ямы. Это приводит к тому, что дискретные уровни Ландау носителей заряда квантовой ямы при $T=40\text{K}$, $kT=3,5\cdot 10^{-3}\text{ eV}$, $kT \approx \hbar\omega_c^{cv}$. При 77K незаметны и идентичны двумерной комбинированной плотности состояний в отсутствие магнитного поля. Отсюда следует, что двумерная комбинированная плотность состояний в зонах проводимости и валентной зоне квантовой ямы наблюдается при $kT < \hbar\omega_c^{cv}$.

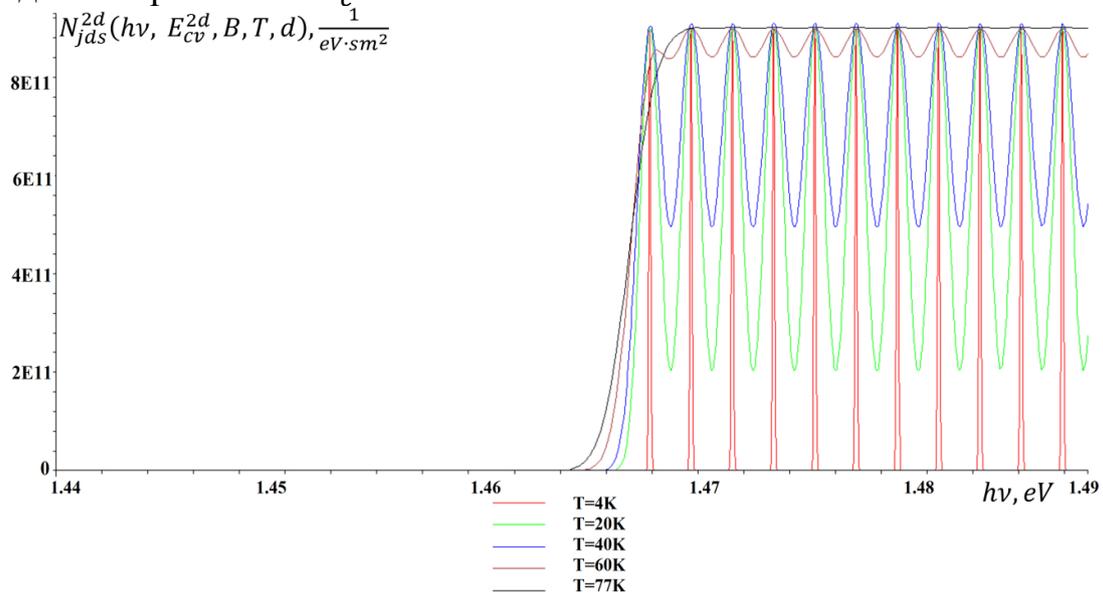


Рисунок 2. Влияние температуры на зависимость двумерной комбинированной плотности состояний от энергии поглощения фотонов в прямозонных гетероструктурах GaAs/AlGaAs ($d=14\text{ нм}$) под действием квантующего магнитного поля $B=9\text{ Тл}$.

В данной работе⁷ исследована двумерная комбинированная плотность состояний гетероструктур на основе квантовых ям *InGaN/GaN* с различной длиной волны (фиолетового, синего, зеленого) излучения, работающих при разных токах (рис. 3). Результаты показывают, что синий сдвиг излучения при подаче тока связан с изменением двумерной комбинированной плотности состояний. В данной работе найдена зависимость двумерной комбинированной плотности состояний квантовой ямы *InGaN/GaN* от поглощения фотонов в отсутствие магнитного поля и при температуре $T=300\text{ K}$. Здесь ширина запрещенной зоны квантовой ямы *InGaN/GaN* равна $E_g(0)=3,2\text{ эВ}$.

Применим предложенную новую модель к материалу *InGaN/GaN*. На рис. 4 показано влияние квантующего магнитного поля на зависимость энергии поглощённых фотонов от осцилляций комбинированной плотности состояний в полупроводнике с квантовой ямой *InGaN/GaN* для различных температур. Здесь $B=10\text{Тл}$, $T=300\text{K}$, 77 K и 5K . Как видно из рисунков 3 и 4, результаты, полученные при комнатной температуре, оказываются практически одинаковыми при применении магнитного поля и при отсутствии таковой. Это доказывает, что применение новой модели подчиняется некоторым законам, а

⁷ Yu-Shou Wang, Nai-Chuan Chen, Chun-Yi Lu, Jenn-Fang Chen. *Physica B*. 2011. Vol.406. Iss.22. pp. 4300–4303.

значит, предложенная модель корректна. Используя формулу (6), можно наблюдать осцилляции двумерной комбинированной плотности состояний даже при различных низких температурах (рис. 4).

