

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSs.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI  
FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI**

**RASULOV VOXOB RUSTAMOVICH**

**IKKI VA UCH O‘LCHAMLI PYEZOYARIMO‘TKAZGICHLARDA  
FOTONLI-KINETIK EFFEKTLAR**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2024**

**Фан доктори (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора наук (DSc)**

**Contents of the abstract of dissertation doctor of science (DSc)**

|   |    |
|---|----|
| <b>Расулов Вохоб Рустамович</b><br>Ikki va uch o'lchamli piezo yarimo'tkazgichlarda fotonli-kinetik effektlar           | 3  |
| <b>Расулов Вохоб Рустамович</b><br>Фотонно-кинетические эффекты в двух и трехмерных пьезополупроводниках                | 29 |
| <b>Rasulov Voxob Rustamovich</b><br>Photonic-kinetic effects in two- and three-dimensional piezoelectric semiconductors | 59 |
| <b>Эълон қилинган ишлар рўйхати</b><br>Список опубликованных работ<br>List of publications                              | 60 |

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSs.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI  
FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI**

**RASULOV VOXOB RUSTAMOVICH**

**IKKI VA UCH O‘LCHAMLI PYEZOYARIMO‘TKAZGICHLARDA  
FOTONLI-KINETIK EFFEKTLAR**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2024**

Fizika-matematika fanlari fan doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.3.DSc/FM150 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg'ona davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.ispm.uz](http://www.ispm.uz)) va «ZiyoNet» axborot-ta'lim portalida ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy maslahatchi:** Utamuradova Sharifa Bekmuradovna  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:** Dadamirzayev Muhammadjon G'ulomqodirovich  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Karajanov Smagul Jangibergenovich  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Sharibayev Nosirjon Yusupjanovich  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:** Andijon davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2024-yil «26» 12 soat 10<sup>00</sup> dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel (99871) 248-79-94, faks: (99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz), O'zMU qoshidagi YAIFM ITI majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Raqamli ta'lim texnologiyalarini joriy etish bo'limida tanishish mumkin (     raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel.(99871) 248-79-59. e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz)).

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil «12» 12 kuni tarqatildi. (2024-yil «12» 12 dagi 66 raqamli ryeestr bayonnomasi).



**A.T.Mamadlimov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi  
o'rinbosari, f.-m.f.d., akademik

**J.J. Xamdamov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy  
kotibi, PhD, k.i.x.

**N.Turgunov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash  
qoshidagi ilmiy seminar raisi,  
f.-m.f. d., dotsent

## KIRISH (doktorlik (DSc) dissertatsiyasining annotatsiyasi))

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda hajmiy va nano o'lchamli yarimo'tkazgichlar elektronikasining, xususan, nanoelektronikaning jadal rivojlanishida pyezoelektrik yarimo'tkazgichlar muhim o'rin egallamoqda. Bu holat qutblangan yorug'likning yutilishida elektron va kovaklar spinlari hamda impulslarining tenglamasi bilan tavsiflanadigan tok tashuvchilarining nomuvozanat holatga o'tishi natijasida kvazizarralar va ularning noldan farqli bo'lgan oqimlariga ega spinlarining yuzaga kelishi bilan bog'liqdir. Muvozanat holatdan chetlashish va asosiy holatga relaksatsiya qilishga javob beruvchi kinetik jarayonlar hajmiy va nano o'lchamli yarimo'tkazgichlardagi optik hodisalarda o'z aksini topadi.

Jahon miqyosida yarimo'tkazgichli texnologiyalar sohasidagi yutuqlari avvaldan tanlangan parametr va xossalari zamonaviy qurilmalarni yaratish imkoniyatini yaratmoqda. Xususan, yarimo'tkazgichlarda kuzatilgan qutbiy fotogalvanik effektlarga asoslangan hajmiy golografik yozish qurilmalarini yaratishdagi muvaffaqiyatlar yarimo'tkazgichlar fizikasida yangi yo'nalish – yarimo'tkazgichli fotonika sohasi yartilishiga sezilarli turtki berdi. Fotonikaning asosiy vazifalaridan biri murakkab valent zonali yarimo'tkazgichlar va ularning nanostrukturalaridagi tok tashuvchilar orasidagi sirkulyar qutblangan nurlanishning o'zaro ta'sirini o'rganishdir. Shu sababli yarimo'tkazgichlar va ularning o'lchamli kvantlashgan strukturalarida elektron, optik va fotogalvanik xossalarini o'rganish nanoelektronika, fotonika va spintronikada nafaqat yangi yo'nalishlarni ochadi, balki fundamental ilmiy tadqiqotlar olib borish uchun imkoniyatlar yaratadi.

Respublikamizda so'ngi yillarda ilm-fan sohasidagi ustuvor yo'nalishlarda, jumladan, «Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanishni rivojlantirish»da ikki va uch o'lchamli yarimo'tkazgichlar va ularning strukturalarida kechadigan qutbiy bog'langan optik va fotonli kinetik hodisalarni o'rganish bo'yicha muhim natijalar olindi. O'zbekiston Respublikasining yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasiga ko'ra, ilmiy tadqiqot va innovatsion faoliyatni rivojlantirish, ilmiy va innovatsion yutuqlarni amaliyotga joriy etishning samarali mexanizmlarini yaratish masalalariga oid muammolarni hal qilishga alohida e'tibor qaratilgan.

Taqdim etilgan dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022–2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi" farmoni PF-60 son, 2021-yil 19-martdagi "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-5032-son qarori, shuningdek, 2020-yil 10-iyuldagi "Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-4779-sonli, 2019-yil 22-avgustdagi "Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to'g'risida" gi PQ-4422 sonli qarori hamda ilmiy tadqiqotlarga tegishli me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga xizmat qiladi.

Shuning uchun murakkab zonali yarimo'tkazgichlar va ularning nanostrukturalaridagi kogerentli to'yinish samarasini e'tiborga olgan va olmagan holda fotonli kinetik hodisalarni tadqiq etish **aktual** bo'lib, dissertatsiyada qo'yilgan muammolarni hal etish uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot ishi Respublika fan va texnologiyalar taraqqiyotining "III. Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanishni rivojlantirish" ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

**Dissertatsiya mavzusi bo'yicha horijiy ilmiy-tadqiqotlar sharhi.** Hozirgi vaqtda ikki va uch o'lchamli pyezoyarimo'tkazgichlarda qutblangan yorug'lik ta'sirida sodir bo'luvchi bir va ikki fotonli optik va fotogalvanik effektlarning nazariy va eksperimental tadqiqotlari jahonning yetakchi ilmiy markazlari va universitetlarida keng ko'lamda olib borilmoqda.

Xususan, Rossiya Fanlar akademiyasining A.F.Ioffe nomidagi Fizika-texnika institutida (Sankt-Peterburg) akademiklar Ye.L.Ivchenko, M.M.Glazov va professorlar L.Ye.Golub, S.A.Tarassenko rahbarligida girotrop va simmetriya markazi bo'lmagan yarimo'tkazgichlarda fotogalvanik effektlarning nazariy modellari ishlab chiqilgan. Ularning ishlarida qutblangan yorug'lik ta'siridagi tok tashuvchilarning asimmetriyali taqsimoti, spin-orbital o'zaro ta'sirlar va ularning fotogalvanik effektlarga ta'siri chuqur o'rganilgan.

Germaniyaning Regensburg universitetida professor S.D.Ganichev rahbarligida ikki va uch o'lchamli girotrop yarimo'tkazgichlarda fotogalvanik effektlarning eksperimental tadqiqotlari amalga oshirilmoqda. Ularning ishlari simmetriyaning yordamchi buzilishlari va sirkulyar qutblangan yorug'lik ta'siridagi fototoklarning kinetikasini o'rganishga qaratilgan.

Fransiyaning Monpelye universitetida professor M.I.Dyakonov va V.Yu.Kachorovskiy tomonidan yarimo'tkazgichlarda spinli tashish hodisalari va fotogalvanik effektlarning nazariy tahlili olib borilmoqda. Ularning ishlari spintronika sohasidagi jarayonlarning fotonli kinetik hodisalarga ta'sirini va ularning simmetriya bilan bog'liqligini tadqiq etishga qaratilgan.

Yaponiyaning Toxoku universitetida professor Xideo Ohno spintronika va magnit yarimo'tkazgichlar sohasida tadqiqotlar olib bormoqda. Ularning ishlari pyezoyarimo'tkazgichlardagi spinli tok tashuvchilarning optik xususiyatlarini va spinli polyarizatsiyalangan tokning hosil bo'lish mexanizmlarini o'rganishga yo'naltirilgan.

AQShning Stenford universitetida professor Shanxuy Fan (Shanhui Fan) rahbarligida yarimo'lchamli fotonika va metamateriallar sohasida tadqiqotlar olib borilmoqda. Ularning ishlari sirkulyar qutblangan yorug'lik bilan bog'liq fotonli hodisalarni tushunish, ularni boshqarish va yangi optoelektron qurilmalarni yaratishga qaratilgan.

Kanadadagi Toronto universitetida professor J.Ye.Sayp (J.E. Sipe) va uning hamkorlari mikroo'lchamli strukturalardagi fotonli kinetik hodisalarni nazariy jihatdan tadqiq etishgan. Ularning ishlari fotogalvanik effektlarning mikroskopik mexanizmlarini ochib berish va yarimo'tkazgichlardagi nochiziqli optik hodisalarni tushunishga katta hissa qo'shgan.

Germaniyaning Myunxen Texnika universitetida professor Wolfgang Bruderle (Wolfgang Brütting) rahbarligida kvant nuqtalari va kvant zondlaridagi optik hodisalarni o'rganish bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda. Ularning ishlari past o'lchamli yarimo'tkazgichlardagi nochiziqli optik va fotogalvanik effektlarni tadqiq qilishga qaratilgan.

Italiyaning Milan politexnika universitetida professor Mario Marta (Mario Martinelli) rahbarligida mikroo'lchamli nanostrukturalardagi optik va fotonli kinetik hodisalarni tadqiq etish borasida faoliyat yuritilmoqda. Ularning ishlari nochiziqli optika va fotonika sohasida yangi materiallar va qurilmalar yaratishga qaratilgan.

Shu bilan birga, Janubiy Koreyaning Seul Milliy Universitetida professor Kim Ki-Te (Kim Ki-Tae) rahbarligida pyezoyarimo'tkazgichlardagi fotogalvanik effektlar va ularning nanoelektronikada qo'llanilishi bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda.

Bundan tashqari, Shveytsariyaning Lozanna Federal Politexnika Maktabida (EPFL) professor Jerom Fo (Jérôme Faist) va uning guruhi kvant kaskad lazerlari va kvant yacheykasidagi fotonli kinetik hodisalarni tadqiq etmoqda.

Shunday qilib, ikki va uch o'lchamli pyezoyarimo'tkazgichlarda qutblangan yorug'lik ta'siridagi bir va ikki fotonli optik va fotogalvanik effektlarni tadqiq qilish bo'yicha xorijiy ilmiy-tadqiqotlar keng ko'lamda va yuqori darajada olib borilmoqda. Bu ishlar yarimo'tkazgichli fotonika, nanoelektronika va spintronika sohalarida yangi yo'nalishlarni ochishga, shuningdek, zamonaviy optoelektron qurilmalar yaratishga xizmat qilmoqda.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Hajmiy yarimo'tkazgich va ularning o'lchamli kvantlashgan strukturalarida qutbiy optik va fotogalvanik effektlarni tadqiq qilish jahonning ilg'or mamlakatlarning ilmiy tadqiqot markazlari va universitetlarida olib borilmoqda. Xususan, A.M.Glass (AQSH) va V.M.Fridkin (Moskva, Rossiya) tomonidan bir jinsli segnetoelektriklarda fotogalvanik effekt eksperimental tadqiq etilgan bo'lib, namunaning bir jinsli qutblangan yorug'lik bilan yoritilganida bir necha soat anomal katta statsionar fotokuchlanish kuzatilgan. Zaryad tashishning bir necha soat kuzatilishini kristalldagi maydonning relaksatsiyasi yordamida tushuntirish imkoniyati butunlay istisno etiladi.

Bunday hodisalarni tajribada K.X.Xerman (Germaniya) va A.F.Gibson (AQSH) *GaP* da, G.Ribakovs va A.A.Gundjian (Kanada), A.A.Rogachev (Sankt Peterburg, Rossiya) tellurda, J.M.Doviak va S.Kotari (AQSH), S.D.Ganichev (Regenzburg, Germaniya), A.V.Andrianov va I.D.Yarosheskiy (Sankt Peterburg, Rossiya) *p - GaAs* da kuzatishgan.

Rossiya FAning akademigi Yu.V.Kopayev, muxbir a'zolari Ye.L.Ivchenko, M.M.Glazov, professorlar G.Ye.Pikus, N.S.Averkiyev, L.Ye.Golub, S.A.Tarassenko (Sankt Peterburg, Rossiya) va V.I.Belinicher, I.D.Sturman, L.I.Magarill, M.V.Entin (Novosibirsk, Rossiya) rahbarlik qilgan bir guruh olimlar tomonidan sirkulyar, chiziqli hamda spin bog'langan fotogalvanik effektlar mexanizmi hajmiy va past o'lchamli yarimo'tkazgich va segnetoelektriklarda nazariy o'rganilgan. FotoEYuK simmetriya markaziga ega bo'lmagan bir jinsli muhitlardagi tok tashuvchilarning fononlar, fotonlar yoki kirishmalarda sochilish aktining asimmetriyasi bilan bog'liqligi o'rganilgan.

Bugungi kungacha O‘zbekiston Respublikasi fanlar akademiyasi akademiklari R.A. Muminov va A.T. Mamadolimov, S.Z. Zaynobiddinovlar ham past o‘lchamli yarimo‘tkazgichlar fizikasiga katta hissa qo‘shishgan bo‘lib, R.A. Muminov turli sharoitlarda yarimo‘tkazgich geterostrukturalarini o‘rganish uchun analitik modellar yaratgan. U geterostrukturalarni o‘rganishda va optoelektron qurilmalar uchun materiallarni optimallashtirish bo‘yicha faol shug‘ullangan. A.T. Mamadolimov chuqur sathli markazlarini aniqlash uchun yangi usullarni ishlab chiqishda yetakchilik qilgan bo‘lib kremniy va tabiiy tolalar asosida yangi qurilmalar yaratishda muhim rol o‘ynagan. S.Z. Zaynobiddinov kvant strukturalarning ta‘sirini tahlil qilgan holda yarimo‘tkazgichlarning optik xossalarini nazariy va eksperimental o‘rgangan va bu bilan O‘zbekistonda optoelektronikaning rivojlanishiga hissa qo‘shgan. Shuningdek olimlaridan E.Z.Imamov va R.Ya.Rasulov tomonidan yarimo‘tkazgichlar hamda ularning o‘lchamli kvantlashgan tizimlari qutbiy bog‘lanishli ergashtirish va chiziqli fotogalvanik effektlarning mexanizmlari, shuningdek o‘lchamli kvantlashgan yarimo‘tkazgichlarning optik xossalari nazariy tadqiq etilgan. Bu holda: a) yarimo‘tkazgichlar zonaviy tuzilishining murakkabligi hamda yorug‘likning qutblanish holatining fototokning kogerentli to‘yinish effektiga ta‘siri; b) ketma-ket joylashgan yarimo‘tkazgichlardan tashkil topgan asimmetriyali strukturada elektronlar tunellanishining to‘siq o‘lchami va elektronlar energiyasiga bog‘liq bo‘lgan ostsillyatsiyasi; c) yarimo‘tkazgich zonaviy tuzilishining uning optik va fotogalvanik xossalariga ta‘siri; d) ballistik chiziqli fotogalvanik effektning ikki fotonli optik o‘tishlarga va yarimo‘tkazgichlar zonasining o‘ziga xosligiga bog‘liq mexanizmi; e) girotrop yarimo‘tkazgichlarda yorug‘likning nochiziqli yutilishi va tok tashuvchilarning fotonli ergashtirish effekti.

### **Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog‘liqligi.**

Dissertatsiya tadqiqoti fundamental tadqiqotlar Davlat dasturining F-2.1.69 ro‘yxatdan o‘tish tartib raqami “Yarimo‘tkazgichli kvantlashgan o‘ralarda qutbiy fotogalvanik effektlar” mavzusidagi (2003 - 2007 yy.), O‘zbekiston Respublikasi FA Prezidiumi qoshidagi fundamental tadqiqotlarni qo‘llab-quvvatlash fondining (FTQF) 79 - 06 tartib raqamli «Yarimo‘tkazgichlar va yarimo‘tkazgichli nano-strukturalarning qutblashgan fotonlar ishtirokidagi kinetik xossalarining nazariy tadqiqi» mavzusidagi (2006 - 2010 yy.), OT-F2 «Yarimo‘tkazgichlar va ularning o‘lchamli kvantlashgan o‘ralarida qutbiy optik samaralar» mavzusidagi (2007 - 2011 yy.) hamda va IL-652207792 «Har xil chuqur sathli yarimo‘tkazgichlarning optik, sig‘imli va rezonansli tahlili asosida yuqori samaradorlikka va parametrlari barqarorlikka ega bo‘lgan kremniy tuzilmalarini yaratish» (2023-2025) mavzusidagi ilmiy loyihalari doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** ikki va uch o‘lchamli pyezoyarimo‘tkazgichlarda qutblangan yorug‘lik ta‘sirida sodir bo‘luvchi bir va ikki fotonli optik va chiziqli fotogalvanik effektlarning hamda ikki o‘lchamli yarimo‘tkazgichlarda elektronlarni tunellanishining fizikaviy tabiatini aniqlashdan iborat.

### **Tadqiqotning vazifalari:**

murakkab zonali tuzilishga ega pyezoyarimo‘tkazgichlarda bir va ikki fotonli optik hamda ballistik fotogalvanik effektlarning nazariyasini ishlab chiqish;



pyezoyarimo'tkazgichlarda elektronlarning fonon yoki fotonlarda asimmetriyali sochilishi bilan bog'liq bir va ikki fotonli ballistik chiziqli fotogalvanik effekt tokining spektral va temperaturaviy bog'lanishini kogerentli to'yinishni hisobga olgan holda hisoblash;

qo'shni qatlamlardagi elektronlarning effektiv massalari farqlanishi bilan bog'liq bo'lgan Bastard shartini e'tiborga olib ko'p qatlamli yarimo'tkazgichlarda o'lchamli kvantlanish hamda tunellanishni o'rganish;

pyezoyarimo'tkazgichlarda chiziqli fotogalvanik effekt tokining spektral va temperaturaviy bog'lanishlarining nazariy hisoblashlarini tadqiqot natijalari bilan solishtirish;

yarimo'tkazgichli termoelementlarda temperaturaning qalinlik bo'ylab taqsimotiga Tomson effektining ulushini hisoblash.

**Tadqiqotning obykti** sifatida kovak o'tkazuvchanligiga ega bo'lgan galliy arsened va tellur tur ikki va uch o'lchamli pyezoyarimo'tkazgichlar hamda ko'p qatlamli asimmetrik yarimo'tkazgichli strukturalar olindi.

**Tadqiqotning predmeti** yarimo'tkazgichlardagi yorug'likning qutblanish holatiga bog'liq fotonli kinetik jarayonlar: bir va ikki fotonli ballistik hamda fotonli ergashtirish effektlari hamda, asimmetriyali potensial to'siq va o'ralardan tashkil topgan ko'p qatlamli yarimo'tkazgichlarda elektronli kinetik hodisalardan iborat.

**Tadqiqot usullari.** Tadqiqot vazifalarini hal etishda qattiq jismlar nazariyasi va fizikaviy kinetikaning hisoblash usullari: Keldishning diagrammalar texnikasi, tashuvchi matritsalar va zichlik matritsasi nazariyasi, g'alayonlar nazariyasi, kvant mexanikasining oltin qoidasi, Bolsmaning kinetik tenglamasidan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

ilk bor simmetriya markaziga ega bo'lmagan yarimo'tkazgichlarda ballistik chiziqli fotogalvanik effekti bilan bog'liq ketma-ket ikki foton yutilishi bilan birgalikda bir vaqtning o'zida hamda ikki fotonning yutilishini o'z ichiga olgan mexanizmlar yaratilgan va ushbu mexanizmlarga mos fototokning spektral va temperaturaviy bog'lanishlari hisoblangan;

ilk bor Keldishning diagrammalar texnikasi asosida pyezoyarimo'tkazgichlardagi chiziqli qutblangan yorug'lik hisobiga indutsirlangan bir va ikki fotonli fotogalvanik effekt va fotonli ergashtirish samarasining mexanizmlari aniqlangan;

pyezoyarimo'tkazgichlardagi elektronlar sistemasiga foton impulsining uzatilishi hamda tok tashuvchilarning foton va fononlarda asimmetriyali sochilishi bilan bog'liq fototokning qutblanish vektori hamda uning chastotasi namuna temperaturasiga bog'liqligining kvant mexanikaviy ifodalari aniqlangan va ularning nazariy tahlili o'tkazilgan;

ilk bor ikki fotonli ballistik tokning kovaklar effektiv gailtonianida to'lqin vektorga nisbatan chiziqli, kvadratik va kubinchi bo'lgan hadlar hisobga olinishi isbotlangan va shunga asoslangan holda fototokning zonaviy parametrlar temperatura va yorug'lik chastotasiga bog'liqligi hisoblangan;

ko'p qatlamli yarimo'tkazgichlarda elektron enegetik spektrining o'lchamli kvantlanish potensial to'sig'i tiniqlik koeffitsiyentining ostsillyatsiyalanish shartlari Bastard shartiga ko'ra olingan;

*p-GaAs* ni tadqiq qilishda CO<sub>2</sub> lazer bilan yoritilganda chiziqli fototokning tajribada kuzatilgan temperaturaviy bog'lanishi nazariy jihatdan kavaklarning foton

va fononlar bilan nosimmetrik o'zaro ta'sirlashuvi asosida yuqori aniqlikda (10% dan kichik xatolik) tushuntirilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

ballistik chiziqli fotogalvanik effekt tokining temperaturaviy bog'lanishi bo'yicha nazariy va eksperimental natijalar ( $p - GaAs$  misolida) solishtirilgan;

ko'p qatlamli yarimo'tkazgichlardagi o'lchamli kvantlanish va tunellashning hisoblash usullari yarimo'tkazgichlardagi past o'lchamli elektronlar tizimiga qo'llanilgan;

bir va ikki fotonli optik va fotogalvanik effektlar natijalarini tatbiq etish orqali ma'lumotlarni golografik yozish, uni saqlash va qayta ishlash qurilmalari asosida optoelektron sistemalarlarning optik xususiyatlari optimallashtirilgan;

ikki va uch o'lchamli yarimo'tkazgichlarda sodir bo'ladigan fotonli kinetik hodisalar bo'yicha kelgusida olib boriladigan nazariy va eksperimental ilmiy tadqiqotlarni rag'batlantirish;

fizikaviy kinetikaning fotonli kinetik effektlari bo'yicha olib boriladigan eksperimental natijalarni talqin qilish asosiga aylangan tok tashuvchilarning kichik o'lchamli sistemasida va inversiya markaziga ega bo'lmagan kristall uchun hisoblash usullarini rivojlantirilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** olingan hisoblash natijalarining fotogalvanika sohasidagi yetakchi mutaxassislar tomonidan bajarilgan tajribalar natijasiga mos kelishi, kvant statistik fizikasi va fizikaviy kinetika usullari qo'llanilgan jiddiy matematik hisoblashlar jiddiyligi, nomuvozanat elektronli tizimlar uchun qattiq jismlar nazariyasidagi diagrammalar texnikasidan foydalanilganligi, hamda tadqiqot obyektining to'g'ri tanlanganligi bilan asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Dissertatsiya natijalarining ilmiy ahamiyati yarimo'tkazgichlarda bir va ikki fotonli chiziqli fotogalvanik effekt tokining qutblanish darajasiga bog'liqligi, uning spektral va temperaturaviy bog'lanishlari, shuningdek ko'p qatlamli o'lchamli kvantlashgan yarimo'tkazgichli tuzilmalarida tunellash va o'lchamli kvantlanish haqida yangi ma'lumotlar berilishidan iborat.

Ishning amaliy ahamiyati nochiziqli optik va fotonli kinetik effektlarni qo'llash orqali elektromagnit to'lqinlarni registrasiya qilishning chastotaviy diapazonini orttirish hamda registrasiya yorug'likning nafaqat intensivligi, balki qilish imkoniyati mavjudligida qutblanishi o'z ifodasini topgan.