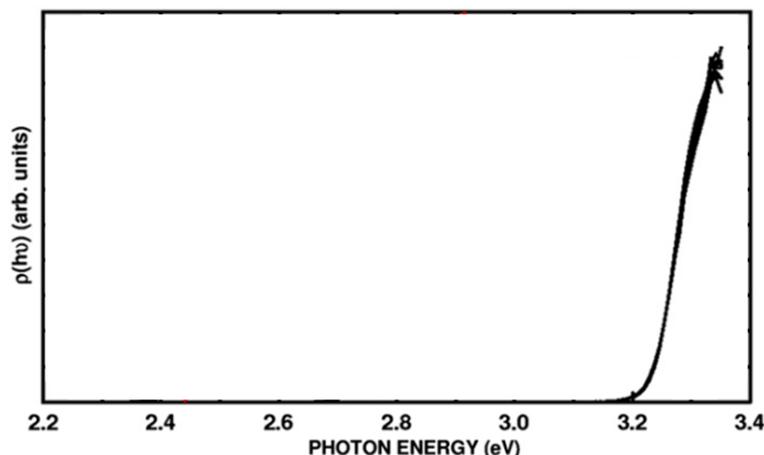


Рисунок 3. Зависимость энергии поглощенных фотонов от комбинированной плотности состояний в прямозонном полупроводнике InGaN/GaN при T=300 К и B=0³.

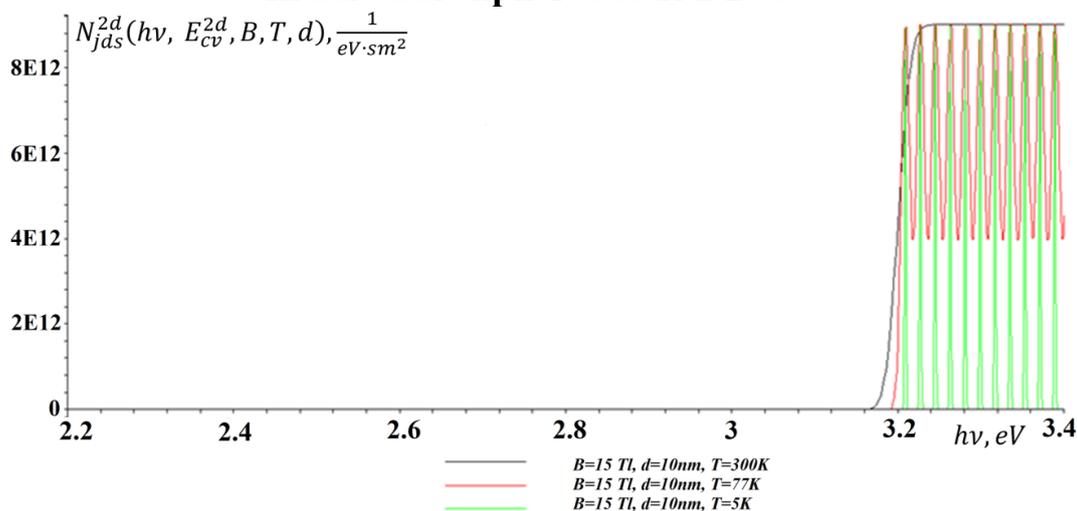


Рисунок 4. Влияние температуры и квантующего магнитного поля на зависимость энергии поглощенных фотонов от комбинированной плотности состояний в полупроводнике с прямозонными квантовыми ямами InGaN/GaN.

В третьей главе диссертации «Моделирование температурной зависимости коэффициентов магнитооптического поглощения в прямозонных наноструктурных полупроводниках» применена температурная зависимость коэффициентов магнитооптического поглощения в прямозонных наноструктурных 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 полупроводниковых материалов с прямой запрещенной зоной.

$$\alpha(\omega) = \frac{2\hbar\omega}{nc\varepsilon_0 F_0^2 V} \sum_{i,j} \sum_k w_{ji}(k) [f_0(E_{jk}) - f_0(E_{ik})] \quad (7)$$

Здесь,

$$w_{ji}(k) = \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{eF_0}{2m_0\omega} \right)^2 |P_{ij}(k)|^2 \delta(E_{ik} - E_{jk} - \hbar\omega) \quad (8)$$

Выражение (8) означает вероятность оптического перехода электрона из состояния волновой функции ψ_{jk} в состояние ψ_{ik} . С учетом (7), (8) и коэффициента поглощения света для оптических переходов в окрестности пограничных зон, таких как потолок валентной зоны (V_j) и дно зоны проводимости (C_i) (вблизи точки $k=0$) частотная зависимость определяется следующим выражением:

$$\alpha(\omega) \cong \frac{C}{\omega} \sum_{i,j} |P_{civj}|^2 \rho_{civj}(\omega) \quad (9)$$

Здесь C — коэффициент пропорциональности, слабо зависящий от частоты в приграничных зонах разрешенной зоны с учетом показателя преломления. ρ_{civj} — импульс матричного элемента. $\rho_{civj}(\omega)$ — частотно-зависимая комбинированная плотность состояний. Комбинированная плотность состояний наноструктурных полупроводников определяется разложением в ряд дельта-функций в зависимости от частоты света (посмотрите на выражения (5) и (6)). Если упростить данную задачу, т. е. не учитывать изменение импульса матричного элемента, то для рассматриваемой зоны подходит только закон параболической дисперсии (эффективная масса заряженных частиц не меняется) и самое главное, если считать зону проводимости и валентную зону симметричными относительно друг друга, то коэффициент межзонного магнитооптического поглощения $\alpha^{2d}(\omega, B, T, d)$, можно будет определить через $N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_Z))$. Учитывая приведенные выше выражения (6) и (9) выведем новую аналитическую формулу, определяющую зависимость коэффициента магнитооптического поглощения в квантоворазмерной прямозонной полупроводнике от температуры и сильного магнитного поля:

$$\alpha_B^{2d}(\hbar\nu, B, T, d) = \frac{2\pi e^2 |P_{cv}|^2}{nc\varepsilon_0 m_0^2 2\pi\nu V} \sum_{ij} |S_{civj}|^2 N_{jds}^{2d}(\hbar\nu, E_{cv}^{2d}(B, T, d, N_L^{cv}, n_Z)) \quad (10)$$

или

$$\alpha_B^{2d}(\hbar\nu, B, T, d) = \frac{2\pi e^2 |P_{cv}|^2}{nc\varepsilon_0 m_0^2 2\pi\nu V} \frac{eB}{\pi\hbar} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \frac{m_{op} S}{2\pi\hbar^2} \times \sum_{ij} |S_{civj}|^2 \sum_{N_L^c, N_L^v, n_Z} \exp \left[- \frac{\left(\hbar\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_{cv}^* d^2} n_Z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (11)$$

Если ввести постоянные величины, такие как $S/V = a^{-1}$ и $A_{cv}^{2d} \approx \frac{m_{op} e^2 |P_{cv}|^2}{nc\varepsilon_0 m_0^2 \hbar a}$, то выражение (11) будет выглядеть так:

$$\alpha_B^{2d}(\hbar\nu, B, T, d) = A_{cv}^{2d} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_{op}} \cdot \frac{1}{kT} \times \sum_{ij} |S_{civj}|^2 \sum_{N_L^c, N_L^v, n_Z} \exp \left[- \frac{\left(\hbar\nu - \left(E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_{cv}^* d^2} n_Z^2 \right) \right)^2}{(kT)^2} \right] \quad (12)$$

На рис. 6 число уровней Ландау равно 12, и в отличие от рис. 5, здесь осцилляции коэффициента поглощения квантовой ямы *InGaAs* под действием индукции магнитного поля 9 Тл четко наблюдаются. Осцилляционные процессы представляют собой уровни Ландау после энергии E_1 , представленные на рис. 5. То есть, на рис. 6 показаны количество дискретных уровней Ландау между первым и вторым «лестничным» энергетическим спектром с рис. 5.

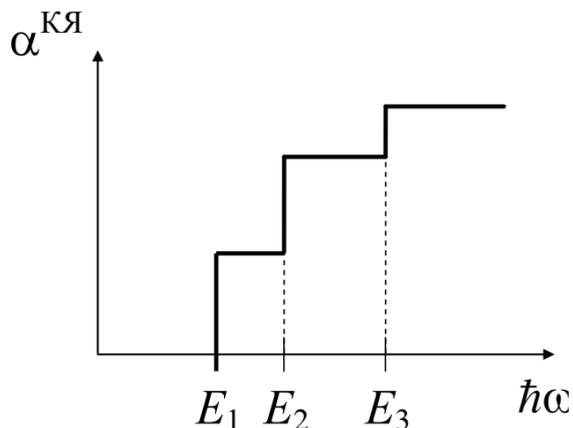


Рисунок 5. Зависимость коэффициента оптического поглощения от энергии поглощенного фотона в полупроводниках с квантовой ямой в отсутствие магнитного поля.

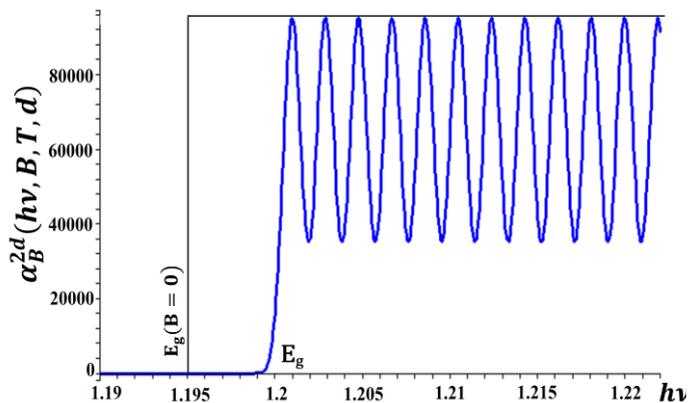


Рисунок 6. Влияние квантующего магнитного поля на энергетическую зависимость коэффициента поглощения фотоэлемента *InGaAs* с квантовой ямой (*InGaAs/GaAs*). Здесь $T=8$ К, $B=9$ Тл, $d=9$ нм, $E_g(d=9 \text{ нм})=1,2$ эВ.

Причина в том, что формула (12) рассчитывается как $n_z=1$ (размерное квантовое число). Достаточно получить уровни Ландау после квантового числа первого измерения, чтобы оправдать математическую модель. Кроме того, как видно из рис. 6, когда коэффициент поглощения квантовой ямы под действием квантующего магнитного поля равен энергии фотона $\hbar\nu=1.209$ эВ (красный предел), начинается осцилляционный процесс. Можно сделать вывод, что энергия E_1 , заданная в (12), сдвинута на 0,09 эВ. Это соответствует энергии магнитного поля с индукцией, равной 9 Тл. То есть из (12):

$$E_1 = E_g^{k_0} + \hbar\omega_c \quad (13)$$

Отсюда следует, что формула (12) (предложенная модель) позволяет объяснить ряд экспериментальных результатов.