Dissertatsiyada olingan natijalar «Elektronlarning fonon va fotonlar bilan o'zaro ta'sirlashuvidagi asimmetriyasi hisobga olingan ikki va uch o'lchamli sistemalarda tok tashuvchilarining tashish hodisalari» ilmiy yo'nalishini boyitadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Ikki va uch o'lchamli pyezoyarimo'tkazgichlarda bir va ikki fotonli ballistik fotogalvanik va fotonli ergashtirish effektlari, girotrop yarimo'tkazgichda qutblangan yorug'likning nochiziqli yutilishi hamda tunellash jarayonlarini nazariy tadqiq qilish asosida:

fotovoltaik effektlarga oid hisoblashlar RNF № 17-12-01265 «Notrivial topologiyaga ega tizimlarda elektronlar holati va kinetik effektlar» grantida dispersion optik hodisalarni o'rganishda qo'llanilgan (Rossiya Fanlar Akademiyasi A.F. Ioffe nomidagi Fizika-texnika institutining 2024 yil 17 sentabrdagi 04.01.09-2024 sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalarning qo'llanilishi kub simmetriyali

kristallardagi elektronlar tuzilishi nochoziqli optik va elektr effektlar shuningdek, yarimo'tkazgichli past o'lchamli tizimlardagi elektron-fonon va elektron-foton orsidagi bog'lanishlarni aniqlash imkonini beradi;

inversiya markaziga ega bo'lmagan yarimo'tkazgichlarda qutblangan yorug'likning bir va ikki fotonli yutilishi natijasida yuzaga kelgan qutbiy bog'lanishli optik va fotogalvanik effektlarning spektral va temperaturaga bog'lanishlariga asoslangan holda yarimo'tkazgichli materiallarining sifatini aniqlash va nazorat qilish usuli "Foton" AJda yarimo'tkazgichli elektron qurilmalarini ishlab chiqarishda qo'llanilgan ("Uzeltexsanoat" Aksiyadorlik Jamg'armasining 2024 yil 2 oktabrdagi 04-3/1663 -sonli ma'lumotnoma). Ilmiy natijalarning qo'llanilishi "Foton" AJ tomonidan ishlab chiqarilayotgan elektron qurilmalarning funksional imkoniyatlarini oshirish va ularning ishlash diapazonini kengaytirish imkonini berdi;

pyezoyarimo'tkazgichlarda ballistik fotogalvanik effekt va fotonli ergashtirish effekti natijalari HDP(F) - 2016/43 - sonli "Infraqizil yorug'lik manbai spektrini 100-4500 nm spektral diapazonida tadqiq qilish" loyihasida yarimo'tkazgichli fotodiodlarning past inersion xossalarini o'rganishda foydalanilgan (Uludag' universiteti (Turkiya) HDP(F) - 2016/43 - son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish yarimo'tkazgichli fotoo'zgartirgichlarning ishlash tezligini oshirish imkonini bergan;

ko'p qatlamli yarimo'tkazgichli strukturalarda qo'shni qatlamlardagi elektronlar effektiv massalarining har xil qiymatli ekaniga e'tibor qaratib, elektronli holatlarning fizikaviy tabiati nazariy taxlillari F2-21 "Yarimo'tkazgich-dielektrik chegarasidagi sirt holatlar zichligini aniqlashning matematik modellashtirish" mavzusidagi fundamental davlat loyihasida yarimo'tkazgich sirt chegarasi yaqinidagi elektronli holatlarini aniqlashda foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2024-yil 24-oktabrdagi 02/02-3112-son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish yarimo'tkazgichlar sirti yaqinida o'lchamli kvantlashish effektini e'tiborga olgan holda tadqiqotlar olib borish imkoniyatini kengaytirdi.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishi natijalari 8 ta xalqaro va 2 ta Respublika miqyosidagi konferensiyalarda ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha asosiy ilmiy natijalar jami 18 ta ilmiy ishda chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 16 ta maqola va 4 ta monografiya nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, beshta bob, xulosa, chop etilgan ilmiy ishlar ro'xatidan iborat bo'lib, u 27 ta rasm, 3 ta jadval, 163 nomdagi foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatini o'z ichiga olgan holda 213 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Mazkur dissertatsiya ikki va uch o'lchamli pyezoyarimo'tkazgichlarda o'lchamli kvantlashish va fotonli kinetik hodisalarni yorug'likning qutblanish darajasiga va namunaning zonaviy tuzilishiga bog'liq holda tadqiq qilishga bag'ishlangan.

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslab berilgan, tadqiqotning O'zbekistonda fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, mavzu bo'yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi, muammoning o'rganilganlik darajasi keltirilgan. Shuningdek tadqiqot maqsadi, vazifalari, ob'yekti va predmeti tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari berilgan, olingan natijalarning nazariy va amaliy ahamiyatiga urg'u berilgan, tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, chop etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Pyezoyarimo'tkazgichlarda qutbiy bog'langan fototok**» deb nomlangan birinchi bobida simmetriya markazi mavjud bo'lmagan yarimo'tkazgich kristallarda optik va fotogalvanik effekt (FGE)larning holati va rivojlanishi muhokama qilingan, ularning opto - va fotoelektronikada, shuningdek ma'lumotlarni golografik yozishda qo'llanilishiga alohida e'tibor qaratilgan.

Past o'lchamli va hajmiy yarimo'tkazgichlar, grafen, topologik izolyator va Veyl yarimmetallarni statsionar bir jinsli yoritilganida sodir bo'ladigan qutbiy va spin bog'langan bir va ikki fotonli fotogalvanik effektlarni tadqiq etilgan ishlar tahlil qilingan.

Yorug'likning pyezoyarimo'tkazgichlarda bir va ikki fotonli yutilishida qutbiy bog'langan fototokning fenomenologik interpretatsiyasi keltirilgan. Xususan, fotonli ergashtirish effekti kvant mexanikaviy nazariyasida tok tashuvchilarga fotonlar impulsi va burchakli momentining bir vaqtda uzatilishi bilan tushuntiriladi, klassik nazariyada esa bu effekt tok tashuvchilarning yorug'lik to'liqlinining elektr va magnit maydonning bir vaqtning o'zida ta'sir etishi bilan aniqlanuvchi Lorents kuchining ta'sirida hosil bo'ladigan oqimi bilan tushuntiriladi.

Qutbiy bog'langan fotogalvanik effektning fizik tabiati qator o'ziga xos xususiyatlarga ega. Ulardan biri inversiya markazi bo'lmagan yarimo'tkazgichlarda aynan muvozanat printsipi bajarilmaydi, chunki ular fazo va vaqtga nisbatan mavjud simmetriyalarni tavsiflay olmaydi. Ushbu muvozanat printsipining buzilishi elektronlarning sochilishida kristallarning kinetik xossalarini sezilarli o'zgartiruvchi asimmetriyani yuzaga keltiradi va ixtiyoriy nomuvozanatli statsionar holatda elektr tokining paydo bo'lishi imkonini yaratadi.

Agar bu nomuvozanatli holat yoritilish tufayli vujudga kelsa, u holda yo'nalishi yorug'likning qutblanishiga va kristallning simmetriyasiga bog'liq bo'lgan fotogalvanik tok hosil bo'ladi.

Yorug'likning intensivligi ( $I$ ) kvadratiga bog'liq fototokni quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin:

$$\begin{aligned}
j_{\alpha}^{(2)} = I^2 & \left( A_{\alpha\beta\gamma\nu} \frac{e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\beta}^*e_{\gamma}}{2} \frac{e_{\mu}e_{\nu}^* + e_{\mu}^*e_{\nu}}{2} + iB_{\alpha\beta\gamma\lambda} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\lambda} \frac{e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\beta}^*e_{\gamma}}{2} + \right. \\
& \left. + C_{\alpha\beta\gamma} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\beta} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\gamma} + \right. \\
+ I^2 & \left( D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda} \frac{e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\beta}^*e_{\gamma}}{2} \frac{e_{\mu}e_{\nu}^* + e_{\mu}^*e_{\nu}}{2} q_{\lambda} + iF_{\alpha\beta\gamma\mu\lambda} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\lambda} \frac{e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\beta}^*e_{\gamma}}{2} q_{\mu} + \right. \\
& \left. + G_{\alpha\beta\gamma\lambda} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\beta} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\gamma} q_{\lambda} \right) \quad (1)
\end{aligned}$$

Bu yerda  $\vec{e}$  ( $\vec{q}$ ) – elektromagnit to‘lqinning qutblanish (to‘lqin) vektori va simmetrik  $(e_{\beta}e_{\gamma}^* + e_{\gamma}e_{\beta}^*)/2$  va antisimmetrik  $(e_{\beta}e_{\gamma}^* - e_{\gamma}e_{\beta}^*)/2$  ko‘paytmalar bir - biriga bog‘liq emas deb tasavvur etiladi.  $[e_m e_v^*]$ ,  $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$  kattaliklar va statsionar tok  $\vec{j}^{(2)}$  haqiqiydir, shuning uchun (1) tenglamadagi  $A_{\alpha\beta\gamma\nu}$ ,  $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ ,  $C_{\alpha\beta\gamma}$ ,  $D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda}$ ,  $F_{\alpha\beta\gamma\mu\lambda}$ ,  $G_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  tenzorlar ham haqiqiydir. Uchinchi rang tenzor  $C_{\alpha\beta\gamma}$   $\beta$  va  $\gamma$  bo‘yicha simmetriyaviy bo‘lib, simmetriyaviy xossalriga ko‘ra pyezotenzorga ayniydir. Shuning uchun  $C_{\alpha\beta\gamma}$  tenzor beshinchi rang tenzorlari  $A_{\alpha\beta\gamma\nu}$  va  $F_{\alpha\beta\gamma\mu\lambda}$  kabi simmetriya markazi bo‘lmagan kristallarda ham noldan farqli komponentalarga ega.  $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ ,  $D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda}$ ,  $G_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  tenzorlar ixtiyoriy simmetriyali kristallarda ham simmetriya markazi bo‘lmagan kristallarda ham noldan farqli komponentalarga ega bo‘ladi.

(1) tenglamaning uchinchi va oltinchi hadlari bilan bog‘liq fototoklar elliptik qutblangan yorug‘lik uchun noldan farqli qiymatlarga ega bo‘lib, chiziqli qutblangan yoki qutblanmagan yorug‘lik bilan yoritilganda vujudga kelmaydi. Shu sababli  $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  va  $G_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  tenzorlar bilan ifodalanuvchi effektning mos ravishda ikki fotonli tsirkulyar fotogalvanik effekt hamda ikki fotonli tsirkulyar ergashtirish effekti deb nomlash qulaydir.  $A_{\alpha\beta\gamma\nu}$  va  $D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda}$  tenzorlar bilan ifodalanuvchi effekt, odatda, chiziqli qutblangan yorug‘lik ta’sirida kuzatiladi va uni mos ravishda ikki fotonli chiziqli fotogalvanik effekt hamda ikki fotonli chiziqli ergashtirish effekti deb nomlash qulay.

(1) tenglamaning ikkinchi va to‘rtinchi hadlari bilan bog‘liq fototok bir vaqtning o‘zida elliptik va chiziqli qutblangan yorug‘lik bilan yoritilganida noldan farqli qiymatga ega. Umumiy fototokka beriladigan ana shu ulushlar bilan ikki fotonli fotogalvanik effektning bir fotonlisidan farq qiladi.  $A_{\alpha\beta\gamma\nu}$ ,  $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ ,  $C_{\alpha\beta\gamma}$ ,  $D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda}$ ,  $F_{\alpha\beta\gamma\mu\lambda}$ ,  $G_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  tenzorlarning vaqt inversiyasi operatsiyasiga nisbatan simmetriyaviy xossalriga ko‘ra effektning dissipativ jarayonlar bilan bog‘liq yoki bog‘liq emasligini tahlil qilish imkonini beradi. Shunday qilib, chiziqli fotogalvanik effekt (FGE) dissipativ jarayonlar bilan bog‘liq, tsirkulyar FGE esa bog‘liq emas. Chiziqli (FGE) - energiyani saqlanish qonunini ifodalovchi Dirak funksiyasi  $\delta$  bilan, tsirkulyar FGE esa Grin (yoki xususiy energiyaviy) funksiyalarning qutblari orqali aniqlanadi. Bu holda vaqt inversiyasida tok zichligi  $j$ , yorug‘likning to‘lqin vektori  $\vec{q}$  o‘z ishoralarini o‘zgartirishi va kattalik  $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$  o‘z ishorasini o‘zgartirmasligi e’tiborga olingan.

«Pyezokristallarda ikki fotonli ballistik fotogalvanik effekt» nomli ikkinchi bobda yorug‘likning nohiziqli yutilishida sodir bo‘ladigan qutbiy fotogalvanik effektlarning kvant mexanikaviy tahlillari ko‘rib chiqilgan. Fototok zona yoki zonaosti zonalarning tartib raqamiga nisbatan diagonal va nodiagonal tashkil etuvchilardan bo‘lgan ikki hildagi ulushlaridan iborat

$$\vec{j}_{\text{diaz}} = -e \sum_{nk} v_{nk} \vec{f}_{nk}, \quad \vec{j}_{\text{dib}} = -e \sum_{n \neq n', \vec{k}} v_{n'n}(\vec{k}) \rho_{m'}(\vec{k}), \quad (2)$$

bu yerda  $e$  - elementar zaryad (kovaklar uchun  $e > 0$ , elektronlar uchun  $e < 0$ ),  $\rho_{m'}(\vec{k})$  va  $v_{n'n}(\vec{k})$  - zichlik matritsasi va tezlik operatorining matritsaviy elementi,  $v_{nk} = \hbar^{-1} \nabla_{\vec{k}} E_{nk}$  -  $n$  zonadagi  $\vec{k}$  to‘lqin vektorli elektronning guruhli tezligi,  $\rho_{m'}(\vec{k}) = f_{nk}$  - generatsiya, sochilish va rekombinatsiya jarayonlari bilan aniqlanuvchi nomuvozanat holat taqsimot funksiyasi,  $n$  va  $n'$  murakkab zonali strukturadagi zonalarning, tushlangan zonalari to‘lgan kristallarda esa zona tushlangan holatlarining tartib raqami.

(2) tenglamaning diagonal ulushi yorug‘lik hisobiga indutsirlangan asimmetriyali taqsimot funksiya bilan aniqlanadi va u ballistik ulush deb nomlanadi. Nodiagonal ulush esa erkin tok tashuvchilarning har bir kvant o‘tishida real fazoda siljishi bilan bog‘langan bo‘lib, u siljishli ulush deb ataladi.

Kovak o‘tkazuvchanlikli kubik simmetriyali yarimo‘tkazgichlarda  $N$  - fotonli ergashtirish hodisasida elektronlar va impulsning relaksatsiya vaqti yaqinlashishidagi ergashtirish tokining zichligi  $\vec{j}^{(N)}$  quyidagicha ifodalanadi

$$\vec{j}^{(N)} = -e \sum_{kmm'} \left[ \vec{v}_{1k} \tau_p(1, \vec{k}) W_{1m'k; 2m, \vec{k} - N\vec{q}}^{(1)} - \vec{v}_{2k} \tau_p(2, \vec{k}) W_{1m', \vec{k} + N\vec{q}; 2m\vec{k}}^{(1)} \right]. \quad (3)$$

Quyida optik o‘tishlarning ehtimolligi ko‘rilgan

$$W_{1m'k; 2m, \vec{k} - N\vec{q}}^{(1)} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| M_{1m'k; 2m, \vec{k} - N\vec{q}}^{(N)} \right|^2 \left( f_{2, \vec{k} - N\vec{q}}^{(e)} - f_{1k}^{(e)} \right) \delta(E_{\vec{k}} - E_{2, \vec{k} - N\vec{q}} - N\hbar\omega), \quad (4)$$

$$W_{1m', \vec{k} + N\vec{q}; 2m\vec{k}}^{(1)} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| M_{1m', \vec{k} + N\vec{q}; 2m\vec{k}}^{(N)} \right|^2 \left( f_{2k}^{(e)} - f_{1, \vec{k} + N\vec{q}}^{(e)} \right) \delta(E_{1, \vec{k} + N\vec{q}} - E_{2k} - N\hbar\omega). \quad (5)$$

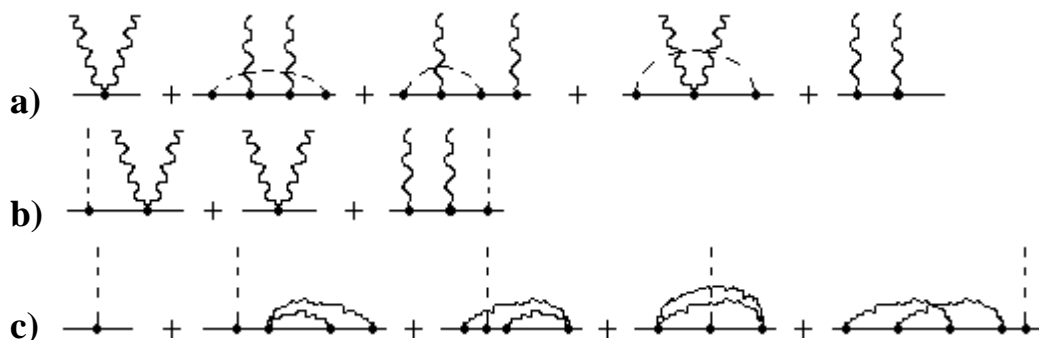
Bu yerda  $f_{lk}^{(e)} = 1 - e^{-(\chi + E_{lk})/k_B T}$ ,  $e > 0$ ,  $E_{lk} - l$  tarmoqdagi elektronlarning - energetik spektri,  $\vec{v}_{lk}$  - tezligi,  $\tau_p(l, \vec{k})$  - impulsi bo‘yicha relaksatsiya vaqti,  $l$  - murakkab zona tuzilish strukturaning tartib raqami,  $m, m'$  - kovaklarning to‘ldirilgan holatlari indeksleri,  $M_{1m'k; 2m\vec{k}}^{(N)}$  -  $N$  - fotonli o‘tishlarning tarkibiy matritsaviy o‘tishlari elementi,  $\chi$  - kovaklarning kimyoviy potentsiali.

Kogerentli to‘yinish (Rabi effekti) yorug‘likning qutblanish holatiga bog‘liq bo‘lgan ergashtirish tokining o‘zgarishiga ta’sir qiladi. Endi Rabi effekti bilan bog‘liq yorug‘likning bir fotonli yutilishining ulushini ko‘rib chiqamiz. Rabi effektini e’tiborga olish uchun bir fotonli optik o‘tishning  $W^{(1)}$  ehtimolligi ifodasidagi yig‘indi belgisida

$$f_2^{(e)} - f_1^{(e)} \rightarrow f_2^{(e)} - f_1^{(e)} + \delta f_2^{(e)} - \delta f_1^{(e)} = (f_2^{(e)} - f_1^{(e)}) [1 - (T_1 + T_2) \times \frac{2\pi}{\hbar} |M_{12}^{(1)}|^2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \hbar \Gamma \cdot ((\Delta E)^2 + \hbar^2 \Gamma^2)^{-2}]$$

o'zgartirish kerak, bu yerda  $\Gamma$  - so'nish koeffitsiyenti,  $T_1(T_2)$  - og'ir (yengil) kovaklarning to'yinish sohasidan chiqish vaqti.

Tashqi doimiy elektr maydoni va fazoviy bir jinslilik bog'lanish mavjud sharoitda bo'lmagan simmetriya markazi bo'lmagan murakkab zonali strukturali yarimo'tkazgichlarda qutblangan yorug'likning yutilishi hisobiga hosil bo'ladigan, vujudga keladigan ikki fotonli qutbiy FGENi ko'rib chiqamiz. Bu holda ikki fotonning ham ketma ket hamda bir vaqtning o'zida yutilishini e'tiborga olamiz (1-rasm).



**1-rasm. Yarimo'tkazgichlarda ikki fotonli qutbiy fotogalvanik effektga olib keluvchi interferentsiya Feynman-Keldish diagrammalari orqali uzluksiz chiziq-elektron yoki kovakni, to'lqinsimon chiziq-fotonni, shtrixli chiziq-fononni ifodalaydi.**

Qutbiy fototokning fizik tabiati, yuqorida qayd qilinganidek, kristallning simmetriyasi, xususan, unda simmetriya markazining bo'lmashligi bilan aniqlanadi, chunki bunday kristallarda aynan muvozanatlashtiruvchi simmetriya printsipti har doim ham bajarilavermaydi. Natijada muhitdagi nomuvozanatli statsionar holat fotoindustirlangan tok tashuvchilar oqimi kabi kvazizarralar paydo bo'lishiga olib keladi.

Agar nomuvozanatli holat qutblangan yorug'lik ta'sirida sodir bo'lsa, u holda uning yo'nalishi kristallning simmetriyasi va ikki fotonli optik o'tishlarning tabiati bilan aniqlanadi. Kelgusida alohida olingan fotonlarning parametrlarini bir xil deb hisoblaymiz. Bir fotonli ballistik chizikli FGE holdagi kabi zonalararo yoki murakkab zonaviy o'tishlarda ikki fotonli to'g'ri optik o'tishlar hisobiga ikki fotonli qutbiy ballistik va siljishli FGE vujudga kelmaydi.

Tabiatan qutbiy fototok elektronlarning fonon, foton yoki kristall strukturasi boshqa turdagi tashkil etuvchilari bilan asimmetriyaviy o'zaro ta'siri, ikki fotonli optik o'tishlar ehtimolligining asimmetriyaviy qismi  $W_{n\vec{k}', n\vec{k}}^{(2, ass)}$  bilan aniqlanadi.  $W_{n\vec{k}', n\vec{k}}^{(2, ass)}$  kattalikka ulushni ikkita uchinchi tartibli, birinchi va beshinchi tartibli, ikkinchi va to'rtinchi tartibli matritsaviy elementlarning interferentsiyasi beradi. Bu ballistik chizikli FGE nafaqat oxirgi va boshlang'ich holatlar uchun, balki

boshlang'ich va oraliq holatlarning bittasini o'z ichiga olgan energiya saqlanish qonuni bajarilganida sodir bo'ladi.

Kovaklarning oxirgi holatlaridagi to'liq vektorlari uchun ifodalar fototok ifodalarida  $\delta$  - funksiyaning argumentlari sifatida qayd qilingan energiyaning saqlanish qonunlaridan aniqlanadi. Oraliq hisoblashlarda tarkibiy matritsaviy elementdagi energiyaviy kasrda  $\lim_{\Gamma \rightarrow 0} (E_i - E_j \pm i\Gamma)^{-1} = P(E_i - E_j)^{-1} \mp i\pi\delta(E_i - E_j)$  ko'rinishda shakl almashtirish bajarilishi kerak, bu yerda  $P$  simvol bosh qiymatga nisbatan olingan integralni anglatadi. Natijada  $W_{n\vec{k}', n\vec{k}}^{(2, ass)}$  ga ulushni bir kasrning haqiqiy qiymatli hadiga ikkinchi kasrning mavhum qiymatli hadi va aksincha ko'paytmalariga proporsional bo'lgan hadlar beradi Mos holda ballistik chiziqli FGE tokiga 1-rasmda tasvirlangan uch xil tur optik o'tishlar o'z ulushlarini beradi. 1-rasmdan chiziqli FGE birinchi va beshinchi (B kanal) tartibli hamda, fononlar ishtirok etadigan (A kanal) va ishtirok etmaydigan ikkinchi va to'rtinchi jarayonlarning interferentsiyasi tufayli sodir bo'lishini ko'rish mumkin.

Umumiy holda FGEning fototoki ifodasini mikroskopik hisoblashda foydalaniladigan  $\vec{j}_{PhG} = -e \sum_{m\vec{k}} \vec{v}_{m\vec{k}}(\vec{k}) \rho_{m\vec{k}}(\vec{k})$  ifoda ko'rinishda tanlanadi, bu yerda  $\rho_{m\vec{k}}(\vec{k})$  va  $\vec{v}_{m\vec{k}}(\vec{k})$  - zichlik matritsasi va tezlik operatorning  $|n\vec{k}'\rangle$  va  $|n\vec{k}\rangle$  holatlarga nisbatan hisoblangan matritsaviy elementlari,  $\rho_{m\vec{k}}(\vec{k}) = f_{n\vec{k}}$  - tok tashuvchilarning generatsiya, sochilish va rekombinatsiya jarayonlari bilan aniqlanuvchi nomuvozanat holatdagi taqsimot funksiyasi. Muvozanat holatda (shuningdek chegaralangan vaqtda  $t \rightarrow \infty$  holda o'zaro ta'sirlarning adiabatik bog'lanishida)

$\rho_{m\vec{k}}(\vec{k}) = f_0(E_n(\vec{k}))\delta_{m\vec{k}}$ , bunda  $f_0(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E}{k_B T}\right)\right]^{-1}$  - muvozanat holatdagi taqsimot funksiyasi.

Ikki fotonli ballistik chiziqli FGE tokiga ulush qo'shuvchi quyidagi optik o'tishlarni (2-rasm) batafsil ko'ramiz: a) fononning yutilishi yoki uzatilishi bilan bog'liq ikki fotonli optik o'tishlar; b) fononlari oraliq o'tishlardagina ishtirok etuvchi ikki fotonli optik o'tishlar; c) oraliq o'tishlardagina ishtirok etuvchi fonon yutilishi yoki uzatilishi bilan bog'liq bo'lgan ikki fotonli optik o'tishlar.