В четвертой главе диссертации, озаглавленной «**Влияние сильного электромагнитного поля на осцилляции магнитосопротивления в квантоворазмерных полупроводниковых структурах**», применена зависимость осцилляций электропроводности квантоворазмерных полупроводников от сильного электромагнитного поля. Дифференциальные выражения первого и второго порядка $(\frac{dP}{dH}, \frac{d^2P}{dH^2})$ полученные из напряженности микроволнового поля (dP) через напряженность магнитного поля (dH) в гетероструктурных полупроводниках с квантовой ямой, были выведены в аналитическом виде. Разработана математическая модель, определяющая зависимость квантово-осцилляционных эффектов от напряженности СВЧ-поля,

квантующего магнитного поля и температуры для объемных и низкоразмерных полупроводниковых материалов.

Электропроводность $\tau(E, B)$ гетероструктурных полупроводников с квантовыми ямами в сильном магнитном поле определяется следующим образом:

$$\sigma(E, B) = \frac{e^2 n_s \langle \tau(E, B) \rangle}{m^*} \quad (14)$$

Среднее время релаксации свободных носителей заряда в двумерных материалах имеет следующий вид:

$$\langle \tau(E, B) \rangle = \frac{\int N_S^{2d}(E, B) \left(\frac{\partial f}{\partial E} \right) \tau(E) E dE}{n_s} \quad (15)$$

Для описания механизмов рассеяния низкоразмерных полупроводников в приближении упругого рассеяния мы используем время релаксации $\tau(E, T)$ и выражения (14), (15) для определения температурной зависимости осцилляций электропроводности в квантующем магнитном поле для полупроводников квантового размера будут, которые будут выглядеть так:

$$\sigma_{\perp}^{2d}(E, B, T, d) = \frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{G} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \omega_c \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_L^2 \right]}{G} \right)^2 \right] \gamma_{\perp}(k_0 T)^{\beta} E^{\alpha + \frac{3}{2}} \left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E} \right) dE \quad (16)$$

Используя (16), квантующее магнитное поле B , ширину квантового поля d , температуру T , напряженность электрического поля E_E , можем вывести мощность СВЧ поля, как $(P^{2d}(B, T, E_E, d))$:

$$P^{2d}(B, T, E_E, d) = \sigma^{2d}(E, B, T, d) \cdot E_E^2 \quad (17)$$

или,

$$P^{2d}(H, N_L, n_z, d, E_E, T) = \frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{G} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \frac{eH}{m^* c} \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_L^2 \right]}{G} \right)^2 \right] \gamma_{\perp}(k_0 T)^{\beta} E^{\alpha + \frac{3}{2}} \left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E} \right) dE \cdot E_E^2 \quad (18)$$

Эта выведенная формула служит для объяснения ряда экспериментальных результатов и на их основе интерпретирует природу физических процессов. Для расчета чувствительности осцилляций электропроводности сверхвысокочастотного электромагнитного поля в гетероструктурах с квантовой ямой, с формулы (18) вычисляем производную первого порядка по напряженности магнитного поля. В результате формула (18) превращается:

$$\frac{dP^{2d}(H, T, d, E_E, N_L, n_z)}{dH} = \frac{d \left[\frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{G} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \frac{eH}{m^* c} \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_L^2 \right]}{G} \right)^2 \right] \gamma_{\perp}(k_0 T)^{\beta} E^{\alpha + \frac{3}{2}} \left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E} \right) dE \right]}{dH} \cdot E_E^2 \quad (19)$$

В данной работе⁸ экспериментально определена зависимость осциллирующей Шубникова-де-Газа гетероструктурных полупроводников на основе квантовых ям *InAs/GaSb* от сильного электромагнитного поля и температуры (рис. 7).

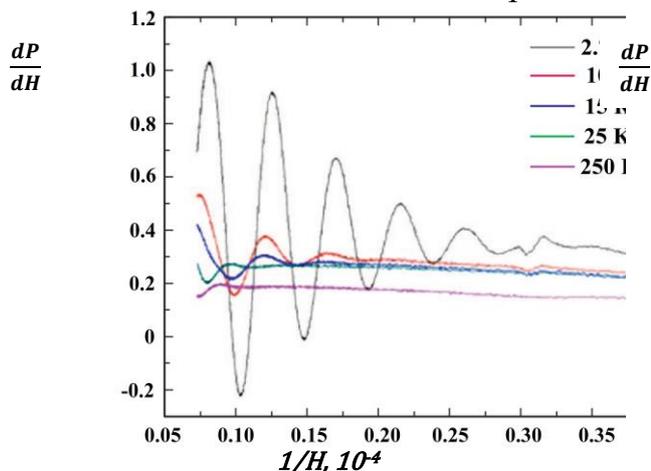


Рисунок 7. Температурная зависимость dP/dH для полупроводников с квантовыми ямами *InAs/GaSb*.