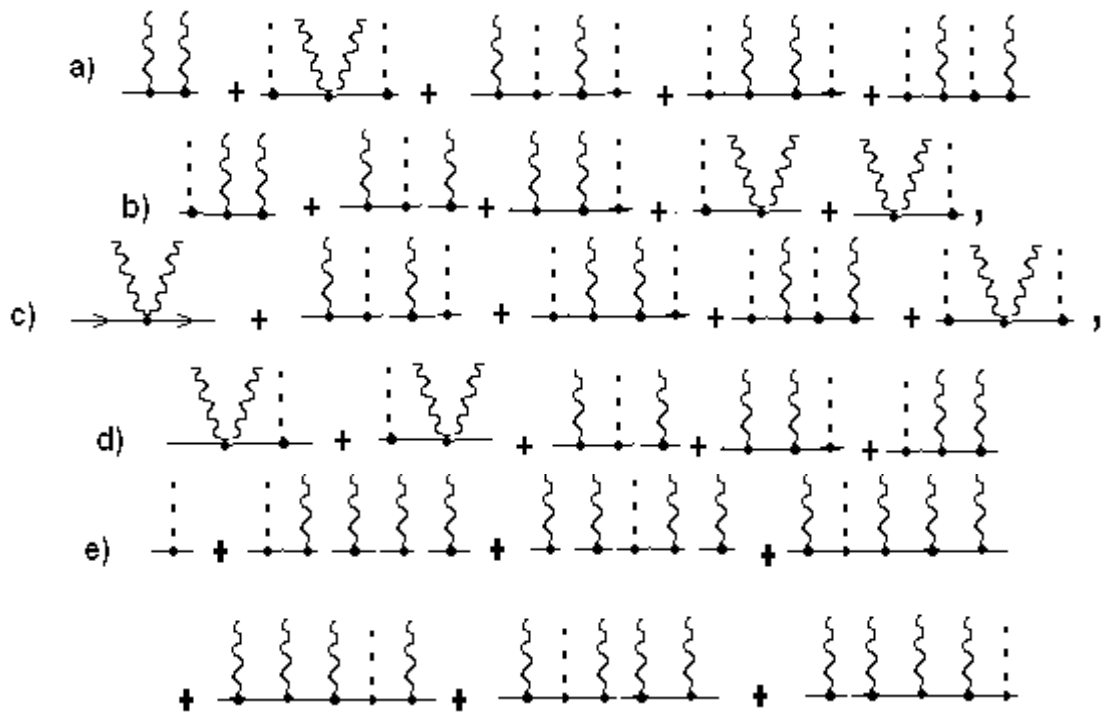
Xususan, zona tarmoqlariaro fononlar real, fotonlar esa virtual hisoblangan optik o'tishlar (2, e-rasm) bilan bog'liq bo'lgan ballistik fototok quyidagi ifoda yordamida aniqlanadi

$$\vec{j} = e \left[ -\sum_k \vec{V}_{1\vec{k}} \tau_{1\vec{k}} \cdot \left( \frac{\partial f_{1\vec{k}}}{\partial t} \right) + \sum_{k'} \vec{V}_{2\vec{k}'} \tau_{2\vec{k}'} \cdot \left( \frac{\partial f_{2\vec{k}'}}{\partial t} \right) \right]. \quad (6)$$

Bunda

$$\left( \frac{\partial f_{2\vec{k}}}{\partial t} \right) \propto \sum_{k'} \left[ d_{2\vec{k}', 1\vec{k}}^{(\pm)} + \sum_{m, l=1, 2} \frac{M_{2\vec{k}, m\vec{k}}^{(2)} d_{m\vec{k}', l\vec{k}}^{(\mp)} M_{l\vec{k}, 1\vec{k}}^{(2)}}{(E_{m\vec{k}'} - E_{1\vec{k}} - 2\hbar\omega \pm \hbar\Omega) \cdot (E_{l\vec{k}} - E_{1\vec{k}} - 2\hbar\omega)} + \dots \right]^2 \times \left( N_\Omega + \frac{1 \pm 1}{2} \right) \left[ f_{1\vec{k}} (1 - f_{2\vec{k}'}) - f_{2\vec{k}'} (1 - f_{1\vec{k}}) \right] \delta(E_{2\vec{k}} - E_{1\vec{k}} \pm \hbar\Omega). \quad (7)$$





**2-rasm. Fononlar ishtirokida kechadigan zonachalararo va bir zonacha ichida sodir bo‘ladigan ikki fotonli optik o‘tishlar. Ular bir vaqtda e‘tiborga olinishi tok tashuvchilarning asimmetriyaviy sochilishiga, ya’ni fotogalvanik effektga olib keladi. Bu yerda uzluksiz chiziqlar-elektronni, to‘lqinsimon-fotonni, shtrixli-fononni ifodalaydi.**

Bu yerda  $M_{n\bar{k},m\bar{k}}^{(2)}$  - ikki fotonli yorug‘lik yutilishining tarkibiy matritsaviy elementi,  $N_{\Omega} + \frac{1 \pm 1}{2}$ ,  $d_{l\bar{k}',1\bar{k}}^{(\pm)} = F_{m\bar{k}'}^+ D_{\bar{q}} F_{n\bar{k}}^-$  - elektron-fonon o‘zaro ta’sir  $D_{\bar{q}} = D_{\bar{k}'-\bar{k}}$  operatorining matritsaviy elementi, bu holda "+" belgi  $\Omega$  chastotali fononning yutilishiga, "-" ishora  $\Omega$  chastotali fononning uzatilishiga mos keladi,  $N_{\Omega}$  - fononlarning taqsimot funksiyasi,  $f_{m\bar{k}} - E_{m\bar{k}}$  tok tashuvchilarning energiyasi taqsimot funksiyasi,  $\delta(E_{m\bar{k}} - E_{n\bar{k}} - \hbar\omega)$  -  $\delta$  - optik o‘tish bilan bog‘liq tegishli energiya saqlanish qonunini ifodalovchi Dirak funksiyasi,  $n, m$  - qaralayotgan zonaga tegishli zona (yoki tarmoq)ning tartib raqami,  $\omega, I, \vec{e}$  - yorug‘likning chastotasi, intensivligi, qutblanish vektori,  $H$  - tok tashuvchilarning effektiv gamiltoniani,  $F_{m\bar{k}}^-$  - tok tashuvchilar elementlarining to‘lqin funksiyasi uchun qayd qilingan ifoda yordamida aniqlanuvchi ustun matritsa.

Yarimo‘tkazgichlarda yorug‘likning ikki fotonli yutilishida ballistik chiziqli FGE, bir fotonli yaqinlashishidagi kabi, har biri elektron - fonon va elektron - foton o‘zaro ta’sir operatorlar matritsaviy elementlari ko‘paytmasining mavhum hadi

bilan aniqlanuvchi  $\Phi_i(\vec{k}, \vec{k}')$  funksiyalar bilan ifodalandi. Bunda aniq bir tartibda olingan o‘zaro ta’sir operatorlar matritsaviy elementlarining pastki indeksleri  $m, n, l$  qaralayotgan zonalarining zona(tarmog‘i) tartib raqamlariga mos kelishi lozim.

Masalan,  $p - GaAs$  tur yarimo'tkazgichning valent zonasi uchun  $m, n, l = 1, 2$  deb

qabul qilinadi. Bunday funksiyalar bilan bir qatorda ularda  $M_{2\bar{k}, 1\bar{k}}^{(2)} \rightarrow \sum \frac{M_{2\bar{k}, 1\bar{k}}^{(1)} M_{1\bar{k}, 1\bar{k}}^{(1)}}{E_{1\bar{k}} - E_{1\bar{k}} - i0}$

almashtirish orqali aniqlanuvchi funksiyalar ham mavjud. Elektron-fonon (foton) o'zaro ta'sirlashuvlar (bitta zona ichidagi va zonalararo) matritsaviy elementlar modullarining kvadratiga proporsional bo'lishi mumkin. Chunki bunday hollarda tok tashuvchilarning fonon(foton)larda asimmetriyaviy sochilishi sodir bo'lmaydi, ya'ni fototok hosil bo'lmaydi. Xususan,  $p - GaAs$  da yorug'likning ikki fotonli yutilishida fotouyg'otilgan kovaklarning to'lqin vektori:  $k_\omega = \sqrt{2\mu\omega / \hbar}$ , og'ir

(yengil) kovaklarning energiyasi:  $E_{hh^{(lh)}}^* = \frac{2m_{lh^{(hh)}}}{m_{hh} - m_{lh}} \hbar\omega$ ,  $m_{hh} = m_1 (m_{lh} = m_2)$  -

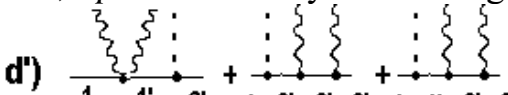
og'ir(yengil) kovaklarning effektiv massasi. Bunda kovaklarning sferik energiyaviy spektri tanlangan. U holda valent zonasidagi kovaklarning tarmoqlariaro optik o'tishlarning tabiati (turi)ga qarab oraliq holatlardagi kovaklarning energiyasi quyidagicha:  $E_{hh}^* \mp \hbar\Omega$ ,  $E_{hh}^* + \hbar\omega \mp \hbar\Omega$  aniqlanadi,  $E_{lh}^* \mp \hbar\Omega$ , ularga mos kovaklar

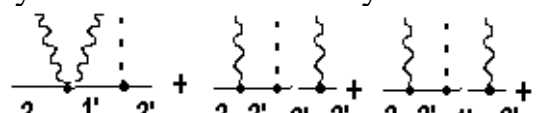
to'lqin vektorlari esa  $k_1 = \sqrt{\frac{2m_{hh}}{\hbar^2} (E_{hh}^* \mp \hbar\Omega)}$ ,  $k_2 = \sqrt{\frac{2m_{hh}}{\hbar^2} (E_{hh}^* + \hbar\omega \mp \hbar\Omega)}$ ,

$k_3 = \sqrt{\frac{2m_{hh}}{\hbar^2} (E_{lh}^* \mp \hbar\Omega)}$  qiymatlarning biriga teng bo'ladi. Bu holda yuqorigi (pastki)

ishora  $\hbar\Omega$  energiyali  $LO$  fononlarning yutilishi(uzatilishi)ga mos keladi.

Oraliq holatlardagi kovaklarning to'lqin vektorlari oxirgi munosabatlar yordamida  $m_{hh} \rightarrow m_{lh}$  almashtirish bilan aniqlanadi. Ta'kidlash joizki, kovaklarning energiyasi  $\hbar\Omega$  dan kichik bo'lgan chastotalar sohasida uzatilishi bilan (agar ruxsat etilgan bo'lsa) bog'liq bo'lgan jarayonlar ballistik chiziqli FGE tokiga ulush bermaydi. Masalan,  $p - GaAs$  yarimo'tkazgichda cheksiz og'ir kovaklar

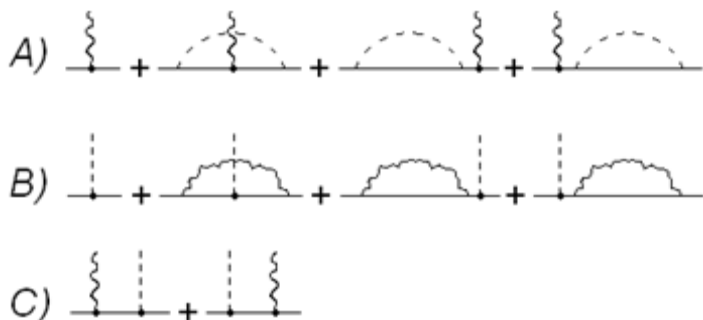
yaqinlashishida **d')**  keltirilgan diagrammalar bilan ifodalanuvchi jarayonlarning bir qismi fototokka o'z ulushini bermaydi, chunki bunday hollarda asimmetriyali sochilishlar sodir bo'lmaydi Ta'kidlaymizki,

**d'')**  tur jarayonlar fototokka o'z ulushini fononning energiyasi ikki foton energiyasiga teng bo'lganida beradi. Bu hol, fikrimcha, eksperimentda kuzatilmaydi.

Xotimada simmetriya markazi bo'lmagan kristallarda yorug'lik intensivligiga kvadratik (nochiziqli) bo'lgan chiziqli FGE kuzatish imkonlari ko'rsatilgan. Shuningdek, bir o'qli simmetriyali pyezoyarimo'tkazgichlarda (shuningdek, girotrop kristallarda) fototokning spektral bog'lanishida  $\hbar\omega \rightarrow 2\Delta$  chastotalar sohasida o'ziga xoslik kuzatilishini va zonalaran birining o'rkachsimonligi tufayli sodir bo'lishiga, tok tashuvchilarni yarimo'tkazgich zonasining tarmoqlariaro to'g'ri

optik o'tishlar bilan tavsiflanuvchi yorug'lik yutilish ko'effitsiyentining temperaturaviy bog'lanishiga e'tibor qaratilgan.

«Pyezoyarimo'tkachlarda siljishli fotogalvanik effektlar» nomli uchinchi bobda to'g'ri optik o'tishlarda (fotonli mexanizm) hamda kovaklarning fononlarda sochilishida (fononli mexanizm) tok tashuvchilar to'lqin paketi og'irlik



**3-rasm. Interferentsiyasi murakkab zonaali yarimo'tkazgichlarda chiziqli fotogalvanik effektga olib keluvchi Feynman-Keldish diagrammalari: uzluksiz chiziq-elektron(yoki kovak), to'lqinli chiziq-foton, shtrixli chiziq-fonon.**

markazining real fazoda siljishi bilan bog'liq bo'lgan siljishli chiziqli FGE qaralgan. Kovak o'tkazuvchanlikli galliy arsinedida kovaklar effektiv gamiltonianida to'lqin vektorlariga nisbatan chiziqli va eng katta (relyativistik) hadlar e'tiborga olinganida sodir bo'ladigan qutbiy bir fotonli fototokning spektral va temperaturaviy bog'lanishlari hisoblangan.

Ballistik fototok a elektron - foton hamda elektron

- foton o'zaro ta'sirlarning asimmetriyasi e'tiborga olinganida hosil bo'ladi (3-rasm). Bu holda 3-rasmda tasvirlangan optik o'tishlarning har biri alohida ulush beradi, A va V tur jarayonlar ulushining temperaturaviy bog'lanishi 4-rasmda tasvirlangan. 4-rasmdan ko'rinyaptiki, A tur jarayon ulushi musbat, V tur

jarayon ulushi manfiy ishoralidir, biroq "ballistik+siljishli" fototokka berilgan natijaviy ulush musbatdir.

Ta'kidlaymizki, S jarayonlarning fototokka ulushi 5-rasmda qayd etilmagan, biroq hisoblashlarda e'tiborga olingan. Miqdoriy hisoblashlarda galliy arsinedi parametrlari uchun quyidagi qiymatlar tanlangan:  $\hbar\Omega_{LO} = 36 \text{ meV}$  - uzun to'lqinli optik fonon energiyasi, past va yuqori chastotali dielektrik kirituvchanliklar:  $\epsilon_0 = 12.5$  i  $\epsilon_\infty = 10.9$ ,  $|D'| = 3.9 \cdot 10^{-23} \text{ eV} \cdot \text{sm}^3$ ,  $\rho = 5.31 \text{ g/sm}^3$ .

5-rasmda kovaklarning kontsentratsiyasi  $r=7,4 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  va quyidagi:

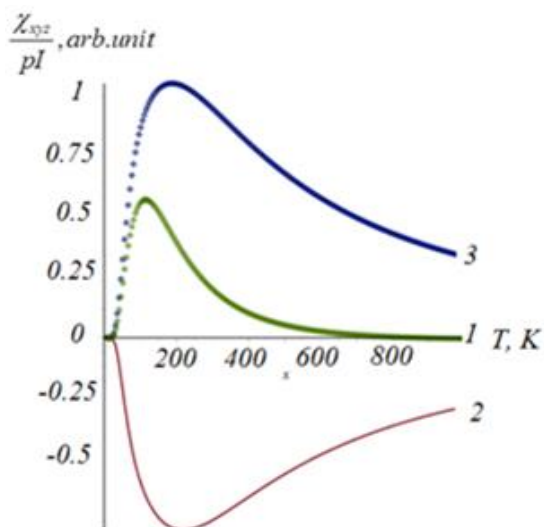
$$|D'| = 3,25 \cdot 10^{-23} \text{ eV} \cdot \text{cm}^3 \quad (k_0 = (1 \div 6) \cdot 10^{-10} \text{ eV} \cdot \text{sm}) - \text{kovaklar effektiv gamilto-}$$

nianidagi to'lqin vektorlariga nisbatan chiziqli (kvadratik) hadlarga tegishli parametrlar,  $m_2 = 0,68m_0$   $m_1 = 0,12m_0$  - og'ir va yengil kovaklarning effektiv massasi bo'lgan r - GaAs uchun chiziqli FGE tokining temperaturaviy bog'lanishiga nisbatan nazariy hisoblashlar va tajriba natijalari solishtirilgan.

Ta'kidlaymizki, kovaklar effektiv gamiltonianidagi to'lqin vektorlariga nisbatan chiziqli (kvadratik) hadlarga tegishli bo'lgan zonaviy parametrlarning ishoralari noma'lum. Shuning uchun fototokning  $D'$  va  $k_0$  konstantalarga bog'liq

bo'lgan ulushlari to'g'risida aniq gapirish mumkin emas. Biroq agar  $D'$  kattalikni musbat,  $k_0$  ni manfiy deb hisoblasak, u holda fototokka berilgan natijaviy ulush

tajriba natijalarga yaqinlashadi. Agar ular bir xil ishorali etib tanlansa, u holda fototokning natijaviy ulushining moduli tajriba natijalaridan keskin farq qiladi.



**4-rasm. GaAs valent zonasining tarmoqlariaro optik o'tishlar uchun foton energiyasi 117 meV bo'lganda  $c_{xyz}/p$  kattalikning temperaturaga bog'liqligi, bu yerda  $c_{xyz}$  chiziqli FGE tenzori,  $p = 7,4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ -kovaklarning konsentratsiyasi, 1 -fototokka faqat fotonlar, 2 - faqat fononlar ishtirok etgan optik o'tishlar ulushi, 3-qolgan barcha tur optik o'tishlarning natijaviy ulushi.**

qolsa, u holda fototokning fononlar uzatilishi bilan bog'liq maksimumi (taqriban 1,6 marta) ortadi va katta temperaturalar sohasiga siljiydi. Fototokning fononlar yutilishidagi maksimumi deyarli o'zgarmaydi (aniqrog'i 1,08 martaga kamayadi), biroq bu holda ham katta temperaturalar sohasiga siljiydi.

Ta'kidlaymizki, ushbu nazariy va eksperimental temperaturaviy bog'lanishlar fononlarning yutilishi bilan bog'liq bo'lgan jarayonlarda hamda  $m_1/m_2 = 1.135$  nisbatda bir biriga mos keladi.

5-rasmda natijaviy  $\chi_{xyz}/p$  kattalikning kovaklar konsentratsiyasi  $p=7,4 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  bo'lgan  $p$ -GaAs namunalari uchun nazariy va eksperimental bog'lanishlari solishtirilgan. 5-rasmdan ko'rinayaptkik, xona temperaturasi sohasida nazariya va eksperiment juda yaxshi mos tushadi, agar fotonli mexanizmning fototokka ulushi e'tiborga olinganida  $T > 200 \text{ K}$  temperaturalar sohasida nazariy va eksperimental natijalar o'rtasida 20%dan ortiq bo'lmagan farq bo'ladi. Ushbu holat

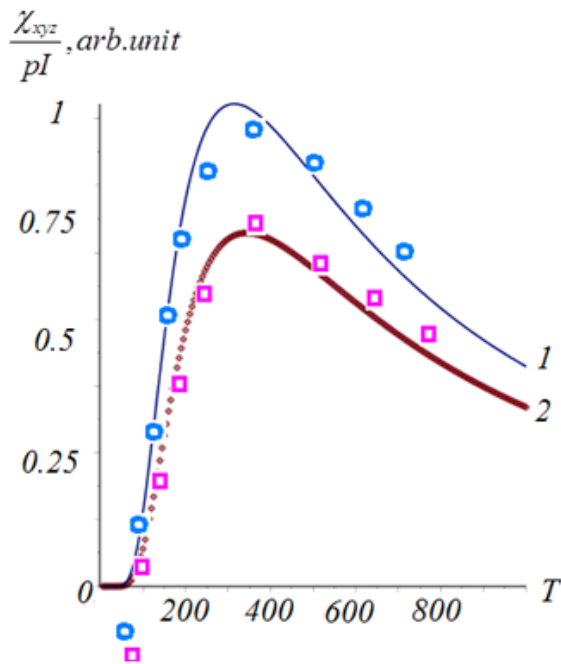
Hisoblashlar ko'rsatadiki,  $p$ -GaAsda zonaviy parametrlarni miqdoran musbat deb olinsa, u holda foton energiyasining ortishi bilan fototokning maksimumi ortadi va katta temperaturalar sohasiga siljiydi. Masalan,  $m_2 = 0,68m_0$ ,  $m_1 = 0,12m_0$  hol uchun  $\hbar\omega = 117 \text{ meV}$  qiymatda fononlarning uzatilishi bilan bog'liq bo'lgan fototok maksimumiga  $T=120\text{K}$  temperaturada, fononlarning etilishida esa  $T=360 \text{ K}$ da erishadi.

$\hbar\omega = 130 \text{ meV}$  holda

fononlarning uzatilishi bilan bog'liq bo'lgan fototok maksimumiga  $T=180\text{K}$  da, fononlarning yutilishida esa  $T=420 \text{ K}$ da erishadi. Foton energiyasi ortishi bilan fononlarning yutilishi bilan bog'liq bo'lgan fototokning maksimal qiymati o'zgarmaydi, fononlarning yutilishida esa 1,135 marta ortadi.

Ta'kidlaymizki, yengil kovaklarning effektiv massasi orttirilsa (masalan, 4/3 marta), biroq og'ir kovaklar effektiv massasi ( $m_1 = 0,12m_0$ ) va yorug'lik chastotasi ( $\hbar\omega = 117 \text{ meV}$ ) o'zgarmas

tok tashuvchilarning fononlar va fotonlarning asimmetriyaviy sochilishlari tufayli tok bir xil yoʻnalishda harakatlanishi bilan tushuntiriladi.



**5-rasm. Kovaklarning konsentratsiyasi  $p = 7,4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$  boʻlgan  $p\text{-GaAs CO}_2$  lazer bilan yoritilganda natijaviy (ballistik+siljishli)  $c_{xyz}/p$  kattalikning nazariy (uzluksiz chiziq) va eksperimental temperaturaviy bogʻlanishlar: 1-toʻlqin uzunligi 10,6 mkm, 2-toʻlqin uzunligi 9,5 mkm boʻlgan yoritilishga mos keladi. Aylana va romblar bilan tajriba natijalari koʻrsatilgan.**

Hisoblashlarda yorugʻlikning yutilishida fotonlar impulslariga nisbatan anizotropiyali taqsimlangan tok tashuvchilar hosil boʻlishi, soʻngra ular fononlar, kirishmalar va oʻzaro toʻqnasha boshlashi hisobga olingan, natijada kaskadli sochilishning har bir bosqichida real fazoda siljiy boshlashi, umumiy fotokka oʻz ulushlarini qoʻshib boradi. Bu tok boshlangʻich holatdagi kovaklarning sochilishlari tufayli yuzaga keladigan tokdan nafaqat toʻqnashuvlar bilan bogʻliq taqsimot anizotropiyasi darajasining kamaya borishi, balki oʻrtacha siljishning energetik bogʻlanishiga hisobiga ham kamaya borishi bilan farq qiladi. Bu holda "partsiyal" fototoklar qarama - qarshi ishoralarga ega boʻlishi mumkin (4-rasm, 1 va 2 egri chiziqlar) taʼkidlab oʻtamiz. Chiziqli siljish FGE inversiya markazi boʻlmagan yarimoʻtkazgich nanostrukturalarida ham sodir boʻlishi mumkinligini taʼkidlash joiz. Bu holda chiziqli siljish FGE tokiga 3-rasmda keltirilgan jarayonlarning interferentsiyasi ulush qoʻshadi, chunki yorugʻlikning bir zona ichida yutilishida kvantlashgan oʻrada tok tashuvchilarning oʻlchamli

kvantlanishi hisobiga namoyon boʻladigan holatlararo toʻgʻri optik oʻtishlari bilan bogʻliq qoʻshimcha mexanizmi paydo boʻladi.

Brillyuen zonasining markazida kechuvchi bunday oʻtishlar, mos ravishda, hajmiy effektiv massalar orqali, Brillyuen zonasining markazidan tashqarida esa koʻndalang effektiv massalar orqali tasvirlanadi ular, oʻz navbatida, oʻlchamli kvantlashgan zonadagi boshlangʻich va oxirgi holatlar tartib raqamlari bilan bogʻliq boʻladi. Bunday oʻtishlarning fototokka beradigan ulushini hisoblashda hajmiy kristallarda foydalangan chiziqli siljish FGE tokining ifodasida holatlarning qisman toʻlganligini eʼtiborga olish zarur. Shuning uchun fototokni hisoblashda bitta zona ichidagi optik oʻtishlar uchun nafaqat bir xil tartib raqamli oʻlchamli kvantlashgan holatlar, balki har xil tartib raqamli oʻlchamli kvantlashgan holatlar boʻyicha yigʻindi olish zarur.

$n\text{-GaP}$ da ikki fotonli chiziqli siljish FGE tokining temperaturaviy bogʻlanishi elektronlarning  $E_{x_3, x_1} = A_{3,1} k^2 \pm \frac{\Delta}{2}$  energetik spektrida oʻtkazuvchanlik

zonasining zonalariaro to'g'ri optik o'tishlar bilan ifodalanuvchi yorug'likni yutilish ko'effitsiyentining temperaturaviy bog'lanishi

$$K_{\parallel}(2\omega, T) = \frac{4e^2 P^2}{cn_{\omega} \omega \hbar^2 (A_3 - A_1)} k_{\omega} f(k_{\omega}) \quad \text{orqali aniq lanadi, bu yerda}$$

$$k_{\omega}^2 = (2\hbar\omega - \Delta) / (A_3 - A_1), \quad f(k_{\omega}) = \exp\left(\left(E_F - A_1 k_{\omega}^2 - \frac{\Delta}{2}\right) / k_B T\right), \quad \Delta - \text{zonalar}$$

orasidagi energetik tirqish,  $E_F$  - elektronlar uchun Fermi energiyasi. Agar elektronning energetik spektri quyidagi ko'rinishda bo'lsa:

$$E_{x_3, x_1} = Ak_z^2 + Bk_{\perp}^2 \pm \left(\frac{\Delta^2}{4} + P^2 k_z^2\right)^{1/2}, \quad \text{u holda ikki fotonli tokning temperaturaviy}$$

bog'lanishi 
$$K_{\parallel}(2\omega, T) = \frac{e^2}{cn_{\omega}} \frac{k_B T}{\hbar} \frac{1}{B} \frac{1}{k_z^{(\omega)}} \cdot e^{\frac{\hbar\omega - A(k_z^{(\omega)})^2}{k_B T}} \cdot e^{\frac{E_F}{k_B T}}$$
 munosabat yordamida

aniqlanadi, bu holda  $k_z^{(\omega)} = \frac{\Delta}{2P} \sqrt{\left(2\frac{\hbar\omega}{\Delta}\right)^2 - 1}$  va yorug'lik kristallning bosh simmetriya o'qi ( $C_3$ ) bo'ylab tarqaladi deb faraz qilinadi.

**«Yarimo'tkazgichlarda Rabi effekti hisobga olingan ko'p fotonli chiziqli sirkulyar dixroizm»** nomli to'rtinchi bobda Keyn modeliga ko'ra qutblangan yorug'likning ko'p fotonli yutilishi va chiziqli sirkulyar dixroizmining, shuningdek o'lchamli indutsirlangan yarimo'tkazgichli strukturalarda yorug'likning yutilishi nazariy tadqiq qilingan. Umuman olganda, yorug'likning ko'p fotonli yutilishi keng zonali yarimo'tkazgichlarda olib borilgan, chunki ularning fiziko-kimyoviy xususiyatlari qolganlarga nisbatan chuqurroq o'rganilgan. Biroq, tor zonali kristalllarda qator fotonli kinetik hodisalarni nazariy o'rganishda hisoblashlarni nafaqat Lattinjer-Kon, balki tok tashuvchilarning effektiv gamiltoniani kamida 6x6 yoki 8x8 o'lchamli matritsalar ko'rinishida qayd qilinadigan ko'p zonali Keyn yaqinlashishda olib borish lozim. Xususan pyezoyarimo'tkazgichlarda spin-orbital ajragan zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga uch fotonli optik o'tishlarning matritsaviy elementlari (1-jadval)  $\mathfrak{R}_j (j = 3 \div 12)$  - yorug'likning qutblanish vektoriga va chastotaga murakkab ko'rinishda bog'liq bo'lgan funksiyalar,  $P_{cv}$  - Keyn parametri va boshqa kattaliklar yordamida tahlil qilinadi. 1-jadval asosida *InSb* uchun hisoblangan uch fotonli chiziqli sirkulyar dixroizm ko'effitsiyenti ( $\eta^{(3)}$ ) ning burchakka bog'liqligi 6-rasmda keltirilgan bo'lib, jadvaldagi 1-, 2-, 3-, 4- optik o'tishlar a), b), c), d) rasmlarda ko'rsatilgan. Bu rasmdan ko'rinyaptiki,  $\eta^{(3)}$  ko'effitsiyent qiymati burchakka bog'liq holda ossillyasiyalanada va chastotaning sakrashiga qarab uning amplitudasi kamayib borishini ko'rish mumkin. 7-rasm. *InSb* da xona temperaturasida hisoblangan uch fotonli yutilish ko'effitsiyenti ( $K^{(3)}$ ) ning burchakka bog'liq ostsilyatsiyalanishi va chastotaning ortishi bilan orta borishi, ekstremumga erishib so'ngra kamayib borishi

ko'rsatilgan. Bu holat  $\eta^{(3)}$  kattalikning chastotaga murakkab bog'langanligi bilan izohlanadi.

1-jadval.

| № | Virtual holatlar  | $ \text{SO}, -1/2\rangle \rightarrow  c, -1/2\rangle$ tur optik o'tish matritsaviy elementi                            |
|---|---|--|
| 1 | Valent zonasida   | $\frac{i}{2\sqrt{3}} \frac{\hbar^2 P_{cv} B k^2}{m_c \hbar \omega} e'_z \left( \Re_3  e'_+ ^2 + \Re_4 e_z'^2 \right).$ |
| 2 | Spin orbital ajragan zonada   | $\frac{-i}{2\sqrt{3}} \left( \frac{\hbar^2}{m_c} \right)^2 \frac{P_c k^2}{(\hbar \omega)^2} e_z'^3.$                   |
| 3 | Spin orbital ajragan zonada   | $\frac{i}{\sqrt{3}} \frac{P_{cv} A^2 k^2}{(\hbar \omega)^2} e_z'^3.$   |
| 4 | Birinchi virtual holat valent, ikkinchisi esa o'tkazuvchanlik zonasida yotadi               | $\frac{i}{2\sqrt{3}} \frac{\hbar^2 P_{cv} B k^2}{m_c \hbar \omega} e'_z \left( \Re_5  e'_+ ^2 + \Re_6 e_z'^2 \right).$ |
| 5 | Birinchi virtual holat o'tkazuvchanlik zonasida, ikkinchisi esa valent zonasida             | $\frac{i}{4\sqrt{3}} \frac{P_{cv} B^2 k^2 e'_z}{\hbar \omega} \left( \Re_7  e'_+ ^2 + \Re_8  e'_z ^2 \right).$         |
| 6 | Birinchi virtual holat valent zonasida, ikkinchisi esa spin orbital ajragan zonada          | $\frac{-i}{12\sqrt{3}} \frac{P_{cv}^3}{\hbar \omega} e'_z \left( \Re_9  e'_+ ^2 + \Re_{10}  e'_z ^2 \right).$          |
| 7 | Birinchi virtual holat o'tkazuvchanlik zonasida, ikkinchisi esa spin orbital ajragan zonada | $\frac{i}{12\sqrt{3}} \frac{P_{cv}^3}{(\hbar \omega)^2} e'_z \left(  e'_+ ^2 +  e'_z ^2 \right).$                      |
| 8 | Birinchi virtual holat spin orbital ajragan zonada, ikkinchisi esa o'tkazuvchanlik zonasida | $-\frac{2i}{\sqrt{3}} \frac{\hbar^2 P_{cv} A k^2}{m_c (\hbar \omega)^2} e_z'^3.$                                       |
| 9 | Birinchi virtual holat spin orbital ajragan zonada, ikkinchisi esa valent zonasida          | $\frac{-i}{12\sqrt{3}} \frac{P_{cv}^3}{\hbar \omega} e'_z \left( \Re_{11}  e'_+ ^2 + \Re_{12}  e'_z ^2 \right).$       |

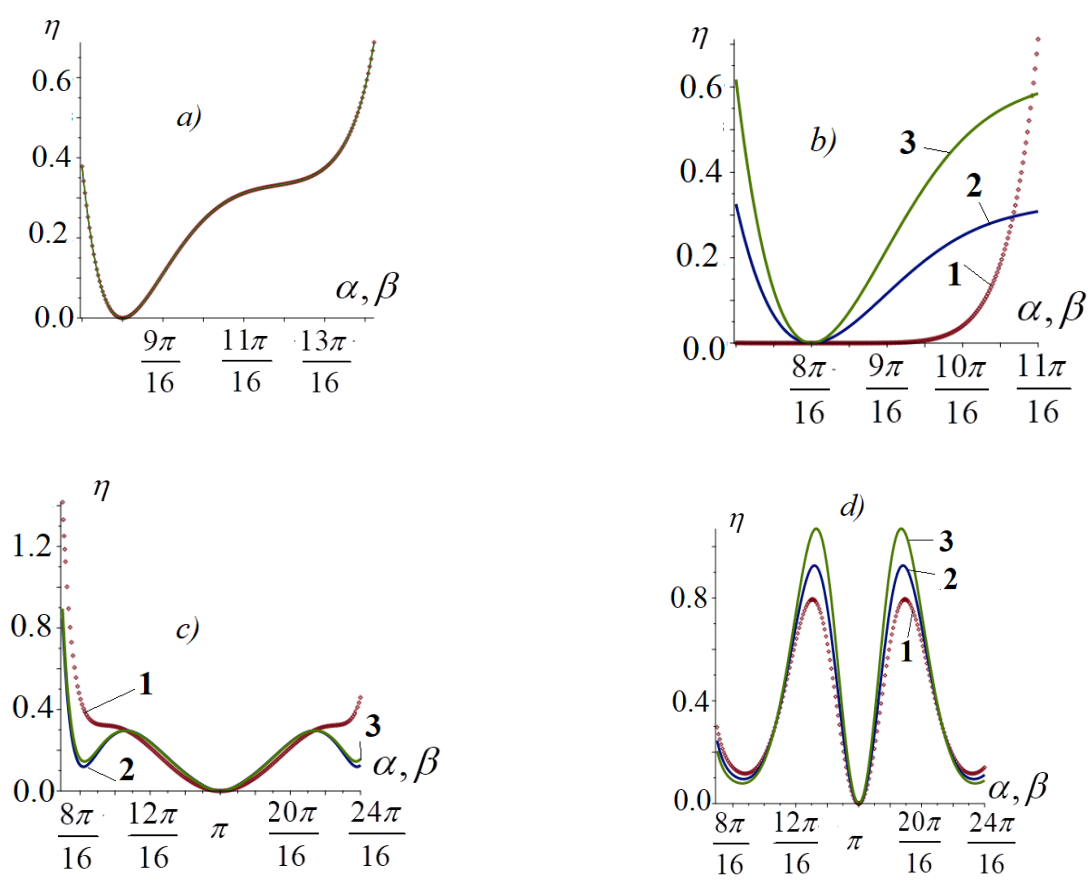
Umuman olganda  $\eta^{(3)}$  va  $K^{(3)}$  kattaliklarning spektral, temperaturaviy va qutblanish vektoriga bog'liqligi  $\Re_j$  ( $j = 3 \div 12$ ) funksiyalar orqali ifodalanadi. Ayrim  $\Re_j$  funksiyalarning maxrajleri ma'lum bir chastotada nolga intilishi mumkin. Bu esa, o'z navbatida,  $\eta^{(3)}$  va  $K^{(3)}$  kattaliklarning spektral bog'lanishlarida o'ziga xoslikni yuzaga keltirishi mumkin. Biroq  $K^{(3)}$  spektral bog'lanishining anomal o'zgarishi spektral bog'lanishining  $\eta^{(3)}$  anomal o'zgarishga olib kelmaydi, chunki u chiziqli va sirkulyar qutblangan yorug'likning ehtimolliklari nisbati bilan aniqlanadi (8-rasm).

**Ikki va uch o'lchamli yarimo'tkazgichlardagi ba'zi elektronli va kinnetik hodisalar»** deb nomlangan beshinchi bobda asimmetrik potentsial o'ra va potentsial to'siqlarning ketma ket joylashishidan tashkil topgan ko'p qatlamli yarimo'tkazgichli strukturalar orqali elektronlarning tashilishi, to'g'ri burchakli asimmetrik potentsiilli o'rada o'lchamli kvantlashish va ularda elektronlarning nazariy tadqiq qilingan. Bu holda balandligiga nisbatan asimmetriyali potentsial

to'siqdan elektronlar o'tish koeffitsiyentining  $\tilde{k}_j \leftrightarrow \tilde{k}_{j+2}$  shakl almashtirishga nisbatan simmetriyaviy bo'lishi, ya'ni elektronlarning  $j$  sohadan  $j+2$  sohaga va

aksincha o'tishi fizik jihatdan farqlanmasligi ko'rsatilgan, bu yerda  $\tilde{k}_j = \frac{k_j}{m_j}$ ,

$$k_j = \sqrt{\frac{2m_j}{\hbar^2}(E - U_j)}$$

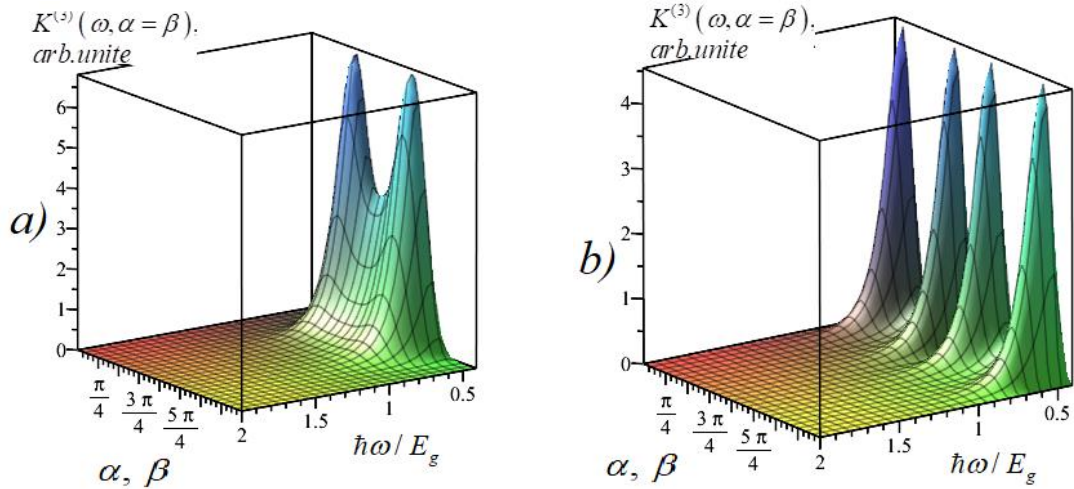


**6-rasm. InSb da uch fotonli chiziqli tsirkulyar dixroizm koeffitsiyentining burchakka bog'liqligi. 1 egri chiziq  $\hbar\omega = 0,6 eV$ , 2 egri chiziq-  $\hbar\omega = 0,5 eV$ , - egri chiziq  $\hbar\omega = 0,44 eV$  energiyaga mos keladi.**

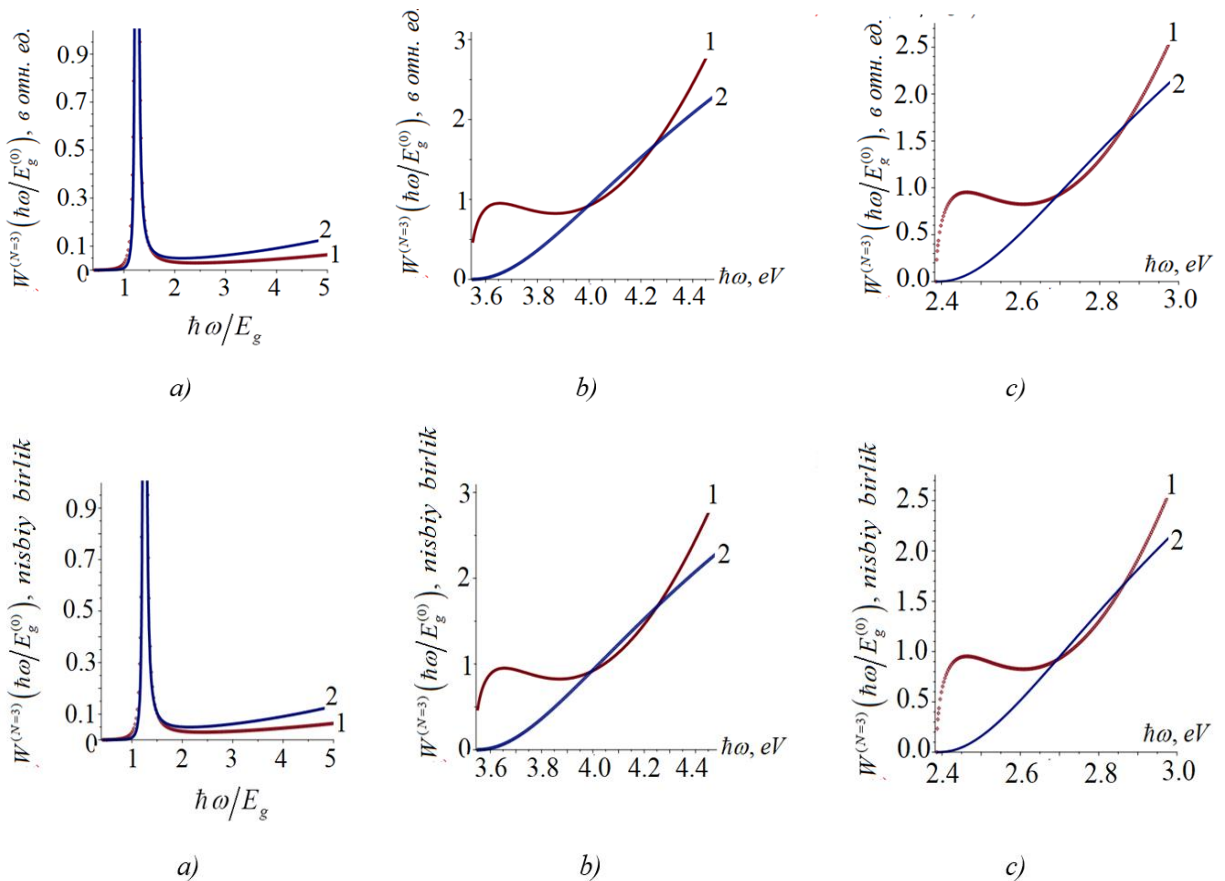
Tunell o'tish koeffitsiyentining energiyaga bog'liq ostsillyatsiyalanishning sodir bo'lishi elektronlarning interfeysdan sochilib qaytgan de Broyl to'lqinlarning interferentsiyasi bilan tushuntirilishi ko'rsatilgan. Bunda tunellanishning amplitudasi miqdoran nafaqat tok tashuvchilar to'lqin vektorlari bilan balki, ularning effektiv massalarining qiymatlari bilan aniqlanadi. Bu ostsillyatsiya qo'shni qatlamlardagi tok tashuvchilarining effektiv massalari har xil balandliklari bo'yicha simmetriyaliy bo'lgan strukturalarda ham sodir bo'ladi. 9-rasmdan ko'rinyaptiki, qatlamlarining qalinligi bir xil bo'lgan strukturalarda elektronlarning energiyasi ortishi bilan tiniqlik koeffitsiyentining ostsillyatsiya amplitudasi ortadi, ostsillyatsiya chastotasi kamayadi. Natijada tunellanish ostsillyatsiyasini struktura geometrik o'lchamlarini o'zgartirish orqali boshqarish mumkin.



Yuqorida qayd qilingan strukturada elektronlarning lokallashish holatlarini aniqlash uchun tashish matritsasining diagonal elementi uchun qayd qilingan tenglama, ya'ni  $T_{11}^{(3)} = 0$  bilan aniqlanadi. Bu holda asimmetriyaviy potensial o'rada



7-rasm. *InSb* da xona temperaturasida hisoblangan uch fotonli yutilish koefitsiyentining burchakka va chastotaga bog'liqligi: a) sirkulyar, b) – chiziqli qutblangan yorug'lik uchun.



8 rasm. *InAs*(a), *ZnS* (b), *AlAs* (c) yarimo'tkazgichlarda yorug'likning spin orbital ajragan zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga uch fotonli o'tish ehtimolligining spektral bog'lanishlari.

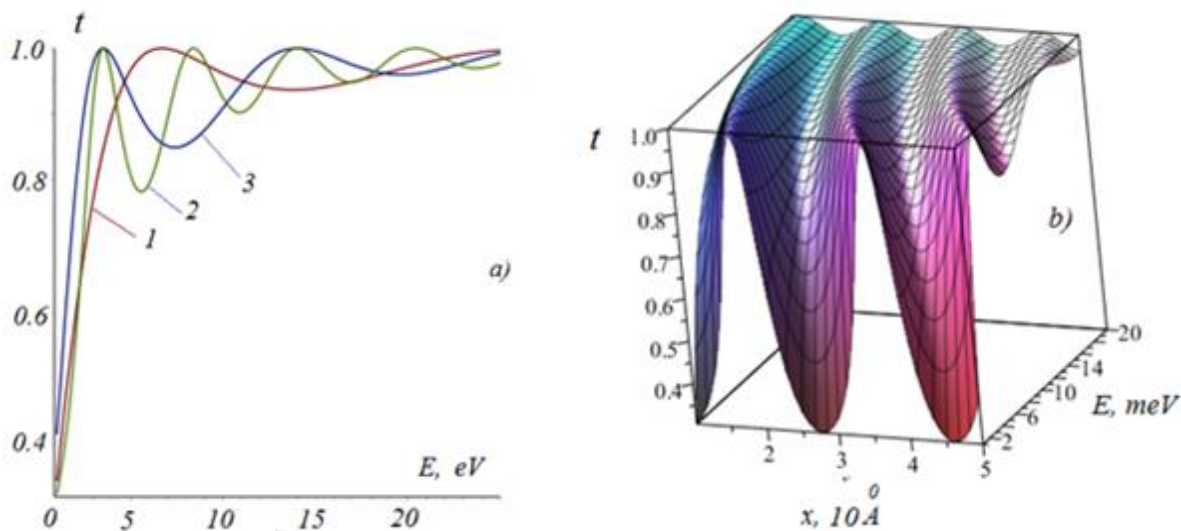
zarraning lokallashgan holatidagi panjaraning “to’siq+o‘ra+to’siq” to‘r strukturasi uchun olingan Shredinger tenglamasining yechimi - o‘sib boruvchi to‘lqin

funksiyasi ekaniga e'tibor qaratamiz. Masalaning to'raligini ta'minlash uchun, kelgusida, toq tartibli qatlamlardagi to'siq balandliklari elektronlar energiyasidan katta ( $U_1, U_3, U_5 \gg E$ ) va  $k_2 = k_4, x_2 - x_1 = x_4 - x_3$  munosabat o'rinli deb hisoblaymiz. U holda  $\exp[-\kappa_3(x_3 - x_2)] \ll 1$  shartda strukturadagi elektronlarning energetik spektri

$E^{(0)} = \frac{\hbar^2 k_2^{(0)^2}{2m_2} + U_2$  munosabat yordamida,  $k_2^{(0)}$  to'lqin vektor esa

$\sin[\phi_{12} + \phi_{32} - k_2^{(0)}(x_2 - x_1)] = 0$  shartdan aniqlanadi. Simmetriyaliy strukturalarda Bastard sharti hisobga olinmagan holda ham zarralarning to'siq usti o'tish koeffitsiyentining energiyaga bog'liq ostsillyatsiyasi kuzatilishi kerak.

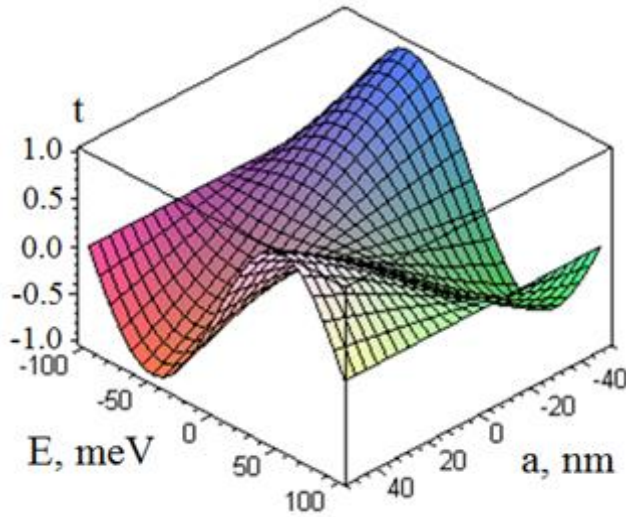
Bunday ostsillyatsiya 9-rasmda tasvirlangan. Xuddi shuningdek potentsial to'siq osti o'tishidagi kabi, potentsial to'siq ustidan o'tish koeffitsiyentining zarra energiyasiga bog'liq ostsillyatsiyalanishini aniqlash qiyin emas. Bu holatlar to'siq va o'ra sohasidagi potentsial sakrashi sohasidan qaytgan de Broyl to'lqinlarning interferentsiyasi bilan tushuntiriladi. O'ra va potentsial to'siqlarning o'lchamlari hamda o'ra va potentsial to'siq sakrashlari miqdoran teng bo'lgan hollarda potentsial to'siq ustidan o'tish koeffitsiyentining zarra energiyasiga bog'liq ostsillyatsiyalanish amplitudasi potentsial to'siq orqali o'tish koeffitsiyentidan miqdoran katta bo'ladi. Bunday mulohazalar asimmetriyaviy strukturalar uchun ham o'rinli bo'lib, ostsillyatsiyalanishlar soni qaytish va o'tish koeffitsiyentlarining, qo'shni qatlamlardagi elektronlarning



**9-rasm. “O’ra+potentsial to’siq” (to’siqning balandligi 10 meV) tur simmetriyaliy strukturada o’tish koeffitsiyentining elektron energiyasiga nisbatan ikki (a) va uch (b) o’lchamli ostsillyatsiyaviy bog’lanishi, bu yerda (a) rasmdagi 1 egri chiziq to’siq qalinligi 50 Å, 2 egri chiziq 100 Å, 3 egri chiziq 200 Å bo’lgan hollarga mos keladi.**

effektiv massalarining nisbatiga, hamda tanlangan o'raga nisbatan chap va o'ng tarafdagi potentsial to'siqlar balandliklarining nisbatiga sezilarli bog'liq bo'ladi. Bu hol 10 - rasmda tasvirlangan. Tabiiyki, oxirgi hol miqdoriy hisoblashlarni murakkablashtiradi, chunki u aniq bir strukturaning tanlanishi bilan bog'liq. Oxirgi

ifodalardan elektronlarning energetik spektrida o'lchamli kvantlashishni kuzatish mumkinligi ko'rinadi. Agar bunday  $E_-(k_y, k_z, n_-) = E(k_y, k_z) + U_2 + E_0 n_-^2$



**10-rasm. O'tish koefitsiyentining elektron energiyasi ( $E$ ) va potensial o'ra qalinligi ( $a$ ) orasidagi ostsillyatsiviy bog'lanishi**

$4\tilde{k}_1\tilde{k}_2\tilde{k}_3 \left\{ (\tilde{k}_2 + \tilde{k}_1\tilde{k}_3)^2 - (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)(\tilde{k}_3^2 - \tilde{k}_2^2) \right\}^{-1}$  bilan aniqlanadi, bunda  $n_+$  – juft sonlar.