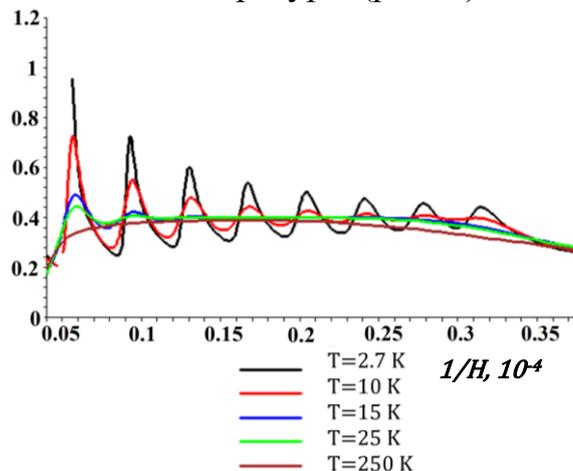


Рисунок 8. Температурная зависимость dP/dH для полупроводников с квантовыми ямами *InAs/GaSb*. Эти графики получены согласно предложенной модели (19).

В частности, на рис. 7 показаны температурные зависимости коэффициента микроволнового поглощения ($\frac{dP}{dH}$) в сильном магнитном поле с толщиной квантовой ямы $d=8$ нм (для GaSb). Результаты этого эксперимента были получены на аппарате ЭПР в диапазоне температур $T=2,7\text{K} - 250\text{K}$. В эксперименте были получены следующие величины сильного СВЧ электрического поля: частота СВЧ = 9.35 GGrts , энергия квантов $E = \hbar\omega = \hbar 2\pi\nu = 0.04$ мэВ, напряженность электромагнитного поля $P=1\text{мВт}$. Используя эти величины, можно рассчитать напряженность электрического поля электромагнитного поля: $E_E = \frac{\hbar 2\pi\nu}{ed} = 0.5 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{M}}$. Кроме того, величина магнитного поля в эксперименте задается в диапазоне Эрстеда $\frac{1}{H} = 0.05 \cdot 10^{-4} \div 0.4 \cdot 10^{-4}$. Используя физические величины, представленные в этом эксперименте, мы начинаем теоретический анализ. Используя предложенную модель (на основе формулы (19)), можно определить зависимость dP/dH от $1/H$. Однако формула (19) показывает, что это уравнение трансцендентно и не может быть решено теоретически.

Это достигается с помощью компьютерных программ (Maple, MathCad, Matlab, Mathematica) и графических методов. На рисунке 8 показан график зависимости dP/dH от $1/H$, т.е. новая модель (формула (19)) при различных температурах и $E_E = 0.5 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{M}}$, $N_L=10$ и $n_Z=1$. В этом случае, подставив экспериментальные значения размеров в (19), был получен график зависимости

⁸ Kochman I.V., Mixaylova M.P., Veynger A.I., Parfen`yev R.V. FTP, 2021, Т. 55, вып.4, стр.313-318.

dP/dH от $1/H$. При выполнении условия $kT \ll \hbar\omega_c$ резко появляются амплитуды квантовых осцилляций.

Высота амплитуды dP/dH пропорциональна величине напряженности магнитного поля H , и с уменьшением H амплитуда уменьшается. Разумеется, этот закон выполняется при постоянно низких температурах. Однако с увеличением динамики температуры изменение амплитуды $\frac{dP}{dH}$ становится зависимым от T , а не от $1/H$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе моделирования температурной зависимости коэффициента магнитооптического поглощения и осцилляций магнитосопротивления в наноразмерных полупроводниках под действием сильного электромагнитного поля были сделаны следующие выводы:

1. Разработана новая модель для расчета влияния квантующего магнитного поля на температурную зависимость двумерной комбинированной плотности состояний в прямозонных гетероструктурах.

2. «Тепловое расширение» двумерной комбинированной плотности состояний квантовой ямы в сильном магнитном поле объясняется с помощью функции распределения Гаусса.

3. Результаты эксперимента интерпретировались с использованием осцилляций комбинированной плотности состояний квантовой ямы в квантующем магнитном поле. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными результатами, полученными для гетероструктур на основе квантовой ямы InGaN/GaN в квантующем магнитном поле при различных температурах.

4. Предложен новый метод определения механизма магнитооптического поглощения по закону осцилляций комбинированной плотности состояний. Разработана новая математическая модель, рассчитывающая зависимость коэффициента магнитооптического поглощения от температуры, магнитного поля и толщины квантовой ямы прямозонных полупроводниковых структур с квантовой ямой.

5. Выведено аналитическое выражение $(\frac{dP}{dH}, \frac{d^2P}{dH^2})$, полученная из напряженности микроволнового поля (dP) путем вычисления дифференциального уравнения первого и второго порядка по напряженности магнитного поля (dH) в гетероструктурных полупроводниках с квантовой ямой.

6. Разработана математическая модель, определяющая зависимость квантово-осцилляционных эффектов от напряженности СВЧ-поля, квантующего магнитного поля и температуры для объемных и низкоразмерных полупроводниковых материалов.

7. На основе предложенной модели удалось объяснить экспериментальные результаты, полученные в квантоворазмерных и объемных полупроводниковых структурах для динамики высоких температур.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 AT NAMANGAN INSTITUTE OF
ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

NAMANGAN INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

SAYIDOV NOZIMJON ABDULNOSIROVICH

**MODELING THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE
MAGNETO-OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENT AND THE
MAGNETORESISTANCE OSCILLATIONS IN NANO-SIZED
SEMICONDUCTORS UNDER THE INFLUENCE OF A STRONG
ELECTROMAGNETIC FIELD**

01.04.10 – Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF DISSERTATION
DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL
SCIENCES**

Namangan – 2024

The theme of the dissertation Doctor of Philosophy (PhD) was registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2023.1.PhD/FM855.

The dissertation was completed at the Namangan institute of engineering and technology.

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) on the website Of the scientific Council of the Namangan Institute of engineering and technology (www.nammti.uz) and on the Information and educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor:

Erkaboev Ulugbek

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents:

Onarqulov Karimberdi Egamberdievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Nosirov Murod Zokirovich

Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences, professor

Leading organization:

Karshi State University

The defense of the dissertation will be held at ___ on “___” _____ 2024 year at the scientific council meeting No. PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan institute of engineering and technology (at the address: 160100, Namangan city, Kasansay Str. 7, administrative building, small conference hall, tel. (+99869) 228-76-68, 225-10-07, a fax: (+99869) 228-76-75. e-mail: niei_info@edu.uz

The dissertation is available at the Information-resource centre of Namangan institute of engineering and technology (registration number No. ____).

Address: 160100, Namangan city, Kasansay Str 7, tel. (+99869) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz

The abstract of dissertation sent out on “___” _____ 2024 year.
(mailing report No. ___ on “___” _____ 2024 year).

M. Dadamirzaev

Vice-chairman of Scientific Council on award of Scientific Degrees, Doctor of Physical-mathematical sciences, Professor

A. Abdukarimov

Scientific secretary of scientific Council awarding Scientific Degrees, candidate of Physical-Mathematical Sciences

N.Sharibaev

Chairman of the academic seminar under the Scientific Council awarding Scientific Degrees, Doctor of Physical-Mathematical Science, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research is to model the temperature dependence of the magneto-optical absorption coefficient and magnetoresistance oscillations in nanoscale semiconductors under the influence of strong electromagnetic fields.

The research object was chosen to be heterostructure semiconductors with quantum wells.

The scientific novelty of the research includes the following:

for the first time, the temperature dependence of interband oscillations of the magneto-optical absorption coefficient in direct-gap nanostructured semiconductors is based on the delta-function expansion method of the combined density of states;

a new method for calculating the temperature dependence of the combined density of states of quantum semiconductors in a strong magnetic field has been proposed;

a mathematical model of the temperature dependence of two-dimensional oscillations of combined state densities has been developed;

new analytical expressions have been found that express the temperature dependence of conductivity oscillations in heterostructure semiconductors with quantum wells in a super high-frequency electromagnetic field.

Implementation of the research results:

The findings were applied to calculate the temperature dependence of the magneto-optical absorption coefficient of nanostructured semiconductors in practical project No. 19-02-00098 titled “Quantum dots with indirect-gap semiconductors: dynamics and recombination of localized exciton spins” (reference No. 15307-26-6804 dated January 9, 2024, from the A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS). The use of scientific results increased the magneto-optical absorption coefficient of quantum-sized semiconductors in the project by 1.3%.

Results obtained from determining the temperature dependence of quantum effect oscillations in nanoscale semiconductors in a super high-frequency electromagnetic field were used in the execution of fundamental grant OT-FF2-71 on the topic “Study of the effect of light on the volt-ampere characteristics of a deformed p-n junction in a super high-frequency electromagnetic field” (reference No. 06/10-09/122 from Namangan Engineering and Construction Institute dated February 8, 2024). Using scientific results helped reduce the magnetoresistance dimensions in the project by 3.5%.

The research results were presented as follows:

The research results were discussed at 18 scientific conferences, including 11 international and 7 national conferences.

Publication of research results:

A total of 36 scientific works were published on the dissertation topic, including 2 monographs, 14 scientific articles in scientific journals recommended for publication of major scientific results of doctoral dissertations by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, and 6 articles in international journals indexed in the Scopus database. Additionally, 2 software certificates related to the research topic were obtained.

Structure and volume of the dissertation:

The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The dissertation volume is 101 pages.

E'OLON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть, I part)

1. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., **Sayidov N.A.** Mathematical modeling determination coefficient of magneto-optikal absorption in semiconductors in presence of external pressure and temperature // *Modern Physics Letters B*. 2021. Vol.35, Iss.17, pp. 2150293-1-2150293-10. (№3, **Scopus**. IF: 1.6, Q3; <https://www.scopus.com/sourceid/29055>).
2. 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. (№3, **Scopus**. IF: 2.7, Q2; <https://www.scopus.com/sourceid/21100822732>).
3. 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. (№3, **Scopus**. IF: 0.7, Q2; <https://www.scopus.com/sourceid/11500153309>).
4. 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. (№3, **Scopus**. IF: 0.7, Q3; <https://www.scopus.com/sourceid/145208>).
5. 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. (№3, **Scopus**. IF: 2.7, Q3; <https://www.scopus.com/sourceid/29055>).
6. 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. (№3, **Scopus**. IF: 0.7, Q4; <https://www.scopus.com/sourceid/26917>).
7. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., **Sayidov N.A.**, Mirzaev J.I. Determination of dependence of the band gap on temperature and quantizing magnetic field in electronic semiconductors with a parabolic dispersion Law // *Semiconductor Physics and Microelectronics*. 2021. Vol.3, Iss.4, pp.53-59. (01.00.00. №16).
8. Gulyamov G., Erkaboev U.I., Mirzaev J.I., Rakhimov R.G., **Sayidov N.A.** Determination of the temperature dependence of the Fermi energy oscillations in nanostructured semiconductor materials in the presence of a quantizing magnetic field // *Semiconductor Physics and Microelectronics*. 2021. Vol.3, Iss.2, pp.47-52. (01.00.00. №16).