Natijada  $\tilde{k}_1 \langle \tilde{k}_2 \rangle \tilde{k}_3$  (yoki  $\tilde{k}_1 \langle \tilde{k}_2 \rangle \tilde{k}_3$ ) shartda bunday strukturada elektronlar de Broyl to'liqlari o'tishining kuchayishini anglatadi.

Elektronlarning to'siq osti o'tishlarida o'tish matritsasining diagonal matritsaviy elementlari uchun  $T_{11}^{(31)} = T_{11}^{(32)}T_{11}^{(21)} + T_{12}^{(32)}T_{21}^{(21)}$  munosabatdan foydalanish mumkin, bu yerda  $E \rangle U_j$  ( $j=1,3$ ) va  $E \langle U_2$  holda  $\tilde{k}_j \pm \tilde{k}_2 = \tilde{k}_j \pm i\tilde{\kappa}_2 = \sqrt{\tilde{k}_j^2 + \tilde{\kappa}_2^2} e^{\pm i\phi_{j2}}$  ko'rinishdagi shakl almashtirishlar bajarilishi talab etiladi, bu yerda  $\phi_{j2} = \arctg(\tilde{\kappa}_2/\tilde{k}_j)$ ,  $\tilde{\kappa}_2 = \sqrt{\frac{2m_2}{\hbar^2}(U_2 - E)}$ .

## XULOSALAR

Ikki va uch o'lchamli pyezoyarimo'tkazgichlardagi fotonli kinetik effektlarni tadqiq qilish natijalariga ko'ra quyidagi xulosalar qilindi:

1. Murakkab zonali pyezoyarimo'tkazgichlarda tok tashuvchilarning fonon va fotonlarda asimmetriyaviy sochilishiga bog'liq bo'lgan qutbiy bog'langan fotogalvanik effekt va fotonli ergashtirish effekti mexanizmlarining nazariyasi rivojlantirildi.
2. Ilk marta kogerentli to'yinish effektining fototokka ulushini e'tiborga olgan holda kovak o'tkazuvchanligiga ega girotrop yarimo'tkazgichlarda bir fotonli fotonli ergashtirish effekti chiziqli sirkulyar dixroizmining miqdoriy nazariyasi yaratildi.
3. Ilk marta asimmetriyaviy yarimo'tkazgichli strukturalarda elektronli holatlarining ifodalari va elektronlarning tunellanishi nazariy tadqiq qilindi, bunda strukturaning qo'shni qatlamlardagi elektronlarning effektiv

massalarining farqi e'tiborga olindi. Elektronlarining o'tish va to'siqlarning tiniqlik koeffitsiyentlari hamda to'lqin funksiyalari uchun ifodalar olindi.

4. Ko'p qatlamli yarimo'tkazgichli (kvantlashgan o'ra + nosimmetrik potentsial to'siqli) strukturalarda Bastard sharti e'tiborga olingan holda blox elektronlari uchun tunellanish va o'lchamli kvantlashish shartlari anqlandi.
5. Ilk bor murakkab zonali yarimo'tkazgichlarda zonalararo optik o'tishlarga bog'liq uch fotonli chiziqli sirkulyar dixroizmi masalasining miqdoriy hisoblash usuli ishlab chiqildi. Yorug'likning intensivlikka nisbatan nochiziqli yutilishi kovaklar taqsimot funksiyasining kuchli elektromagnit maydonda o'zgarishi bilan bog'liqligi isbotlandi.
6. Murakkab valent zonali yarimo'tkazgichda ikki fotonli ballistik fotogalvanik effektning miqdoriy nazariyasi taklif etildi va uning asosida pyezoyarimo'tkazgichlarning zonaviy tuzilishi hamda impuls relaksatsiya mexanizmini tadqiq qilishning yangi usuli nazariy asoslab berildi.
7. Tetraedr simmetriyali yarimo'tkazgichlarda qutbiy fototokning temperaturaviy va chastotali bog'lanishlari tahlil qilindi hamda natijaviy fototokka asosiy ulushni fotonli mexanizm berishi aniqlandi. Elektronlar taqsimot funksiyasi anizotropiyasi e'tiborga olinmasa fotonlarning yutilishiga bog'liq siljishli fototok vujudga kelmasligi isbotlandi.
8. Pyezoyarimo'tkazgichlarda zonalararo ikki fotonli vertikal optik o'tish bilan bog'liq bo'lgan bir vaqtning o'zida va alohida-alohida ikki fotonning yutilishi hisobga olingan holdagi bir va ikki fotonli siljishli fototok nazariyasi rivojlantirildi.
9. Ilk marta ikki kvantli ballistik fototok elektron - foton yoki elektron - fonon o'zaro ta'sir operatorlaridagi har xil juftlikka ega bo'lgan hadlar hisobiga sodir bo'lishi isbotlandi. Murakkab zona strukturali pyezoyarimo'tkazgichlarda ikki fotonli chiziqli fotogalvanik effekt tokining temperaturaviy bog'lanishi aniqlandi.
10. Taklif etilgan nazariya  $p$  - GaAs namunalarini CO<sub>2</sub> lazer bilan yoritilgandagi chiziqli fotogalvanik effekt tokning haroratga bog'liqligini aniqlash bo'yicha tajriba natijalarini haroratning 200 K gacha bo'lgan sohasida yuqori aniqlikda tushuntirishi,  $T > 200$  K sohasida esa nazariy va eksperimental natijalar orasida 20% dan oshmaydigan farq bo'lishligi aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

---

**НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ  
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА ИМЕНИ  
МИРЗО УЛУГБЕКА  
ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РАСУЛОВ ВОХОБ РУСТАМОВИЧ**

**ФОТОННО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ДВУХ И ТРЕХМЕРНЫХ  
ПЬЕЗОПОЛУПРОВОДНИКАХ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc)  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

**Ташкент–2024**

Тема диссертации доктора наук (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрировано в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2023.3.DSc/FM150.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([ispm.uz](http://ispm.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный консультант:** Утамурадова Шарифа Бекмурадовна  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** Дадамйрзаев Мухаммаджон Гуломқодирович  
доктор физико-математических наук, профессор

Каражанов Смагул Жангибергенович  
доктор физико-математических наук, профессор

Шарибиев Носиржон Юсупжанович  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** Андижанский государственный университет

Защита диссертации состоится « 26 » 12 2024 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека по адресу: 100057, г.Ташкент, ул. Янги Олмазор, дом 20. Тел: (+99895)146-77-44, факс: (99871) 246-19-76, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения цифровых образовательных технологий института (зарегистрирована за № 66), по адресу: 100057, г.Ташкент, ул. Янги Олмазор, дом 20. Тел: (+99895)146-77-44, факс: (99871) 246-19-76.

Автореферат диссертации разослан « 12 » 12 2024 года.  
(реестр протокола рассылки 66 от « 12 » 12 2024 года).



А.Т.Мамадалимов  
председателя Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор, академик

Ж.Ж.Хамдамов  
секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней, PhD

Н.А.Тургунов  
заместитель председателя научного семинара  
при Научном совете по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., доцент

## **ВВЕДЕНИЕ (Автореферат докторской (DSc) диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мировой полупроводниковой электронике объемного и наноразмерного масштаба, в частности наноэлектроники, в быстром развитии важное место занимают пьезоэлектрические полупроводники - пьезополупроводники. Это связано с тем, что при поглощении циркулярно поляризованного света в пьезополупроводниках спины электронов и дырок, а также их импульсы, задающие направление носителей тока, переходят в неравновесное состояние, что приводит к возникновению квазичастиц и их спинов с ненулевыми потоками. Кинетические процессы, отвечающие за отклонение от равновесного состояния и релаксацию к основному состоянию, находят отражение в оптических явлениях в объемных и наноразмерных полупроводниках.

В мировом масштабе достижения в области полупроводниковых технологий создают возможность разработки современных устройств с заранее подобранными параметрами и свойствами. В частности, успехи в создании объемных голографических записывающих устройств на основе наблюдаемых в полупроводниках объемных фотогальванических эффектов предоставили значительный импульс для новой области физики полупроводников – полупроводниковой фотоники. Одной из основных задач фотоники является изучение взаимодействия циркулярно поляризованного излучения с носителями тока в сложных полувалентных полупроводниках и их наноструктурах. Поэтому исследование электронных, оптических и фотогальванических свойств полупроводников и их квантованных структур открывает не только новые направления в наноэлектронике, фотонике и спинтронике, но и предоставляет возможности для проведения фундаментальных научных исследований.

В нашей Республике за последние годы в приоритетных направлениях науки, в том числе «Развитие использования возобновляемых источников энергии», достигнуты важные результаты в изучении объемно связанных оптических и фотонных кинетических процессов в двух- и трёхмерных полупроводниках и их структурах. Согласно Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, особое внимание уделяется развитию научных исследований и инновационной деятельности, а также созданию эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику.

Представленное диссертационное исследование служит для выполнения задач, установленных нормативно-правовыми документами, относящимися к научным исследованиям, включая указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «Стратегия развития Новой Узбекистана на 2022-2026 годы», решение № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования в области физики и развитию научных исследований», а также решение № ПП-4779 от 10 июля 2020 года «О дополнительных мерах по повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости экономических отраслей от топливно-энергетических

продуктов посредством использования имеющихся ресурсов», решение № ПП-4422 от 22 августа 2019 года «О срочных мерах по повышению энергоэффективности экономических отраслей и социальной сферы, внедрению энергоэкономных технологий и развитию возобновляемых источников энергии» и других нормативно-правовых документов, касающихся научных исследований.

Поэтому исследование фотонно кинетических явлений в полупроводниках со сложными зонами и их наноструктурах с учётом и без учёта эффекта когерентного насыщения является актуальным и служит основой для решения поставленных в диссертации задач.

**Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан.** Данная исследовательская работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки и технологий Республики под названием “III. Развитие использования возобновляемых источников энергии”.

**Обзор международных научных исследований по теме диссертации.** В настоящее время теоретические и экспериментальные исследования одно- и двухфотонных оптических и фотогальванических эффектов, возникающих под воздействием циркулярно поляризованного света в двух- и трехмерных пьезоэлектрических полупроводниках, широко проводятся в ведущих научных центрах и университетах мира.

В частности, в Институте физики и техники имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург) под руководством академиков Е.Л. Ивченко, М.М. Глазова и профессоров Л.Е. Голуба, С.А. Тарасенко разработаны теоретические модели фотогальванических эффектов в гиротропных и несимметричных полупроводниках. В их работах глубоко изучены асимметричное распределение носителей тока под воздействием циркулярно поляризованного света, спин-орбитальные взаимодействия и их влияние на фотогальванические эффекты.

В Университете Регенсбурга Германии под руководством профессора С.Д. Ганичева проводятся экспериментальные исследования фотогальванических эффектов в двух- и трехмерных гиротропных полупроводниках. В их работах изучаются кинетики фототоков под воздействием циркулярно поляризованного света и вспомогательных нарушений симметрии.

Во Французском университете Монпелье профессор М.И. Дьяконов и В.Ю. Качоровский проводят теоретический анализ спиново транспортных процессов и фотогальванических эффектов в полупроводниках. Их работы направлены на изучение влияния процессов в области спинтроники на фотонные кинетические явления и их связь с симметрией.

В Университете Тохоку Японии профессор Хидео Ооно проводит исследования в области спинтроники и магнитных полупроводников. Его работы направлены на изучение оптических свойств спиновых носителей тока в пьезополупроводниках и механизмов формирования спинового поляризованного тока.



В Стэнфордском университете США под руководством профессора Шаньхуя Фана проводятся исследования в области микроразмерной фотоники и метаматериалов. Их работы направлены на понимание фотонных явлений, связанных с циркулярно поляризованным светом, управление ими и создание новых оптоэлектронных устройств.

В Университете Торонто Канады профессор Ж.Е. Сайп и его группой теоретически исследовали фотонные кинетические явления в микроразмерных структурах. Их работы значительно способствовали раскрытию микроскопических механизмов фотогальванических эффектов и пониманию тонких оптических явлений в полупроводниках.

В Техническом университете Мюнхена Германии профессор Вольфганг Брудерле проводит исследования по изучению оптических явлений в квантовых точках и квантовых зондах. Их работы направлены на исследование нелинейных оптических и фотогальванических эффектов в микроразмерных полупроводниках.

В Политехническом университете Милана Италии под руководством профессора Марио Марталли проводятся исследования оптических и фотонных кинетических явлений в микроразмерных наноструктурах. Их работы направлены на создание новых материалов и устройств в области нелинейной оптики и фотоники.

Кроме того, в Национальном университете Сеула Южной Кореи под руководством профессора Ким Ки-Тэ проводятся исследования фотогальванических эффектов в пьезоэлектрических полупроводниках и их применения в нанoeлектронике.

Кроме того, в Федеральной политехнической школе Лозанны (EPFL) Швейцарии профессор Жером Фо и его группа исследуют фотонные кинетические явления в квантовых каскадных лазерах и квантовых ячейках.

Таким образом, зарубежные научные исследования по изучению одно- и двухфотонных оптических и фотогальванических эффектов под воздействием циркулярно поляризованного света в двух- и трехмерных пьезоэлектрических полупроводниках проводятся в широких масштабах и на высоком уровне. Эти работы способствуют открытию новых направлений в области полупроводниковой фотоники, нанoeлектроники и спинтроники, а также созданию современных оптоэлектронных устройств.

**Степень изученности проблемы.** Исследования полярных оптических и фотогальванических эффектов в объемных полупроводниках и их размерно-квантованных структурах ведутся в научно-исследовательских центрах и университетах передовых стран мира. В частности, экспериментальные исследования фотогальванического эффекта в однородных сегнетоэлектриках были проведены А.М. Глассом (США) и В.М. Фридкиным (Москва, Россия), где при облучении образца однородно поляризованным светом наблюдалось аномально большое стационарное фотонапряжение, сохранявшееся в течение нескольких часов. Возможность объяснения длительного наблюдения переноса заряда за счет релаксации поля в кристалле полностью исключена.

Подобные явления были экспериментально наблюдаемы К.Х. Херманом (Германия) и А.Ф. Гибсоном (США) в GaP, Г. Рибакосом и А.А. Гунджианом

(Канада), А.А. Рогачевым (Санкт-Петербург, Россия) в теллуре, Ж.М. Довиаком и С. Котари (США), С.Д. Ганичевым (Регенсбург, Германия), А.В. Андриановым и И.Д. Ярошецким (Санкт-Петербург, Россия) в *p-GaAs*.

Группой учёных под руководством академика РАН Ю.В. Копаева, членов-корреспондентов Е.Л. Ивченко, М.М. Глазова, профессоров Г.Е. Пикуса, Н.С. Аверкиева, Л.Е. Голуба, С.А. Тарасенко (Санкт-Петербург, Россия) и В.И. Белиничера, И.Д. Стурмана, Л.И. Магарилла, М.В. Энтина (Новосибирск, Россия) были теоретически исследованы механизмы циркулярного, линейного и спин-связанных фотогальванических эффектов в объёмных и низкоразмерных полупроводниках и сегнетоэлектриках. Было изучено, что вырождение фототока связано с асимметрией акта рассеяния носителей тока на фононах, фотонах или примесях в однородных средах, не обладающих центром симметрии.

До сегодняшнего дня академики Академии наук Республики Узбекистан Р.А. Муминов, А.Т. Мамадолимов и С.З. Зайнабиддинов внесли значительный вклад в физику низкоразмерных полупроводников. Р.А. Муминов разработал аналитические модели для изучения полупроводниковых гетероструктур в различных условиях. Он активно занимался оптимизацией материалов для оптоэлектронных устройств при изучении гетероструктур. А.Т. Мамадолимов руководил разработкой новых методов для определения глубоких уровней и играл важную роль в создании новых устройств на основе кремния и натуральных волокон. С.З. Зайнабиддинов изучал оптические свойства полупроводников теоретически и экспериментально, анализируя влияние квантовых структур, что способствовало развитию оптоэлектроники в Узбекистане. Также учеными Е.З. Имамовым и Р.Я. Расуловым были теоретически исследованы полупроводники и их размерные квантованные системы, механизмы поляризационно зависимого ЭФУ и линейного фотогальванического эффекта, а также оптические свойства размерно-квантованных полупроводников. В этом случае были рассмотрены: а) влияние сложности зонной структуры полупроводников и состояния поляризации света на эффект когерентного насыщения фототока; б) осцилляции туннелирования электронов в асимметричной структуре, состоящей из последовательно расположенных полупроводников, зависящие от размера барьера и энергии электронов; в) влияние зонной структуры полупроводников на их оптические и фотогальванические свойства; г) механизм баллистического линейного фотогальванического эффекта, связанный с двухфотонными оптическими переходами и особенностями зонной структуры полупроводников; д) нелинейное поглощение света и ЭФУ носителей тока в гиротропных полупроводниках.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Исследование по данной диссертации было выполнено в рамках темы Государственной программы фундаментальных исследований с регистрационным номером Ф-2.1.69 «Полярные фотогальванические эффекты в квантованных ямах полупроводников» (2003–2007 гг.), в рамках Фонда

поддержки фундаментальных исследований при Президиуме Академии наук Республики Узбекистан (ФПФИ) по теме «Теоретическое исследование кинетических свойств полупроводников и полупроводниковых наноструктур при взаимодействии с поляризованными фотонами» с регистрационным номером 79-06 (2006–2010 гг.), по теме ОТ-Ф2 (Физика и астрономия) с регистрационным номером «Полярные оптические эффекты в полупроводниках и их размерно-квантованных ямах» (2007–2011 гг.), а также рамках фундаментальных исследований с регистрационным номером П-652205571 по теме «Создание высокоэффективных кремниевых структур со стабильными параметрами на основе анализа оптических, емкостных и резонансных свойств полупроводников с различными глубокими уровнями» (2023-2025).

**Цель исследования** заключается в выявлении физической природы одно- и двухфотонных оптических и линейных фотогальванических эффектов, возникающих под воздействием поляризованного света в двух- и трёхмерных пьезополупроводниках, а также туннелирования электронов в двумерных полупроводниках.

**Задача исследования:**

разработать теорию одно- и двухфотонных оптических и баллистических фотогальванических эффектов в пьезополупроводниках со сложной зонной структурой;

рассчитать спектральную и температурную зависимость тока одно- и двухфотонного баллистического линейного фотогальванического эффекта в пьезополупроводниках, обусловленного асимметричным рассеянием электронов на фононах или фотонах, с учётом когерентного насыщения;

исследовать размерное квантование и туннелирование в многослойных полупроводниках, принимая во внимание условие Бастарда, связанное с различием эффективных масс электронов в соседних слоях;

сравнить теоретические расчёты спектральных и температурных зависимостей тока линейного фотогальванического эффекта в пьезополупроводниках с экспериментальными данными;

**В качестве объекта исследования** выбраны пьезополупроводники с дырочной проводимостью, такие как двумерные и трёхмерные галлий арсенид и теллур, а также многослойные асимметричные полупроводниковые структуры.

**Предметом исследования** являются фотонные кинетические процессы в полупроводниках, зависящие от состояния поляризации света: одно- и двухфотонные баллистические эффекты и эффекты фотонного сопровождения, а также электронные кинетические явления в многослойных полупроводниках, состоящих из асимметричных потенциальных барьеров и ям.

**Методы исследования.** Для решения задач исследования использовались вычислительные методы теории твёрдого тела и физической кинетики: диаграммная техника Келдыша, теория переноса матриц и матрицы плотности, теория возмущений, золотое правило квантовой механики и кинетическое уравнение Больцмана.

### **Научная новизна исследований заключается в следующем:**

Впервые для полупроводников без центра симметрии были созданы механизмы, связанные с баллистическим линейным фотогальваническим эффектом, включающим как последовательное поглощение двух фотонов, так и одновременное поглощение двух фотонов, и рассчитаны спектральные и температурные зависимости фототока, соответствующие этим механизмам;

Впервые на основе диаграммной техники Кельдыша были определены механизмы одно- и двухфотонного фотогальванического эффекта и фотонного увлечения, индуцированные линейно поляризованным светом в пьезоэлектрических полупроводниках;

Были определены квантово-механические выражения для вектора поляризации фототока, а также его зависимости от частоты и температуры образца, связанные с передачей фотонных импульсов системе электронов в пьезоэлектрических полупроводниках и асимметричным рассеянием носителей тока фотонами и фононами, а также проведен их теоретический анализ;

Впервые было доказано, что в эффективном гамильтониане баллистического двухфотонного тока учитываются линейные, квадратичные и четвертичные члены относительно вектора волны, и на основе этого рассчитана зависимость фототока от зонных параметров, температуры и частоты света;

В многослойных полупроводниках по условию Бастарда были получены условия подавления коэффициента прозрачности потенциального барьера для размерного квантования энергетического спектра электронов;

Зависимость фототока от температуры, наблюдаемая в экспериментах для *p*-GaAs при освещении CO<sub>2</sub>-лазером, теоретически объяснена на основе асимметричного взаимодействия носителей тока (дырок) с фотонами и фононами с высокой точностью (ошибка менее 10%).

### **Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

сравнение теоретических и экспериментальных данных (на примере *p*-GaAs) по температурной зависимости тока баллистического линейного фотогальванического эффекта;

применение вычислительных методов для исследования размерного квантования и туннелирования в многослойных полупроводниках к низкоразмерным электронным системам;

оптимизация оптических свойств оптоэлектронных систем, устройств для голографической записи информации, её хранения и обработки на основе результатов по одно- и двухфотонным оптическим и фотогальваническим эффектам;

стимулирование будущих теоретических и экспериментальных научных исследований по фотонным кинетическим явлениям, происходящим в двух- и трёхмерных полупроводниках;

развитие методов расчёта для низкоразмерных систем носителей тока и кристаллов, не обладающих центром инверсии, которые стали основой для интерпретации экспериментальных результатов по фотонным кинетическим эффектам в физической кинетике.

**Достоверность результатов исследований** обосновывается соответствием полученных теоретических результатов с экспериментальными результатами, выполненным ведущими специалистами в области фотогальваники, строгостью математических расчётов с использованием методов квантовой статистической физики и физической кинетики, применением диаграммной техники теории твёрдого тела для неравновесных электронных систем, а также правильным выбором объекта исследования.

**Научное и практическое значение результатов исследования.** Научная значимость результатов диссертации заключается в предоставлении новых данных о зависимости тока одно- и двухфотонного линейного фотогальванического эффекта в полупроводниках от степени поляризации, его спектральных и температурных зависимостях, а также о туннелировании и размерном квантовании в многослойных квантованных полупроводниковых структурах.

Практическая значимость работы выражается в возможности увеличения частотного диапазона регистрации электромагнитных волн с использованием нелинейных оптических и фотонных кинетических эффектов, а также в возможности регистрации не только по интенсивности света, но и по его поляризации.

Полученные в диссертации результаты обогащают научное направление «Транспортные явления носителей тока в двух- и трёхмерных системах с учётом асимметрии взаимодействия электронов с фононами и фотонами».

**Внедрение результатов исследования.** На основе теоретического исследования одно- и двухфотонных баллистических фотогальванических и фотонного ассистирования эффектов в двух- и трёхмерных пьезоэлектрических полупроводниках, нелинейного поглощения поляризованного света в гиротропном полупроводнике, а также процессов туннелирования:

расчёты по фотовольтаическим эффектам использованы в гранте РФФИ № 17-12-01265 «Электронные состояния и кинетические эффекты в системах с нетривиальной топологией» при изучении дисперсионных оптических явлений (Справка Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН России 04.01.09-2024 от 17 сентября 2024 г.). Использование научных результатов дает возможность установить зависимости нелинейных оптических и электрических эффектов от электронной структуры в кристаллах кубической симметрии, электрон-фононного и электрон-фотонного взаимодействия полупроводниковых низкоразмерных системах.

метод диагностики и контроля качества полупроводниковых материалов на основе спектральных и температурных зависимостей поляризационно-зависимых оптических и фотогальванических эффектов, вызванных одно- и двухфотонным поглощением поляризованного излучения в полупроводниках без центра инверсии, был использован в АО «Фотон» при производстве полупроводниковых электронных устройств (Справка акционерного общества «Узелтехсанат» № 04-3/1663 от 2 октября 2024 г.). Использование научных

результатов позволило повысить функциональные возможности и расширить диапазон эксплуатации производимых АО «Фотон» электронных устройств.

Результаты исследований баллистического фотогальванического эффекта и эффекта фотонного сопровождения в пьезополупроводниках были использованы в проекте HDP(F)-2016/43 «Исследование спектра инфракрасного источника света в спектральном диапазоне 100-4500 нм» для изучения низкой инерционности полупроводниковых фотодиодов (справка министерства высшего образования, науки и инноваций № HDP(F)-2016/43 Университета Улудаг (Турция)). Использование научных результатов позволило повысить скорость работы полупроводниковых фотопреобразователей.

теоретические анализы физической природы электронных состояний в многослойных полупроводниковых структурах, учитывая различные значения эффективных масс электронов в соседних слоях, были использованы в фундаментальном государственном проекте Ф2-21 «Математическое моделирование плотности поверхностных состояний на границе полупроводник-диэлектрик» для определения электронных состояний в приповерхностной области полупроводника (справка Министерства высшего образования, науки и инноваций № 02/02-3112 от 24 октября 2024 г.). Использование научных результатов расширило возможности проведения исследований с учётом эффекта размерного квантования в приповерхностной области полупроводников.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на 8 международных и 2 республиканских конференциях.