9. Erkaboev U.I., **Sayidov N.A.**, Rakhimov R.G., Negmatov U.M. Calculation of the temperature dependence of the oscillation of the density of states in a quantizing magnetic field due to the collision of electrons on crystal lattice defects // *Semiconductor Physics and Microelectronics*. 2021. Vol.3, Iss.3, pp.62-67. (01.00.00. №16).
 10. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., **Sayidov N.A.** The dependence of the energy absorbed photon on the magnetic field in semiconductors with kane dispersion law // *Scientific Bulletin of NamSU*. 2021. Vol.10, pp.14-21. (01.00.00. №16).
 11. Эркабоев У.И., **Сайидов Н.А.** Вычисление осцилляции плотности энергетической состояний в двумерных электронных газах при наличии продольного и поперечного сильного магнитного поля // *Научный вестник НамГУ*. 2021. Махсус сон. 144-151 бетлар (01.00.00. №14).
 12. Erkaboev U.I., **Sayidov N.A.**, G'ayratov S.I. GaAs/AlGaAs kvant o'rali geterostrukturalarda ikki o'lchovli kombinatsiyalangan holatlar zichligini foton energiyasiga bog'liqligi // *NamDU ilmiy axborotnomasi*. 2023. No.12, 18-23 betlar (01.00.00. №14).
 13. Erkaboev U.I., **Sayidov N.A.**, Negmatov U.M. Kvant o'rali geterostrukturalarda kombinatsiyalangan holatlar zichligiga magnit maydon va haroratning ta'siri // *O'zMU xabarlari*. 2023. No.3/2, 420-423 betlar (01.00.00. №8).
 14. Erkaboev U.I., **Sayidov N.A.** Kvant o'rali to'g'ri zonali yarimo'tkazgichlarda kombinirlangan holatlar zichligiga haroratning tasiri // *NamDU ilmiy axborotnomasi*. 2024. No.3, 32-37 betlar (01.00.00. №14).
 15. Эркабоев У.И., **Сайидов Н.А.**, Гайратов С.И. Осцилляции межзонного магнитооптического поглощения в полупроводниковых структурах. 2023 г. Монография. Наманган. Изд. «Аржуманд медиа». ISBN 978-9943-9583-2-6. 179 С.
 16. Gulyamov G., Erkaboev U.I., **Sayidov N.A.** Temperature dependence of quantum oscillations in semiconductors. 2022. Monograph. "LAP Lambert Academy Publishing". ISBN 978-620-2-02723-6. p.180.
- II bo'lim (II часть, II part)**
17. **Sayidov N.A.**, Erkaboyev U.I., Mirzayev J.I. Kichik o'lchamli yarimo'tkazgichlar uchun "Veer diagrammasini" yaratish // O'zbekiston respublikasi adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi, *EHM uchun yaratilgan dasturiy guvohnoma*. 2023. № DGU 24793.
 18. Erkaboyev U.I., Negmatov U.M., Raximov R.G', Mirzayev J.I., **Sayidov N.A.** InAsSb/InAs yarimo'tkazgichlarda erkin elektronlarning energetik spektoriga magnit maydonini ta'siri // O'zbekiston respublikasi adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi, *EHM uchun yaratilgan dasturiy guvohnoma*. 2022. № DGU 16472.
 19. Гулямов Г., Эркабоев У.И., **Сайидов Н.А.** Моделирование влияние температуры на веерную диаграмму спектра магнитопоглощение в полупроводниках // Международная научно-практическая конференция по теме: «Современные проблемы инновационного развития науки, образования и производства». №3, 13-15 мая, 2020 год. стр.539-552