**Публикации результатов исследования.** Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 31 научных работах, из них 16 статей и 4 монографии были опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка опубликованных работ, содержит 27 рисунков, 3 таблиц, списка использованной литературы из 163 наименований и изложена на 213 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Данная диссертация посвящена исследованию размерного квантования и фотонных кинетических явлений в двух- и трёхмерных пьезополупроводниках в зависимости от степени поляризации света и зонной структуры образца.

**Во введении** обоснована актуальность и необходимость темы диссертации, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Узбекистане, приведён обзор зарубежных научных исследований по данной теме и степень изученности проблемы. Также описаны цель, задачи, объект и предмет исследования, раскрыты научная новизна и практические результаты, подчёркнуто

теоретическое и практическое значение полученных результатов, представлены сведения о внедрении результатов, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, названной «**Поляризационно-зависимый фототок в пьезокристалле**», обсуждается состояние и развитие оптических и фотогальванических эффектов (ФГЭ) в кристаллах полупроводников без центра симметрии. Особое внимание уделено их применению в опто- и фотоэлектронике, а также в голографической записи информации.

Анализируются случаи исследования одно- и двухфотонных фотогальванических эффектов, связанных с поляризацией и спином, возникающих в низкоразмерных и объёмных полупроводниках, графене, топологических изоляторах и Вейль полуметаллах при их стационарном однородном освещении.

Представлена феноменологическая интерпретация поляризационно связанного фототока при одно- и двухфотонном поглощении света в пьезополупроводниках. В частности, эффект фотонного сопровождения в квантово-механической теории объясняется одновременной передачей носителям заряда импульса и углового момента фотонов, тогда как в классической теории этот эффект интерпретируется как ток, возникающий под воздействием силы Лоренца, вызванной одновременным действием электрического и магнитного полей световой волны на носители заряда.

Физическая природа полярно связанного фотогальванического эффекта обладает рядом особенностей. Одной из них является то, что в полупроводниках без центра инверсии принцип зеркальной симметрии не выполняется, так как они не могут описывать симметрию относительно пространства и времени. Нарушение этого принципа симметрии приводит к возникновению асимметрии при рассеянии электронов, что значительно изменяет кинетические свойства кристаллов и создает возможность появления электрического тока в произвольном неравновесном стационарном состоянии.

Если это неравновесное состояние возникает из-за освещения, то возникает фотогальванический ток, направление которого зависит от поляризации света и симметрии кристалла.

Фототок, зависящий от квадрата интенсивности света ( $I$ ), можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned}
 J_{\alpha}^{(2)} = I^2 & \left( A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu} \frac{e_{\beta} e_{\gamma}^* + e_{\beta}^* e_{\gamma}}{2} \frac{e_{\mu} e_{\nu}^* + e_{\mu}^* e_{\nu}}{2} + iB_{\alpha\beta\gamma\lambda} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\lambda} \frac{e_{\beta} e_{\gamma}^* + e_{\beta}^* e_{\gamma}}{2} + \right. \\
 & \left. + C_{\alpha\beta\gamma} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\beta} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\gamma} + \right) \\
 + I^2 & \left( D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda} \frac{e_{\beta} e_{\gamma}^* + e_{\beta}^* e_{\gamma}}{2} \frac{e_{\mu} e_{\nu}^* + e_{\mu}^* e_{\nu}}{2} q_{\lambda} + iF_{\alpha\beta\gamma\mu} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\lambda} \frac{e_{\beta} e_{\gamma}^* + e_{\beta}^* e_{\gamma}}{2} q_{\mu} + \right. \\
 & \left. + G_{\alpha\beta\gamma\lambda} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\beta} (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\gamma} q_{\lambda} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

Здесь  $\vec{e}(\vec{q})$  – вектор поляризации (волновой) электромагнитной волны, и симметричные  $(e_{\beta} e_{\gamma}^* + e_{\gamma} e_{\beta}^*)/2$  и антисимметричные  $(e_{\beta} e_{\gamma}^* - e_{\gamma} e_{\beta}^*)/2$  множители

рассматриваются как независимые представления. Величины  $[e_m e_v^*]$ ,  $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$  и стационарный ток  $\vec{j}^{(2)}$  являются действительными, поэтому тензоры  $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$ ,  $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ ,  $C_{\alpha\beta\gamma}$ ,  $D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda}$ ,  $F_{\alpha\beta\gamma\mu\lambda}$ ,  $G_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  указанные в (1), также являются действительными. Тензор третьего ранга  $C_{\alpha\beta\gamma}$  симметричен по  $\beta$  и  $\gamma$ , и по своим симметричным свойствам аналогичен пьезотензору. Поэтому тензор  $C_{\alpha\beta\gamma}$ , как и тензоры пятого ранга  $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$  и  $F_{\alpha\beta\gamma\mu\lambda}$ , имеет ненулевые компоненты в кристаллах без центра симметрии. Тензоры  $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ ,  $D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda}$ ,  $G_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  имеют ненулевые компоненты как в кристаллах любой симметрии, так и в кристаллах без центра симметрии.

Фототоки, связанные с третьим и шестым членами уравнения (1), имеют ненулевые значения для эллиптически поляризованного света, в то время как они отсутствуют при освещении линейно поляризованным или неполяризованным светом. Поэтому эффект, описываемый тензорами  $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  и  $G_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ , удобно называть соответственно двухфотонным циркулярным фотогальваническим эффектом и двухфотонным циркулярным эффектом сопровождения. Эффект, выражаемый тензорами  $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$  и  $D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda}$ , как правило, наблюдается под воздействием линейно поляризованного света, и его удобно называть двухфотонным линейным фотогальваническим эффектом и двухфотонным линейным эффектом сопровождения.

Фототок, связанный со вторым и четвертым членами уравнения (1), также имеет ненулевые значения при освещении одновременно эллиптически и линейно поляризованным светом. Вклад этих компонент в общий фототок отличает двухфотонный фотогальванический эффект от однофотонного. Симметричные свойства тензоров  $A_{\alpha\beta\gamma\mu\nu}$ ,  $B_{\alpha\beta\gamma\lambda}$ ,  $C_{\alpha\beta\gamma}$ ,  $D_{\alpha\beta\gamma\mu\nu\lambda}$ ,  $F_{\alpha\beta\gamma\mu\lambda}$ ,  $G_{\alpha\beta\gamma\lambda}$  по отношению к операции инверсии времени позволяют проанализировать, связан ли эффект с диссипативными процессами или нет. Таким образом, линейный фотогальванический эффект (ФГЭ) связан с диссипативными процессами, в то время как циркулярный ФГЭ – нет. Линейный ФГЭ определяется функцией Дирака  $\delta$ , выражающей закон сохранения энергии, тогда как циркулярный ФГЭ определяется полюсами функции Грина (или частной энергетической функции). В этом случае учтено, что при инверсии времени плотность тока  $\vec{j}$ , волновой вектор света  $\vec{q}$  меняют знаки, тогда как величина  $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$  знак не меняет.

**Во второй главе, под названием «Одно и двухквантовые фотовольтаические эффекты в пьезокристаллах», рассматриваются квантово-механические анализы полярного фотогальванического эффекта, возникающего при нелинейном поглощении света. Фототок состоит из двух видов (вкладов): диагонального и недиагонального, относительно порядкового номера зоны (или подзоны).**

$$\vec{j}_{\text{бал}} = -e \sum_{nk} v_{nk}^- f_{nk}^-, \quad \vec{j}_{\text{кос}} = -e \sum_{n \neq n', \vec{k}} v_{n'n}^-(\vec{k}) \rho_{m'}(\vec{k}), \quad (2)$$



здесь  $e$  - элементарный заряд (для дырок  $e > 0$ , для электронов  $e < 0$ ),  $\rho_{m'm'}(\vec{k})$  и  $v_{n'n}(\vec{k})$  - матричные элементы плотности матрицы и оператора скорости соответственно,  $v_{nk} = \hbar^{-1} \nabla_{\vec{k}} E_{nk}$  - групповая скорость электрона с волновым вектором  $\vec{k}$  в зоне  $n$ ,  $\rho_{nn}(\vec{k}) = f_{nk}$  - функция распределения в неравновесном стационарном состоянии, определяемая процессами генерации, рассеяния и рекомбинации, где  $n$  и  $n'$  - порядковые номера зон в сложной зонной структуре, а в кристаллах с заполненными зонами - порядковые номера состояний в заполненной зоне.

Диагональный вклад уравнения (2) определяется индуцированной асимметричной функцией распределения за счет света и называется баллистическим вкладом. Недиагональный вклад связан со смещением свободных носителей заряда при каждом квантовом переходе в реальном пространстве и называется смещённым вкладом.

В полупроводниках с кубической симметрией с дырочной проводимостью плотность тока  $\vec{j}^{(N)}$ , индуцированная  $N$ -фотонным эффектом увлечения, для электронов и в случае приближения времени релаксации импульса выражается следующим образом

$$\vec{j}^{(N)} = -e \sum_{kmm'} \left[ \vec{v}_{1\vec{k}} \tau_{\vec{p}}(1, \vec{k}) W_{1m'\vec{k}; 2m, \vec{k} - N\vec{q}}^{(1)} - \vec{v}_{2\vec{k}} \tau_{\vec{p}}(2, \vec{k}) W_{1m', \vec{k} + N\vec{q}; 2m\vec{k}}^{(1)} \right]. \quad (3)$$

Здесь рассматривается вероятность оптических переходов

$$W_{1m'\vec{k}; 2m, \vec{k} - N\vec{q}}^{(1)} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| M_{1m'\vec{k}; 2m, \vec{k} - N\vec{q}}^{(N)} \right|^2 \left( f_{2, \vec{k} - N\vec{q}}^{(e)} - f_{1\vec{k}}^{(e)} \right) \delta(E_{\vec{k}} - E_{2, \vec{k} - N\vec{q}} - N\hbar\omega), \quad (4)$$

$$W_{1m', \vec{k} + N\vec{q}; 2m\vec{k}}^{(1)} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| M_{1m', \vec{k} + N\vec{q}; 2m\vec{k}}^{(N)} \right|^2 \left( f_{2\vec{k}}^{(e)} - f_{1, \vec{k} + N\vec{q}}^{(e)} \right) \delta(E_{1, \vec{k} + N\vec{q}} - E_{2\vec{k}} - N\hbar\omega). \quad (5)$$

Здесь  $f_{lk}^{(e)} = 1 - e^{-(\chi + E_{lk})/k_B T}$ , где  $e > 0$ ,  $E_{lk}$  - энергетический спектр электронов в  $l$ -й ветви,  $\vec{v}_{lk}$  - скорость,  $\tau_p(l, \vec{k})$  - время релаксации по импульсу,  $l$  - порядковый номер ветвей сложной зонной структуры,  $m, m'$  - индексы заполненных состояний дырок,  $M_{1m'\vec{k}; 2m\vec{k}}^{(N)}$  -  $N$ -составной матричный элемент переходов,  $\chi$  - химический потенциал дырок.

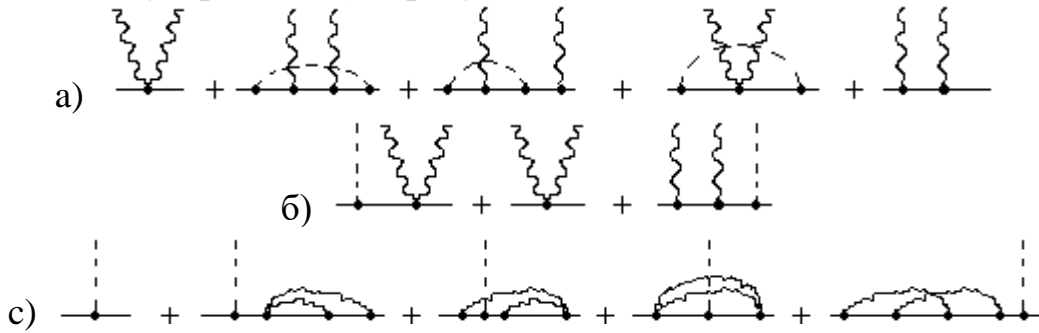
Когерентное насыщение (эффект Раби) влияет на изменение тока сопровождения, которое зависит от состояния поляризации света. Теперь рассмотрим вклад однофотонного поглощения света, связанный с эффектом Раби. Чтобы учесть эффект Раби, необходимо изменить сумму в выражении вероятности однофотонного оптического перехода  $W^{(1)}$

$$f_2^{(e)} - f_1^{(e)} \rightarrow f_2^{(e)} - f_1^{(e)} + \delta f_2^{(e)} - \delta f_1^{(e)} = \left( f_2^{(e)} - f_1^{(e)} \right) \left[ 1 - (T_1 + T_2) \times \right. \\ \left. \times \frac{2\pi}{\hbar} \left| M_{12}^{(1)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \hbar \Gamma \cdot \left( (\Delta E)^2 + \hbar^2 \Gamma^2 \right)^{-2} \right], \text{ где } \Gamma - \text{коэффициент затухания, } T_1(T_2) -$$

времена выхода тяжелых (легких) дырок из зоны насыщения.

Рассмотрим двухфотонный поляризационный фотогальванический эффект, возникающий за счет поглощения поляризованного света в условиях постоянного внешнего электрического поля и отсутствия фазового единства,

в полупроводниках со сложной зонной структурой без центра симметрии. В этом случае учитываем как последовательное, так и одновременное поглощение двух фотонов (см. рисунок 1).



**Рис. 1. Интерференция в полупроводниках, приводящая к двухфотонному полярному фотогальваническому эффекту, изображена диаграммами Фейнмана - Келдыша. Сплошные линии соответствуют электронам или дыркам, волнистые линии - фотону, штриховые линии - фонону.**

Физическая природа полярного фототока, как было указано выше, определяется симметрией кристаллов, в частности, отсутствием центра симметрии, поскольку в таких кристаллах принцип зеркальной симметрии не всегда выполняется. В результате неравновесное стационарное состояние в среде приводит к возникновению квазичастиц, таких как поток фотонно-индуцированных носителей заряда.

Если неравновесное состояние возникает под воздействием поляризованного света, то его направление определяется симметрией кристалла и природой двухфотонных оптических переходов. В дальнейшем мы будем считать параметры отдельно взятых фотонов одинаковыми. Так же, как и в случае однофотонного баллистического фотогальванического эффекта, благодаря двум фотонным прямым оптическим переходам не возникает двухфотонного полярного баллистического и смещённого фотогальванического эффекта в межзональных или сложных зонных переходах.

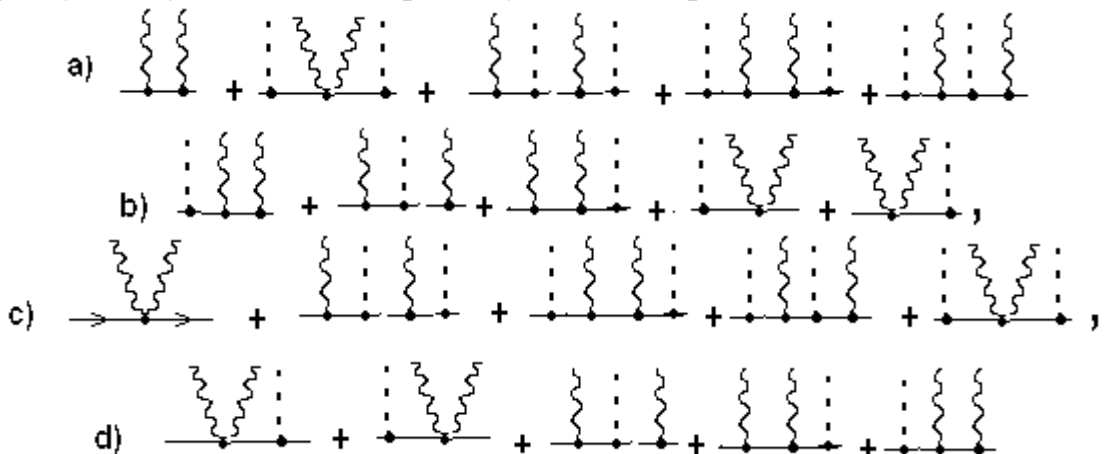
В природе асимметрия взаимодействия электронов поляризованного фототока с фононом, фотоном или другими производными кристаллической структуры, асимметричная часть вероятности двухфотонных оптических переходов идентифицируется числом  $W_{n'k',nk}^{(2,ass)}$ . Доля в величину  $W_{n'k',nk}^{(2,ass)}$  дается интерференцией двумя матричными элементами третьего порядков, первого и пятого, а также второго и четвертого порядка. Это происходит, когда баллистический линейный ФГЭ находится в конечном состоянии и конусе накопления энергии, который содержит одно из начальных и промежуточных состояний пучков.

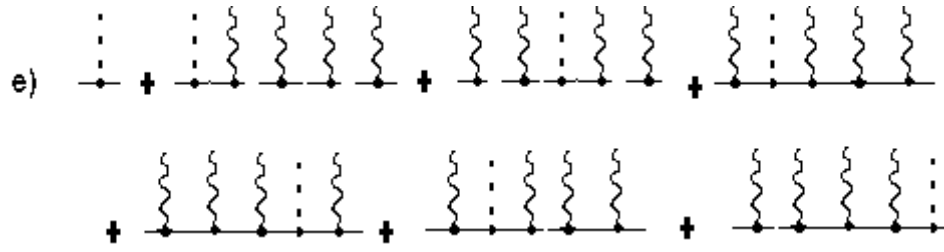
Выражения для волновых векторов дырок в их конечных состояниях определяются законами сохранения энергии в качестве аргументов функции  $\delta$  в выражениях для фототока. В промежуточных расчетах следует выполнить замену в энергической дроби составного матричного элемента в виде

$\lim_{\Gamma \rightarrow 0} (E_i - E_j \pm i\Gamma)^{-1} = P(E_i - E_j)^{-1} \mp i\pi\delta(E_i - E_j)$ , где символ  $P$  обозначает интеграл относительно базового значения. В результате доля в величину  $W_{n\vec{k}', n\vec{k}}^{(2, ass)}$  дают члены, пропорциональные произведениям, где одна дробь имеет действительное значение, а вторая - мнимое. Соответственно, ток баллистического линейного фотогальванического эффекта в виде трех типов оптических переходов, изображенных на рисунке 1, вносит свои вклады. Из рисунка 1 видно, что линейный фотогальванический эффект возникает из-за интерференции процессов первого и пятого порядков (канал В), а также вторых и четвертых процессов с участием (канал А) и без участия фононов.

В общем случае выражение для фототока, используемое при микроскопическом расчете ФГЭ, записывается в виде  $\vec{j}_{PhG} = -e \sum_{m\vec{k}} \vec{v}_{m\vec{k}}(\vec{k}) \rho_{m\vec{k}}(\vec{k})$  где  $\rho_{m\vec{k}}(\vec{k})$  и  $\vec{v}_{m\vec{k}}(\vec{k})$  - матричные элементы плотности матрицы и оператора скорости относительно состояний  $|n\vec{k}'\rangle$  и  $|n\vec{k}\rangle$ , а  $\rho_{m\vec{k}}(\vec{k}) = f_{n\vec{k}}$  - функция распределения в неравновесном состоянии, определяемая процессами генерации, рассеяния и рекомбинации носителей заряда. В равновесном состоянии (а также при предельном времени  $t \rightarrow \infty$  и адиабатическом соединении взаимодействий) выполняется равенство  $\rho_{m\vec{k}}(\vec{k}) = f_0(E_n(\vec{k}))\delta_{m\vec{k}}$ ,  $\rho_{m\vec{k}}(\vec{k}) = f_0(E_n(\vec{k}))\delta_{m\vec{k}}$ , где  $f_0(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E}{k_B T}\right)\right]^{-1}$  - функция распределения в равновесном состоянии.

Рассмотрим следующие оптические переходы, вносящие вклад в ток двухфотонного баллистического фотогальванического эффекта (ФГЭ) (рисунок 2): а) двухфотонные оптические переходы, связанные с поглощением или передачей фононов; б) двухфотонные оптические переходы, в которых фононы участвуют только в промежуточных переходах; в) двухфотонные оптические переходы, связанные с поглощением или передачей фононов, которые участвуют только в промежуточных переходах.





**Рис. 2.** Двухфотонные оптические переходы, происходящие с участием фононов, как в межзональных, так и в пределах одной зоны. Их одновременное участие приводит к асимметричному рассеянию носителей заряда, то есть к фотогальваническому эффекту. Здесь сплошные линии соответствуют электрону, волнистые линии - фотону, штриховые линии - фонону.

В частности, баллистический фототок, связанный с оптическими переходами, в которых фононы являются реальными, а фотоны - виртуальными, определяется с помощью следующего выражения

$$\vec{j} = e \left[ -\sum_k \vec{V}_{1k} \tau_{1k} \cdot \left( \frac{\partial f_{1k}}{\partial t} \right) + \sum_{k'} \vec{V}_{2k'} \tau_{2k'} \cdot \left( \frac{\partial f_{2k'}}{\partial t} \right) \right]. \quad (6)$$

Здесь

$$\left( \frac{\partial f_{2k'}}{\partial t} \right) \propto \sum_{k'} \left[ d_{2k',1k}^{(\pm)} + \sum_{m,l=1,2} \frac{M_{2k,mk}^{(2)} d_{mk',lk}^{(\mp)} - M_{lk,1k}^{(2)}}{(E_{mk'} - E_{1k} - 2\hbar\omega \pm \hbar\Omega) \cdot (E_{lk} - E_{1k} - 2\hbar\omega)} + \dots \right]^2 \times \left( N_\Omega + \frac{1 \pm 1}{2} \right) \left[ f_{1k} (1 - f_{2k'}) - f_{2k'} (1 - f_{1k}) \right] \delta(E_{2k'} - E_{1k} \pm \hbar\Omega). \quad (7)$$

Здесь  $M_{nk,mk}^{(2)}$  - компонентный матричный элемент двухфотонного поглощения света,  $N_\Omega + \frac{1 \pm 1}{2}$ ,  $d_{lk',1k}^{(\pm)} = F_{mk'}^+ D_{\vec{q}} F_{nk}$  - матричный элемент оператора электрон-фононного взаимодействия  $D_{\vec{q}} = D_{\vec{k}'-\vec{k}}$ , в данном случае знак "+" соответствует поглощению фонона частоты  $\Omega$ , знак "-" соответствует испусканию фонона частоты  $\Omega$ ,  $N_\Omega$  - функция распределения фононов,  $f_{mk}$  - функция распределения носителей тока энергией  $E_{mk}$ ,  $\delta(E_{mk} - E_{nk} - \hbar\omega)$  -  $\delta$  - функция Дирака, представляющая закон сохранения энергии, связанный с оптическим переходом,  $n, m$  - порядковый номер зоны (или ветви), относящиеся к рассматриваемой зоне,  $\omega, l, \vec{e}$  - частота, интенсивность, вектор поляризации света,  $H$  - эффективный гамильтониан носителей тока,  $F_{mk}$  - элементы носителей тока - доминирующая матрица, определяемая с помощью выражения, отмеченного для волновой функции.

При двухфотонном поглощении света в полупроводниках баллистический фотогальванический эффект, как и в случае однофотонного приближения, выражается через функции  $\Phi_i(\vec{k}, \vec{k}')$ , которые определяются

произведением матричных элементов операторов взаимодействия электрон-фонон и электрон-фотон, умноженных на мнимый член. При этом нижние индексы матричных элементов операторов взаимодействия  $m, n, l$  должны соответствовать порядковым номерам зон, к которым относятся рассматриваемые зоны (ветви). Например, для валентной зоны полупроводника  $p - GaAs$  принимаем  $m, n, l = 1, 2$ . Следует отметить, что вместе с такими функциями также существуют функции, которые определяются заменой  $M_{2\bar{k}, 1\bar{k}}^{(2)} \rightarrow \sum \frac{M_{2\bar{k}, 1\bar{k}}^{(1)} M_{1\bar{k}, 1\bar{k}}^{(1)}}{E_{1\bar{k}} - E_{1\bar{k}} - i0}$ . Электрон-фонон (фотон)

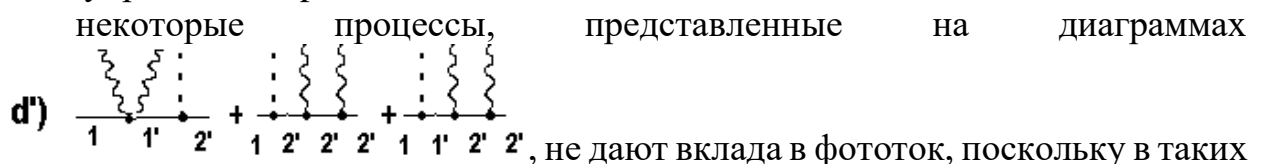
взаимодействия (как в пределах одной зоны, так и межзональные) могут быть пропорциональны квадратам модулей матричных элементов. При этом такие условия не приводят к асимметричному рассеянию носителей заряда на фононах (фотонах), то есть фототок не возникает. В частности, для двухфотонного поглощения света в  $p - GaAs$  волновой вектор фотоиндуцированных дырок определяется как:  $k_\omega = \sqrt{2\mu\omega / \hbar}$  где энергия тяжелых (лёгких) дырок выражается как:  $E_{hh(lh)}^* = \frac{2m_{lh(hh)}}{m_{hh} - m_{lh}} \hbar\omega$ , где

$m_{hh} = m_1 (m_{lh} = m_2)$  - эффективные массы тяжелых (лёгких) дырок. При этом выбран сферический энергетический спектр дырок. В этом случае, в зависимости от природы (типа) оптических переходов в валентной зоне, энергии дырок в промежуточных состояниях определяются как:  $E_{hh}^* \mp \hbar\Omega$ ,  $E_{hh}^* + \hbar\omega \mp \hbar\Omega$ ,  $E_{lh}^* \mp \hbar\Omega$  при этом соответствующие волновые векторы дырок равны:

$$k_1 = \sqrt{\frac{2m_{hh}}{\hbar^2} (E_{hh}^* \mp \hbar\Omega)}, \quad k_2 = \sqrt{\frac{2m_{hh}}{\hbar^2} (E_{hh}^* + \hbar\omega \mp \hbar\Omega)}, \quad k_3 = \sqrt{\frac{2m_{hh}}{\hbar^2} (E_{lh}^* \mp \hbar\Omega)}$$

В этом случае верхний (нижний) знак соответствует поглощению (передаче)  $LO$ -фононов с энергией  $\hbar\Omega$ .

Волновые векторы дырок в промежуточных состояниях определяются с помощью последних соотношений с  $m_{hh} \rightarrow m_{lh}$  заменами в них. Следует отметить, что процессы, связанные с передачей энергии дырок в диапазоне частот меньше  $\hbar\Omega$  (если они разрешены), вклада не дают. к баллистическому линейному току ФГЭ. Например, в приближении бесконечных тяжелых дырок в полупроводнике  $p-GaAs$

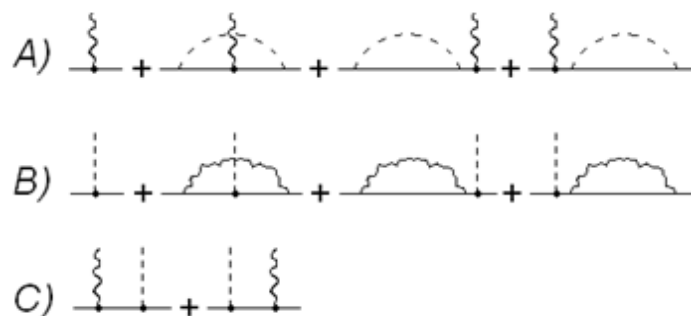


$$d''') \quad \frac{\text{wavy} \text{---} \text{dot} \text{---} \text{dot}}{2 \quad 1' \quad 2'} + \frac{\text{wavy} \text{---} \text{dot} \text{---} \text{dot}}{2 \quad 2' \quad 2'} + \frac{\text{wavy} \text{---} \text{dot} \text{---} \text{dot}}{2 \quad 2' \quad 1' \quad 2'} + \dots$$

процессы типа  $d''')$  дают вклад в фотон, когда энергия фонона равна энергии двух фотонов. Такая ситуация, по нашему мнению, в эксперименте не наблюдается.

В заключении показаны возможности наблюдения линейного ФГЭ, квадратичного (нелинейного) интенсивности света, в кристаллах без центра симметрии. Также обращено внимание на то, что в одноосно-симметричных пьезополупроводниках (как и в гиротропных кристаллах) спектральная связь фототока наблюдается в частотной области  $\hbar\omega \rightarrow 2\Delta$  и происходит за счет серповидной формы одной из зон, а также на температурную зависимость коэффициента поглощения носителей тока, описываемого межзонными оптическими переходами полупроводника.

Третья глава, озаглавленная «Сдвиговой фотовольтаический эффект и эффект увлечения фотонами в пьезокристаллах», посвящена смещающемуся линейному ФГЭ, связанному со смещением в реальном пространстве центра тяжести волнового пакета носителей тока при прямых оптических переходах (фотонный механизм) и фононном рассеянии дырок (фононный механизм). Рассчитаны спектральные и температурные зависимости полярного однофотонного фототока, возникающие при учете линейных и наибольших (релятивистских) членов по волновым векторам в эффективном гамильтониане дырок в арсениде галлия с дырочной проводимостью.



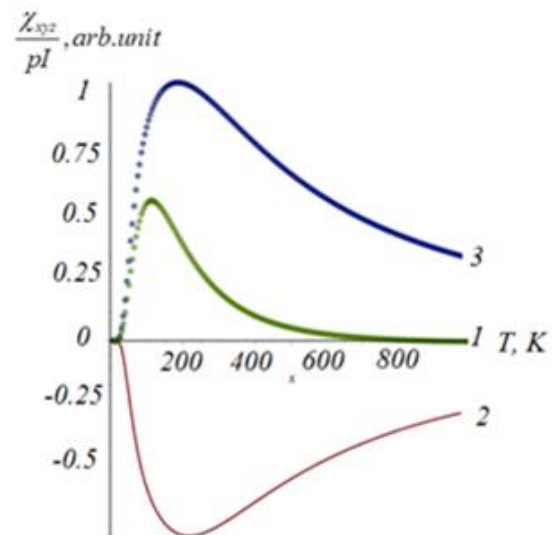
**Рис. 3. Диаграммы Фейнмана-Келдыша, приводящие к линейному фотоэлектрическому эффекту в полупроводниках, интерференция которых сложна: сплошная линия-электрон (или дырка), волнистая линия-фотон, пунктирная линия-фонон.**

Баллистический фототок а формируется при учете асимметрии электрон-фотонного и электрон-фотонного взаимодействий (рис. 3). При этом каждый из оптических переходов, изображенных на рис. 3, дает отдельную долю, а температурная связь долей процессов типа А и В показана на рис. 4. Из рисунка 4 видно, что доля процесса типа А положительна, доля процесса типа Б отрицательна, но результирующая доля фототока «баллистический+сдвиговый» положительна.

Заметим, что доля фототока S-процессов не зафиксирована на рис. 5, но учтена в расчетах. Для параметров арсенида галлия в количественных расчетах были выбраны следующие значения:  $\hbar\Omega_{LO} = 36 \text{ meV}$  - энергия длинноволновых оптических фононов, низкая и высокая частота полной диэлектрической проницаемости:  $\epsilon_0 = 12.5$  и  $\epsilon_\infty = 10.9$ ,  $|D'| = 3.9 \cdot 10^{-23} \text{ эВ} \cdot \text{см}^3$ ,  $\rho = 5.31 \text{ г/см}^3$ .

На рис. 5 проведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными результатами по температурной зависимости линейного тока ФГЭ для  $p$ -GaAs с эффективной массой тяжелых и легких дырок  $m_2 = 0,68m_0$   $m_1 = 0,12m_0$ , где концентрация дырок равна  $p=7,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и следующими значениями параметров, связанные с линейными (квадратичными) членами по отношению к волновым векторам в эффективном гамильтониане дырок  $|D'| = 3,25 \cdot 10^{-23} \text{ эВ} \cdot \text{см}^3$  и  $k_0 = (1 \div 6) \cdot 10^{-10} \text{ (эВ.см)}$ .

Отметим, что знаки зональных параметров, связанных с линейными (квадратичными) членами по отношению к волновым векторам в эффективном гамильтониане полостей, неизвестны. Поэтому нельзя однозначно говорить о долях фототока в зависимости от констант  $D'$  и  $k_0$ . Однако если считать магнитуду  $D'$  положительной, а  $k_0$  отрицательной, то результирующая доля фототока приближается к экспериментальным



**Рис. 4. Температурная зависимость величины  $c_{xyz}/\rho$  для межзонных оптических переходов валентной зоны GaAs при энергии фотонов 117 мэВ, где  $c_{xyz}$  - линейный тензор ФГЭ,  $\rho = 7,4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  - концентрация дырок, 1 - доля в фототок оптических переходов с участием только фотонов, 2 - доля в фототок оптических переходов с участием только фононов, 3 - результирующая доля всех остальных типов оптических переходов.**

результатам. Если их выбрать одного знака, то модуль результирующей доли фототока резко отличается от экспериментальных результатов.

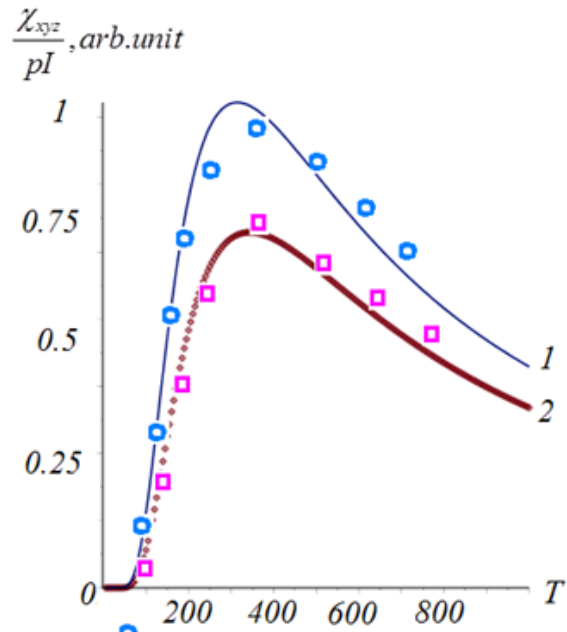
Расчеты показывают, что если зонные параметры в  $p - GaAs$  считать положительными, то с ростом энергии фотонов максимум фототока увеличивается и смещается в область высоких температур. Например, для  $m_2 = 0,68m_0$ ,  $m_1 = 0,12m_0$  фототок на величине  $\hbar\omega = 117 meV$ , связанный с переносом фононов, достигает максимума при температуре  $T=120 K$ , а для фононов при  $T=360 K$ .

В  $\hbar\omega = 130 meV$  случаях фототок, связанный с испусканием фононов, достигает максимума при  $T=180K$ , а поглощением фононов при  $T=420K$ . С увеличением энергии фотона максимальная величина фотона, связанная с поглощением фононов, не меняется, а с поглощением фононов увеличивается в 1,135 раза.

Заметим, что если эффективная масса легких дырок увеличена (например, в 4/3 раза), но эффективная масса тяжелых дырок ( $m_1 = 0,12m_0$ ) и частота света ( $\hbar\omega = 117 meV$ ) остаются неизменными, то фототок с испусканием фонона увеличивается (около 1,6 раза) и смещается в область высоких температур. Максимум фототока при поглощении фононов не меняется (точнее, уменьшается в 1,08 раза), но даже в этом случае он смещается в область высоких температур.

Отметим, что эти теоретические и экспериментальные температурные связи соответствуют друг другу в процессах, связанных с поглощением фононов для соотношения  $m_1/m_2 = 1.135$ .

На рис. 5 сравниваются теоретические и экспериментальные связи величины  $\chi_{xyz}/p$  для образцов  $p - GaAs$  с концентрацией дырок  $p=7.4 \cdot 10^{16} cm^{-3}$ . Как видно из рис. 5, в диапазоне комнатных температур теория и эксперимент очень хорошо согласуются, при учете доли фототока фотонного механизма разница между теоретическими и экспериментальными результатами в диапазоне температур  $T>200 K$  составляет не менее 20%. Такая



**Рис. 5. Теоретические (сплошная линия) и экспериментальные температурные корреляции результирующей (баллистической + сдвиговой) величины  $c_{xyz}/p$  при облучении  $CO_2$ -лазером  $p-GaAs$  с концентрацией дырок  $p = 7,4 \cdot 10^{22} m^{-3}$ : 1-длина волны 10,6 мкм, 2-длина волны подходит для освещения 9,5 мкм. Результаты эксперимента с кругом и ромбом.**



ситуация объясняется тем, что носители тока направленно движутся в одном направлении за счет асимметричного рассеяния фононов и фотонов.

В расчетах поглощение света создает анизотропно распределенные по отношению к фотонным импульсам носители тока, а затем учитывается, что они сталкиваются в фононах, входах и друг с другом, в результате чего начинают смещаться в реальном пространстве при на каждом этапе каскадного рассеяния, добавляя свою долю к общему количеству фотонов. Этот ток отличается от тока рассеяния дырок в исходном состоянии не только за счет уменьшения анизотропии распределения вследствие столкновений, но и за счет уменьшения энергетической связи среднего смещения. При этом «парциальные» фототоки могут иметь противоположные знаки (рис. 4, кривые 1 и 2). Отметим, что линейный ФГЭ смещения может возникать и в полупроводниковых наноструктурах без центра инверсии. В этом случае интерференция процессов, представленных на рис. 3, способствует смещению линейного тока ФГЭ, поскольку при поглощении света в одной зоне появляется дополнительный механизм, связанный с межсостоятельными собственными оптическими переходами носителей тока за счет размерного квантования в квантованная среда.

Такие переходы в центре зоны Бриллюэна соответственно изображаются объемными эффективными массами, а вне центра зоны Бриллюэна – поперечными эффективными массами, которые, в свою очередь, являются начальным и последним случаями, связанными с порядковыми номерами. При расчете вклада таких переходов в фототок необходимо учитывать частичное заполнение состояний в выражении линейного тока смещения ФГЭ, используемом в объемных кристаллах. Поэтому при расчете фототока необходимо суммировать не только квантованные состояния одного численного размера, но и квантованные состояния разных числовых размеров для оптических переходов в пределах одной зоны.

Температурная зависимость тока двухфотонного смещения линейного ФГЭ в n-GaP определяется температурной зависимостью коэффициента

поглощения света  $K_{\parallel}(2\omega, T) = \frac{4e^2 P^2}{cn_{\omega} \omega \hbar^2 (A_3 - A_1)} k_{\omega} f(k_{\omega})$ , представленного

прямыми оптическими переходами между зонами зоны проводимости в

энергетическом спектре электронов  $E_{x_3, x_1} = A_{3,1} k^2 \pm \frac{\Delta}{2}$ , где

$k_{\omega}^2 = (2\hbar\omega - \Delta) / (A_3 - A_1)$ ,  $f(k_{\omega}) = \exp\left(\left(E_F - A_1 k_{\omega}^2 - \frac{\Delta}{2}\right) / k_B T\right)$ ,  $\Delta$  - энергия

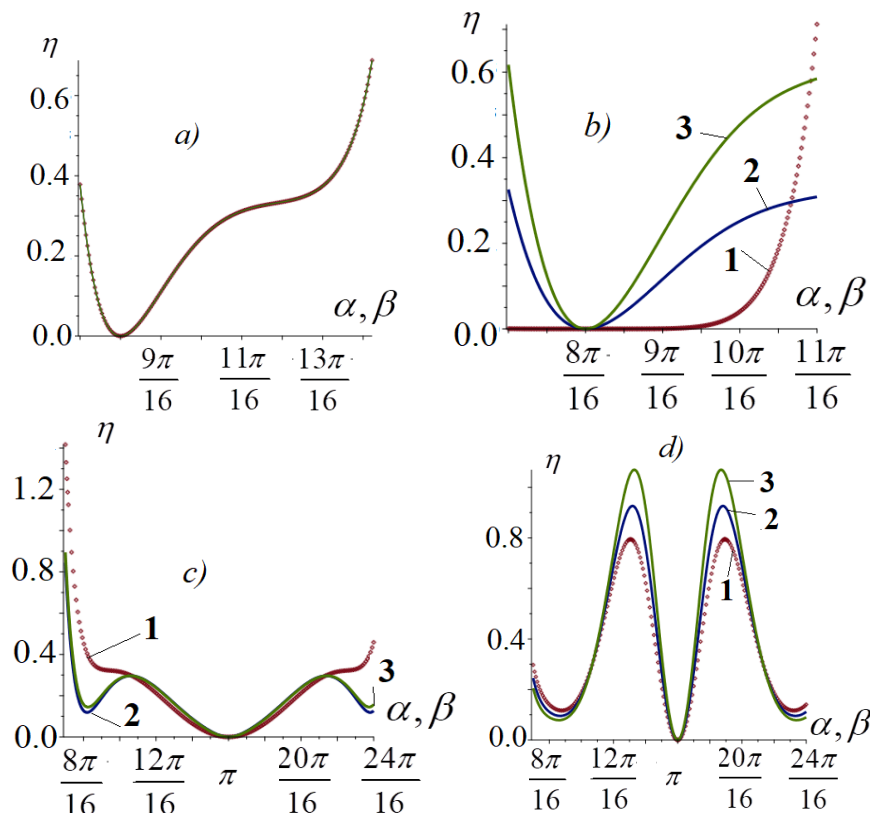
между полосами,  $E_F$  - энергия Ферми для электронов. Если энергетический

спектр электрона имеет вид:  $E_{x_3, x_1} = Ak_z^2 + Bk_{\perp}^2 \pm \left(\frac{\Delta^2}{4} + P^2 k_z^2\right)^{1/2}$ , то

температурная связь двухфотонного тока определяется соотношением

$$K_{\parallel}(2\omega, T) = \frac{e^2}{cn_{\omega}} \frac{k_B T}{\hbar B} \frac{1}{k_z^{(\omega)}} \cdot e^{\frac{\hbar\omega - A(k_z^{(\omega)})^2}{k_B T}} \cdot e^{\frac{E_F}{k_B T}}, \quad \text{в данном случае}$$

$$k_z^{(\omega)} = \frac{\Delta}{2P} \sqrt{\left(2 \frac{\hbar\omega}{\Delta}\right)^2 - 1} \quad \text{и предполагается, что свет распространяется вдоль}$$



**Рис. 6.** Угловая зависимость коэффициента трехфотонного линейного кругового дихроизма в InSb. 1-кривая соответствует энергии фотона  $\hbar\omega = 0,6 eV$ , 2-кривая для энергии фотона  $\hbar\omega = 0,5 eV$ , а 3-кривая для энергии фотона  $\hbar\omega = 0,44 eV$ .

главной оси симметрии кристалла ( $C_3$ ).

В четвертой главе «Многоквантовый линейно-циркулярный дихроизм в пьезокристаллах с учетом эффекта Раби» теоретически изучены многофотонное поглощение поляризованного света и линейный циркулярный дихроизм по модели Кейна, а также поглощение света в размерно-индуцированных полупроводниковых структурах. В целом многофотонное поглощение света осуществлено в широкозонных полупроводниках, поскольку их физико-химические свойства изучены более детально, чем в других. Однако при теоретическом исследовании ряда фотонных кинетических явлений в узкозонных кристаллах необходимо проводить расчеты не только в приближении Латтинжера-Кона, но и в многозонном приближении Кейна, в котором эффективный гамильтониан тока носителей заряда записывается в виде матриц размером не менее  $6 \times 6$  или  $8 \times 8$ .

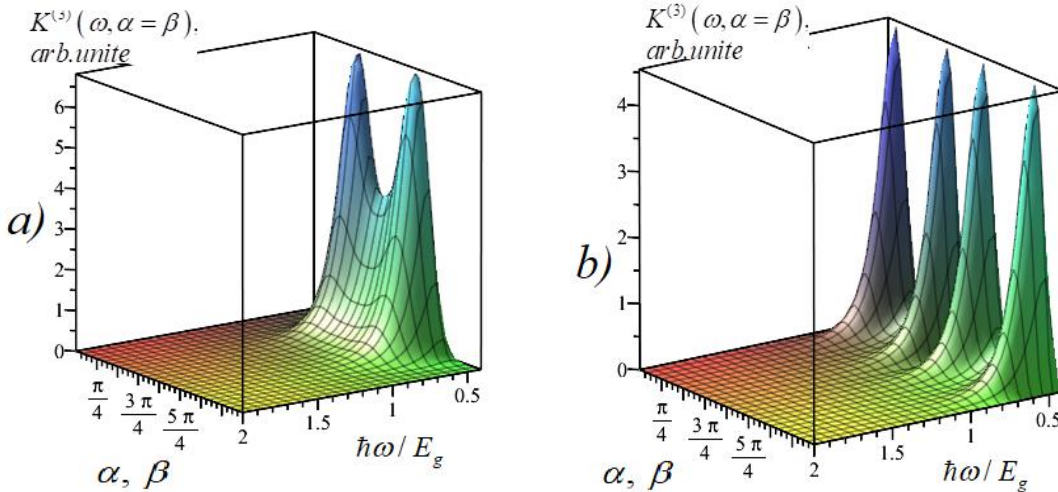
В частности, матричные элементы трехфотонных оптических переходов из зоны спин-орбитального расщепления в зону проводимости в пьезополупроводниках (табл. 1) анализируются с помощью функций  $\mathfrak{R}_j (j = 3 \div 12)$ , зависящих от вектора поляризации света и частоты в комплексном виде,  $P_{cv}$  - параметра Кейна и других величин. Угловая зависимость коэффициента трехфотонного линейного циркулярного дихроизма ( $\eta^{(3)}$ ), рассчитанная для InSb на основе таблицы 1, приведена на рис. 6, а 1-й, 2-й, 3-й, 4-й оптические переходы в таблице показаны на рисунках а), б), в), г) подходит. Из этого рисунка видно, что коэффициент  $\eta^{(3)}$  имеет осцилляционный вид в зависимости от угла и его амплитуда уменьшается со скачком частоты. На рис. 7 показано, что коэффициент трехфотонного поглощения ( $K^{(3)}$ ), рассчитанный при комнатной температуре для InSb, колеблется в зависимости от угла и увеличивается с увеличением частоты, достигая экстремума и затем уменьшается. Такая ситуация объясняется тем, что величина  $\eta^{(3)}$  сложно связана с частотой.

Таблица 1.

| № | Виртуальные состояния  | Матричный элемент оптического перехода типа $ SO, -1/2\rangle \rightarrow  c, -1/2\rangle$                                     |
|---|--|--|
| 1 | В валентной зоне   | $\frac{i}{2\sqrt{3}} \frac{\hbar^2 P_{cv} B k^2}{m_c \hbar \omega} e'_z (\mathfrak{R}_3  e'_+ ^2 + \mathfrak{R}_4 e'_z{}^2)$ . |
| 2 | В подзоне спин-орбитального расщепления  | $\frac{-i}{2\sqrt{3}} \left(\frac{\hbar^2}{m_c}\right)^2 \frac{P_c k^2}{(\hbar \omega)^2} e'_z{}^3$ .                          |
| 3 | В подзоне спин-орбитального расщепления принимает вид  | $\frac{i}{\sqrt{3}} \frac{P_{cv} A^2 k^2}{(\hbar \omega)^2} e'_z{}^3$ .  |
| 4 | Первое виртуальное состояние лежит в валентной, а второе в зоне проводимости                             | $\frac{i}{2\sqrt{3}} \frac{\hbar^2 P_{cv} B k^2}{m_c \hbar \omega} e'_z (\mathfrak{R}_5  e'_+ ^2 + \mathfrak{R}_6 e'_z{}^2)$ . |
| 5 | Первое виртуальное состояние лежит в зоне проводимости, а второе - в валентной зоне                      | $\frac{i}{4\sqrt{3}} \frac{P_{cv} B^2 k^2 e'_z}{\hbar \omega} (\mathfrak{R}_7  e'_+ ^2 + \mathfrak{R}_8  e'_z ^2)$ .           |
| 6 | Первое виртуальное состояние лежит в валентной зоне, а второе в подзоне спин-орбитального расщепления    | $\frac{-i}{12\sqrt{3}} \frac{P_{cv}^3}{\hbar \omega} e'_z (\mathfrak{R}_9  e'_+ ^2 + \mathfrak{R}_{10}  e'_z ^2)$ .            |
| 7 | Первое виртуальное состояние лежит в зоне проводимости, а второе в подзоне спин-орбитального расщепления | $\frac{i}{12\sqrt{3}} \frac{P_{cv}^3}{(\hbar \omega)^2} e'_z ( e'_+ ^2 +  e'_z ^2)$ .  |
| 8 | Первое виртуальное состояние лежит в подзоне спин-орбитального расщепления, а второе в зоне проводимости | $-\frac{2i}{\sqrt{3}} \frac{\hbar^2 P_{cv} A k^2}{m_c (\hbar \omega)^2} e'_z{}^3$ .  |

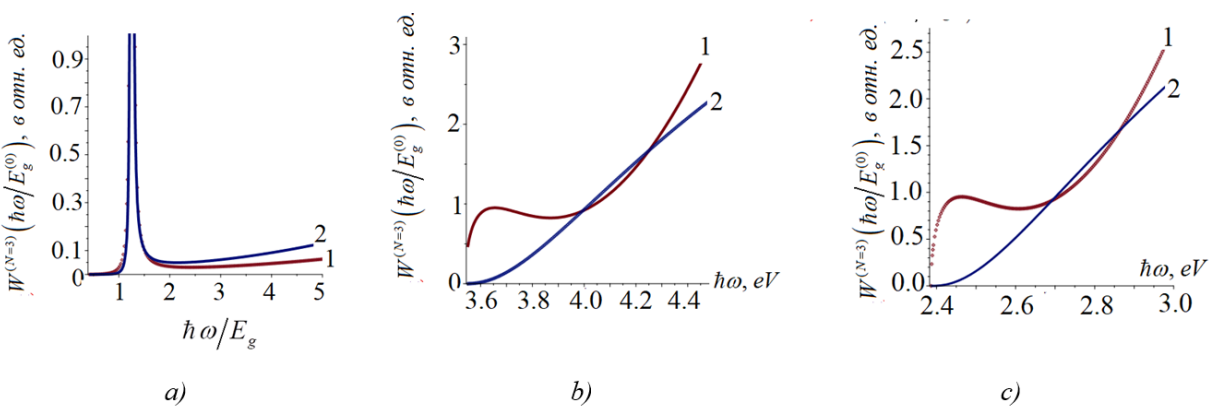
|   |   |   |
|---|---|---|
| 9 | Первое виртуальное состояние лежит в подзоне спин-орбитального расщепления, а второе в валентной зоне | $\frac{-i}{12\sqrt{3}} \frac{P_{cv}^3}{\hbar\omega} e'_z \left( \Re_{11}  e'_+ ^2 + \Re_{12}  e'_z ^2 \right).$ |
|---|---|---|

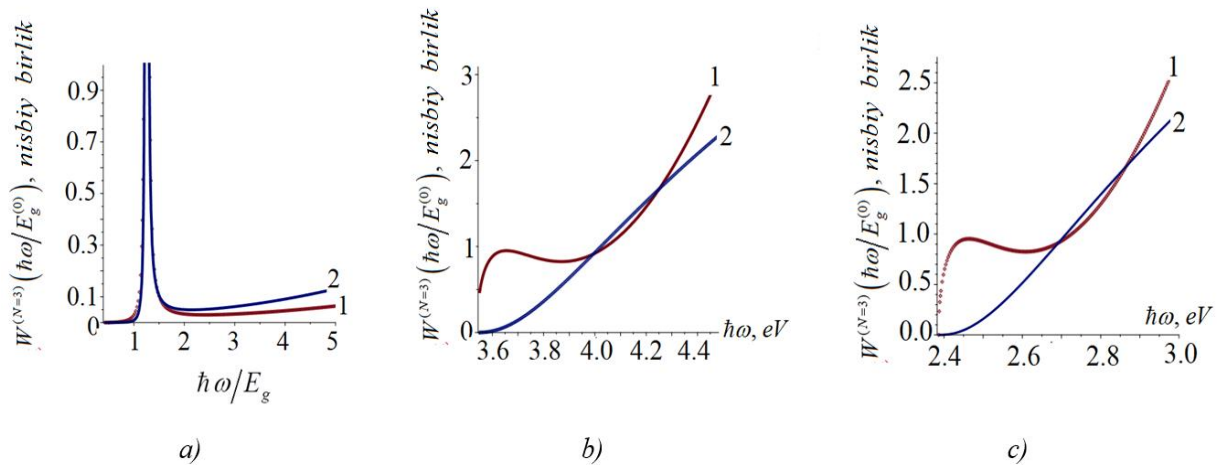
В целом зависимость величин  $\eta^{(3)}$  и  $\kappa^{(3)}$  от спектра, температуры и вектора поляризации выражается  $\Re_j (j=3 \div 12)$  функциями. Знаменатели



**Рис. 7. Угловая и частотная зависимости коэффициента трехфотонного поглощения, рассчитанная в InSb при комнатной температуре для: а) циркулярно, б) линейно поляризованного света.**

некоторых  $\Re_j$  функций могут стремиться к нулю при определенной частоте. Это, в свою очередь, может вызвать сингулярность в спектральных связях величин  $\eta^{(3)}$  и  $\kappa^{(3)}$ . Однако anomalous изменение спектральной зависимости  $\kappa^{(3)}$  не вызывает anomalous изменения спектральной зависимости  $\eta^{(3)}$ , поскольку оно определяется соотношением вероятностей для линейно и циркулярно поляризованного света (рис. 8).