20. Эркабоев У.И., Гулямов Г., Сайидов Н.А. Осцилляции магнетосопротивления в низкоразмерных полупроводниковых материалах под действием сверхвысокочастотного электромагнитного поля // Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред» 25 май, Фергана, 2021 г. стр.69-72.
21. **Sayidov N.A.** Determination of density quantum states of semiconductors in presence of a magnetic field // «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XLII» Международной научно-практической конференции. 15 февраля 2021 г. в г. Пенза. стр.11-13.
22. Эркабоев У.И., Сайидов Н.А. Зависимость осцилляции энергии ферми от фактора заполнения электронами в двумерных полупроводниках // «XXI асп – интеллектуал ёшлар асри» Республика илмий ва илмий-назарий анжуман. 24 апрель 2021 йил. Тошкент. стр.212-214.
23. Гулямов Г., Эркабоев У.И., Сайидов Н.А., Рахимов Р.Г., Мирзаев Ж.И. Моделирование осцилляций магнетосопротивления в наноразмерных полупроводниковых структурах под действием СВЧ полях // «Роль передовых инновационных технологий и образования в решении задач автоматизации и энергетики, направленная на повышение энергоэффективности производств и социальной сферы». Международной научно-практической конференции. 24-25 июнь. 2021. Наманган. стр.92-96.
24. Galperin Yu.M., Gafur G., Erkaboev U.I., Mirzayev J.I., **Sayidov N.A.**, Rakhimov R.G. Calculation of the temperature dependence of the oscillations of the density of states in two-dimensional electronic systems with a parabolic dispersion law // “The role of advanced innovative technologies and education in solving problems of automation and energy”. International scientific-practical conference. 24-25 iyun, 2021. Namangan city. pp.96-99.
25. Gurevich Y.G., Gulyamov G., Erkaboev U. I., Rakhimov R. G., Mirzayev J. I., **Sayidov N.A.** Quantum oscillatory phenomena in low- dimensional semiconductors at different temperatures // “The role of advanced innovative technologies and education in solving problems of automation and energy”. International scientific-practical conference. 24-25 iyun, 2021. Namangan city. pp.99-102.
26. Эркабоев У.И., Сайидов Н.А. Зависимость осцилляции энергии ферми от толщины квантовой ямы и от температуры в квантующем магнитном поле // «ЁШ олимлар ва физик талабалар»нинг I республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-I). 21 апрель. 2021 йил. Тошкент. стр.94-96.
27. Гулямов Г., Эркабоев У.И., Сайидов Н.А., Рахимов Р.Г., Мирзаев Ж.И., Негматов У.Б. Влияние температуры на квантовые осцилляционные явления в квантово – размерных гетероструктурах // «Проблемы фотоники и перспективы развития». Республиканская научно-практическая конференция. 27-28 мая. Ургенч 2022. стр.160-162.
28. Эркабоев У.И., Сайидов Н.А. Осцилляции комбинированной плотности состояний в наноразмерных полупроводниках при присутствии квантующего магнитного поля // «Форум посвящается обсуждению статуса

- и перспектив развития физики» Международный форум «ФИЗИКА – 2022», 4–5 октября 2022 г. Наманган, Узбекистан. стр.95-96.
29. Эркабоев У.И., **Сайидов Н.А.** Влияние температуры на веерную диаграмму спектра магнитопоглощения в наноразмерных полупроводниках // «Форум посвящается обсуждению статуса и перспектив развития физики» Международный форум «ФИЗИКА – 2022», 4 – 5 октября 2022 г. Наманган, Узбекистан. стр.158.
 30. Erkaboyev U.I., **Sayidov N.A.**, G'ayratov S.I. Magnit maydoni ta'siridagi kichik o'lchamli yarimo'tkazgichlarda kombinatsiyalangan holatlar zichligi ostsillyatsiyalarini hisoblash // “Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani. 12-aprel, 2023 y. Namangan. 130-132 betlar.
 31. Эркабоев У.И., **Сайидов Н.А.**, Эркабоев Д.И., Гайратов С.И. Квант ўрали гетеротузилмаларда комбинацияланган ҳолатлар zichligi осцилляцияларининг ҳароратга боғлиқлиги // “Qayta tiklanuvchi energiya resurslaridan foydalanishning dolzarb muammolari, energiya tejankor qurilmalarning samaradorligini oshirishda sun'iy intellekt va raqamli texnologiyalarni tadbiiq etish” mavzusidagi xalqaro ilmiy – texnik anjuman, 18-19- sentabr, 2023 y., Andijon 7-9 betlar.
 32. Erkaboyev U.I., **Sayidov N.A.** Dependence of the two-dimensional combined density of states on the absorbing photon energy in GaAs/AlGaAs at quantizing magnetic field // Scientific and technical journal Namangan Institute of Engineering and Technology. Vol.8, Iss.3, 2023 y. pp.124-135.
 33. Erkaboyev U.I., **Sayidov N.A.** Gauss taqsimoti funksiyasi yordamida kombinirlangan holatlar zichligini hisoblash // “Yangi O'zbekistonda ilm fanning so'nggi yutuqlari” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani 16-dekabr 2023 yil. 15-19 betlar.
 34. Эркабоев У.И., **Сайидов Н.А.**, Гайратов С.И. Влияние температуры и магнитного поля на двумерную комбинированную плотность состояний в низкоразмерных полупроводниковых структурах // «ЁШ олимлар ва физик талабалар»нинг III республика илмий анжумани (ЁОФТРИА- III). 15 июнь. 2023 йил. Тошкент. стр.147-150.
 35. Эркабоев У.И., Гайратов С.И., **Сайидов Н.А.** Вычисление осцилляции комбинированной плотности состояний в гетероструктурах с квантовыми ямами при присутствии магнитного поля // Международной научнопрактической конференции «Физика и экология» 15-16 сентября 2023 года. стр.102-105.
 36. Эркабоев У.И., **Сайидов Н.А.** Влияние температуры и магнитного поля на двумерную комбинированную плотность состояний в низкоразмерных полупроводниковых структурах // II-международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники» Ташкент, 27-28 октября 2023 г. стр.30-32.