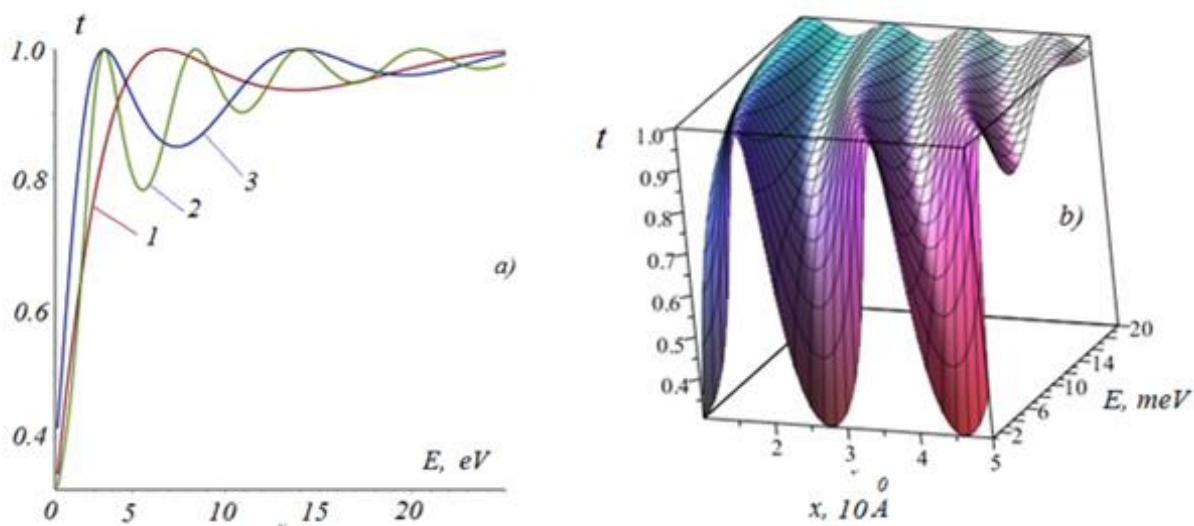


**Рис. 8.** Спектральные зависимости вероятности трехфотонного перехода света из зоны спин-орбитального расщепления в зону проводимости в пьезополупроводниках *InAs*(a), *ZnS* (b), *AlAs* (c).

В пятой главе, под названием «Некоторые электронные и кинетические эффекты в двух и трехмерных кристаллических структурах», описаны теоретические исследования транспорта электронов через многослойные полупроводниковые структуры, состоящих из последовательного расположения асимметричных потенциальных ям и потенциальных барьеров, а также размерное квантование электронов в прямоугольном асимметричном потенциальной яме. При этом показано, что коэффициент переноса электронов с несимметричного потенциального барьера по его высоте симметричен относительно изменения формы  $\tilde{k}_j \leftrightarrow \tilde{k}_{j+2}$ ,

где  $\tilde{k}_j = k_j / m_j$ ,  $k_j = \sqrt{\frac{2m_j}{\hbar^2} (E - U_j)}$ , то есть перехода электронов из слоя  $j$  в слой  $j+2$  и наоборот физически не отличима.

Показано, что энергозависимое колебание коэффициента туннелирования объясняется интерференцией волн де Бройля, рассеянных обратно от границы слоя. В этом случае амплитуда туннелирования количественно определяется не только волновыми векторами носителей тока, но и значениями их эффективных масс. Это колебание возникает и в симметричных по высоте структурах, где эффективные массы носителей тока в соседних слоях различны. Из рис. 9 видно, что в структурах с одинаковой толщиной слоя амплитуда колебаний коэффициента прозрачности увеличивается, а частота колебаний уменьшается по мере увеличения энергии электронов. В результате туннельными колебаниями можно управлять, изменяя геометрические размеры структуры.



**Рис. 9.** Двумерная (а) и трехмерная (б) зависимость коэффициента прохождения от энергии электронов в симметричной структуре типа «потенциальная яма+потенциальный барьер» (высота барьера 10 мэВ), где на рисунке (а) 1-кривая соответствует толщине барьера 50 Å, 2 - кривая толщине 100 Å, 3 - кривая соответствует толщине барьера 200 Å.

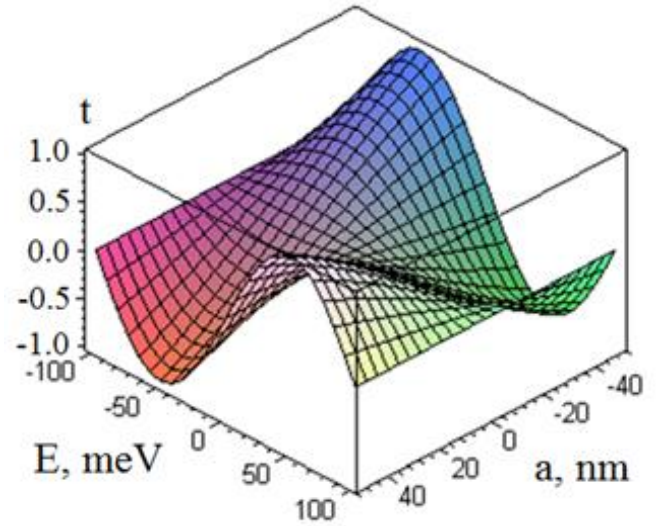
Для определения локализации электронов в указанной выше структуре уравнение диагонального элемента транспортной матрицы определяется как  $T_{11}^{(3)} = 0$ . При этом обратим внимание на то, что решение уравнения Шредингера, полученное для структуры решетки «барьер+барьер+барьер» в состоянии локализации частицы в асимметричной потенциальной яме, представляет собой возрастающую волновую функцию. Чтобы обеспечить полноту задачи, в дальнейшем мы полагаем, что высоты барьеров в нечетно упорядоченных слоях больше энергии электронов ( $U_1, U_3, U_5 > E$ ) и  $k_2 = k_4, x_2 - x_1 = x_4 - x_3$ . Тогда энергетический спектр электронов в структуре при условии

$\exp[-\kappa_3(x_3 - x_2)] \ll 1$  определяется с помощью соотношения  $E^{(0)} = \frac{\hbar^2 k_2^{(0)2}}{2m_2} + U_2$ , а

волновой вектор  $k_2^{(0)}$  определяется из условия  $\sin[\phi_{12} + \phi_{32} - k_2^{(0)}(x_2 - x_1)] = 0$ . В симметричных структурах должно наблюдаться энергезависимое колебание коэффициента надбарьерного перехода частиц, даже если не учитывать условие Бастарда.

Такое колебание изображено на рис. 9. Как и в случае перехода под потенциальным барьером, нетрудно определить колебание коэффициента перехода через потенциальный барьер в зависимости от энергии частицы. Эти случаи объясняются интерференцией волн де Бройля, возвращающихся из области скачка потенциала в поле барьера и рамки. В тех случаях, когда размеры ямы и потенциальных барьеров, а также скачки ямы и потенциального барьера количественно равны, амплитуда колебаний коэффициента надбарьерного прохождения в зависимости от энергии частицы больше коэффициента прохождения через потенциальный барьер.

Такие соображения справедливы также для несимметричных структур, причем число колебаний существенно зависит от соотношения эффективных масс электронов в соседних слоях, коэффициентов возврата и переноса и соотношения высот потенциальных барьеров на левой и правой сторонах с относительно выбранной ямы. Эта ситуация проиллюстрирована на рис. 10. Естественно, последний случай усложняет количественные расчеты, поскольку зависит от выбора



**Рис. 10. Колебательная зависимость коэффициента прохождения от энергии электронов ( $E$ ) и толщины потенциальной ямы ( $a$ ).**

конкретной структуры. Из последних выражений видно, что в энергетическом спектре электронов можно наблюдать размерное квантование. Если такой  $E_-(k_y, k_z, n_-) = E(k_y, k_z) + U_2 + E_0 n_-^2$  определен с помощью соотношения, то барьер является туннельно-чистым при условии  $\tilde{k}_1 = \tilde{k}_2 = \tilde{k}_3$ ,  $\tilde{k}_2 = \pi n_- / [2(x_2 - x_1)]$ , т.е.  $t_{н.б.}^{(31)} = 0$ , где  $n_-$  – нечетное число. Если спектр размерного квантования выразить как  $E_+(k_y, k_z, n_+) = E(k_y, k_z) + U_2 + E_0 n_+^2$ , то коэффициент  $t_{м.у.}^{(31)}$  определяется соотношением высот потенциальных барьеров и эффективных масс электронов в соседнем слое, то есть  $4\tilde{k}_1\tilde{k}_2\tilde{k}_3 \left\{ (\tilde{k}_2^2 + \tilde{k}_1\tilde{k}_3)^2 - (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)(\tilde{k}_3^2 - \tilde{k}_2^2) \right\}^{-1}$ , где  $n_+$  – четное число. В итоге в пересчете на  $\tilde{k}_1 \langle \tilde{k}_2 \rangle \tilde{k}_3$  (или  $\tilde{k}_1 \langle \tilde{k}_2 \rangle \tilde{k}_3$ ) в такой структуре это означает увеличение прохождения волн де Бройля.

Для диагональных матричных элементов матрицы перехода при электронных подбарьерных переходах можно использовать соотношение  $T_{11}^{(31)} = T_{11}^{(32)}T_{11}^{(21)} + T_{12}^{(32)}T_{21}^{(21)}$ , где  $E \rangle U_j$  ( $j=1,3$ ) и  $E \langle U_2$  требуют преобразований вида  $\tilde{k}_j \pm \tilde{k}_2 = \tilde{k}_j \pm i\tilde{\kappa}_2 = \sqrt{\tilde{k}_j^2 + \tilde{\kappa}_2^2} e^{\pm i\phi_{j2}}$ , где  $\phi_{j2} = \arctg(\tilde{\kappa}_2 / \tilde{k}_j)$ ,  $\tilde{\kappa}_2 = \sqrt{\frac{2m_2}{\hbar^2}(U_2 - E)}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования фотонных кинетических эффектов в двух- и трехмерных пьезополупроводниках были сделаны следующие выводы:

1. Развита теория механизмов поляризационно-зависимого фотогальванического эффекта и эффекта фотонного увлечения, которые зависят от асимметричного рассеяния носителей тока на фонах и фотонах в пьезополупроводниках со сложной зоной.
2. Впервые построена количественная теория линейного циркулярного дихроизма однофотонного эффекта фотонного увлечения в гиротропных полупроводниках с дырочной проводимостью, где учтен вклад в фототок эффекта когерентного насыщения.
3. Впервые получены теоретические выражения для электронных состояний и туннелирование электронов в асимметричных полупроводниковых структурах с учетом разницы эффективных масс электронов в соседних слоях структуры. Получены выражения для коэффициентов прохождения электронов, а также коэффициента прозрачности барьеров и волновых функций электронов.
4. Определены условия туннелирования и размерного квантования блоховских электронов в многослойных полупроводниковых структурах с размерно квантованной ямой + потенциальным барьером с учетом условия Бастарда.
5. Впервые разработан метод количественного расчета трехфотонного линейного циркулярного дихроизма, обусловленного оптическими междузонными переходами в пьезополупроводниках. Доказано, что нелинейное по интенсивности поглощение света связано с изменением функции распределения дырок в сильном электромагнитном поле.
6. Предложена количественная теория двухфотонного баллистического фотогальванического эффекта в полупроводнике со сложной валентной зоной и на ее основе теоретически обоснован новый метод исследования зонной структуры пьезополупроводников и механизма релаксации импульса.
7. Анализированы температурная и частотная зависимости поляризационно-зависимого тока линейного фотогальванического эффекта и установлено, что основной вклад в результирующий фототок в полупроводниках тетраэдрической симметрии дает фотонный механизм. Доказано, что если не учитывать анизотропию функции распределения электронов, то сдвиговый фототок не возникает.
8. Развита теория одно- и двухквантового сдвигового фототока, обусловленного двухфотонными межзонными прямыми переходами в пьезополупроводниках, в которой учитывается как и одновременное так и последовательное поглощение двух фотонов.
9. Впервые доказано, что двухквантовый баллистический фототок возникает за счет слагаемых, имеющих разные четности к инверсии времени в операторах электрон-фотонного или электрон-фононного взаимодействий. Определена температурная зависимость тока



двухфотонного линейного фотовольтаического эффекта в пьезополупроводниках со сложной зонной структурой.

10. Установлено что, предложенная теория объясняет экспериментальные результаты по определению зависимости тока линейного фотовольтаического эффекта от температуры, полученные при освещении образцов  $p$  -  $GaAs$   $CO_2$ -лазером: в области температур до 200 К с большой точностью, а в области  $T > 200$  К между данными теории и результатами эксперимента существует разница не превышающая 20%.



**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON AWARDING  
SCIENTIFIC DEGREES AT THE RESEARCH INSTITUTE OF  
SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELECTRONICS AT THE  
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

---

**SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS  
AND MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF  
UZBEKISTAN NAMED AFTER MIRZO ULUGBEK  
FERGANA STATE UNIVERSITY**

**RASULOV VOXOB RUSTAMOVICH**

**PHOTON-KINETIC EFFECTS IN TWO AND THREE DIMENSIONAL  
PIEZOSEMICONDUCTORS**

**01.04.10 - Physics of Semiconductors**

**ABSTRACT OF THE DOCTOR'S DISSERTATION (DSc) PHYSICAL AND  
MATHEMATICAL SCIENCES**

**Tashkent –2024**

The topic of the doctoral dissertation (DSc) in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under the number B2023.3.DSc/FM150.

The dissertation was completed at the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the Mirzo Ulugbek NUUZ.

The abstract of the thesis in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the web page at [ispm.uz](http://ispm.uz) and on the Information and Educational Portal "ZiyoNet" at [www.ziyo.net/uz](http://www.ziyo.net/uz).

**Scientific consultant:** **Utamuradova Sharifa Bekmuradovna**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Dadamirzayev Muhammadjon G'ulomqodirovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Karajanov Smagul Jangibergenovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Sharibayev Nosirjon Yusupjanovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Leading organization:** **Andijan state university**

The defense of the thesis will take place on " 26 " 12 2024 at 10 hours at a meeting of the Scientific Council DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 Institute Semiconductor Physics and Microelectronics at NUUZ. (Address: 100057, Tashkent, Yangi olmazor str., Building 22. Administrative building of Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics, conference hall. Tel.: (998 95 146-77-44; Fax: (998 71) 246-19-76; e-mail [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz)).

You can get acquainted with the thesis at Department of Implementation of Digital Educational Technologies at the Institute (registered under No. 66). Address: 100057, Tashkent, st. Yangi olmazor, house 22. Administrative building of the Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics, conference hall. Tel./Fax: (998 71) 246-19-76.

This abstract has been sent " 12 " at 12 2024 r.



**A.T.Mamadlimov**  
Vice-chairman of Scientific Council  
on award of Scientific Degrees,  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician

**J.J. Khamdamov**  
Scientific Secretary of the Scientific Council for the award  
academic degrees, Doctor of Philosophy (PhD)

**N.A.Turgunov**  
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council  
for the award of the scientific degree of Doctor of Science,  
Doctor of Physics and Mathematics

## INTRODUCTION (Abstract of doctoral (DSc) dissertation)

**The purpose of the research work** is to identify the physical nature of single- and two-photon optical and linear photogalvanic effects induced by polarized light in two- and three-dimensional piezosemiconductors, as well as electron tunneling in two-dimensional semiconductors.

**The objects of research** are piezosemiconductors with hole conductivity, such as two-dimensional and three-dimensional gallium arsenide and tellurium, as well as multilayer asymmetric semiconductor structures.

**The subject of research** is photon kinetic processes in semiconductors that depend on the polarization state of light: single- and two-photon ballistic effects and photon-assisted effects, as well as electronic kinetic phenomena in multilayer semiconductors consisting of asymmetric potential barriers and wells.

**Research methods.** To address the research objectives, computational methods from solid-state theory and physical kinetics were employed, including the Keldysh diagram technique, transport matrix theory and density matrix, perturbation theory, Fermi's golden rule of quantum mechanics, and the Boltzmann kinetic equation.

**The scientific novelty of the research** is as follows:

for the first time, mechanisms of the ballistic linear photogalvanic effect in non-centrosymmetric semiconductors were developed, associated with sequential two-photon absorption and simultaneous two-photon absorption, as well as expressions for photocurrent related to these mechanisms were derived;

for the first time, based on the Keldysh diagram technique, mechanisms of single- and two-photon photogalvanic effects and photon-assisted effects induced by linearly polarized light in piezosemiconductors were analyzed;

spectral and temperature dependencies of the polar photocurrent, associated with the transfer of photon momentum to the electron system and the asymmetric interaction of charge carriers with photons and phonons in piezosemiconductors, were identified;

it was proven for the first time that two-photon ballistic current arises when considering the linear, quadratic, and cubic terms of the wave vector in the effective Hamiltonian of holes. Based on this, dependencies of photocurrent on the sign of band parameters, temperature, and light frequency were calculated;

conditions for the oscillation of the transparency coefficient of the potential barrier, depending on the size quantization of the electronic energy spectrum in multilayer semiconductors based on the Bastard condition, were established;

an expression for the temperature distribution by volume in a semiconductor thermoelement was determined, taking into account the cross-sectional shape and the Thomson effect.

**Implementation of the research results.** Based on the study of photonic-kinetic effects in two- and three-dimensional piezoelectric semiconductors, nonlinear absorption of polarized light in gyrotropic semiconductors, and the tunneling effect:

calculations related to photovoltaic effects were utilized in the grant titled "Electronic States and Kinetic Effects in Systems with Nontrivial Topology" for the study of dispersive optical phenomena (reference of Physical-Technical Institute of

the Russian Academy of Sciences named after A.F. Ioffe No. 04.01.09-2024 dated September 17, 2024). The use of scientific results enables the establishment of dependencies of nonlinear optical and electrical effects on the electronic structure in cubic-symmetry crystals, as well as on electron-phonon and electron-photon interactions in semiconductor low-dimensional systems;

the method proposed for diagnosing and controlling the quality of semiconductor materials based on the spectral and temperature dependencies of polarization-dependent optical and photogalvanic effects, caused by single- and two-photon absorption of polarized radiation in semiconductors without a center of inversion, was used at "Photon" JSC in the production of semiconductor electronic devices (Certificate of the joint-stock Company "Uzeltexsanoat" No. 04-3/1663 dated October 2, 2024). The use of scientific results has made it possible to enhance the functional capabilities and increase operating range of electronic devices produced by "Photon";

the results of the studies on the ballistic photogalvanic effect and the photon-assisted effect in piezosemiconductors were utilized in the project HDP(F)-2016/43 "Investigation of the Spectrum of an Infrared Light Source in the Spectral Range of 100-4500 nm" to study the low inertia of semiconductor photodiodes (reference of Uludag University Turkey No. HDP(F)-2016/43). The application of these scientific results enabled an increase in the operating speed of semiconductor photoconverters;

the theoretical analyses of the physical nature of electronic states in multilayer semiconductor structures, taking into account the different values of the effective masses of electrons in adjacent layers, were utilized in the fundamental state project F2-21 "Mathematical Modeling of the Density of Surface States at the Semiconductor-Dielectric Interface" for determining electronic states near the semiconductor surface (reference of Ministry of higher education, science and innovations of Uzbekistan No. 02/02-3112 dated October 24, 2024). The use of scientific results has expanded the opportunities for conducting research considering the size quantization effect near the surface of semiconductors.

**Approbation of research results.** The main results of the dissertation were presented and discussed at 8 international and 2 republican scientific conferences.

**Publication of research results.** The main scientific results on the topic of the dissertation were published in 31 scientific papers, of which 16 articles and 4 monographs were published in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations.

**The structure and volume of the dissertation.** The research work consists of introduction, five chapters, a conclusion. It is presented on 200 pages, including 81 figures, 39 tables and 141 references.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED SCIENTIFIC WORKS**  
**I-бўлим (I часть, part I)**

1. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Ахмедов Б.Б. Размерное квантование и нелинейные оптические явления в узкозонных кристаллах // Монография, Фергана, Типография Ферганского госуниверситета, ISBN 978-9943-9565-8-2. 2022. 134 с. (на узбекском языке).
2. Расулов В.Р. Поляризационные оптические явления в кристаллах // Монография, Фергана, Poligraf Super Servis, ISBN 978-9943-6970-7-2. 2021. 196 с. (на узбекском языке).
3. Расулов В.Р. Глава 11. Баллистический и поверхностный фотогальванические эффекты и двумерные электронные состояния в кристаллах. Инновационные процессы в науке и образовании // Монография, Пенза, МЦНС «Наука и Просвещение», ISBN 978-5-907160-83-5. 2019. 188 с.
4. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Камбаров Д. Фотогальванические эффекты в кристаллах // Монография, Saarbruken (Deutschland), LAMBERT Academic Publishing, ISBN 978-3-659-68816-4, 2015. pp.149
5. Rasulov V. R., Rasulov R. Ya., Nasirov M. Kh., Muminov I. A., Mamatova M. M. (2024). Theory of size quantization in monolayers of transition metal dichalcogenides // Physica Scripta, 99(10), 105987. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad7546> (№3 Scopus, IF=3.7)
6. Расулов В.Р., Утамурадова Ш.Б. Размерное квантование и структура электронных подзон в квантовых ямах n-GaP Физика полупроводников и микроэлектроника // Ташкент. 2024, Том 6, Выпуск 1, стр.8-15. (01.00 00, №16).
7. Utamuradova S. B., Rasulov R. Y., Rasulov V. R., Urinova K. K., Fayzullaev K. M. (2023). To the Theory of Dimensional Quantization in Narrow-Gap Crystals // East European Journal of Physics, (4), 307-310. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-4-40> (№3 Scopus, IF=1.1)
8. Расулов В.Р., Утамурадова Ш.Б. Эффект увлечения дырок фотонами в теллуре // Физика полупроводников и микроэлектроника. Ташкент. 2023, Том 5, Выпуск 3, стр.08-15 (01.00 00, №16).
9. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И.М., Кучкаров М.Х. Поляризационно-спектральные зависимости трехфотонного межзонного поглощения света и линейно-циркулярного дихроизма в кристаллах кубической симметрии // ФТП. Ст.-Петербург. 2022. Т. 56. № 10. с. 948-953 (№3 Scopus, IF=0.705).
10. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Akhmedov B.B., Muminov I.A. Interband two-photon linear-circular dichroism in semiconductors in the Kane approximation // Semiconductors. Springer. 2022. Vol. 56. No. 1. pp. 59-66 (№3 Scopus, IF=0.705).
11. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Кучкаров М.Х., Эшболтаев И.М. Межзонное многофотонное поглощение поляризованного излучения и его линейно-циркулярный дихроизм в полупроводниках в приближении Кейна // Известия ВУЗов. Физика. Томск. 2022. Т.65. № 10. с. 127-134. (№1 Web of Science, IF=0.671).
12. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Султонов Р.Р., Ахмедов Б.Б. Двух- и трехфотонный линейно-циркулярный дихроизм в полупроводниках кубической симметрии // ФТП. 2020. Т. 54. №. 11. с. 1181-1187 (№3 Scopus, IF=0.705).

13. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Мамадалиева Н.З., Султанов Р.Р. Подбарьерный и надбарьерный перенос электронов через многослойные полупроводниковые структуры // Известия ВУЗов. Физика. Томск. 2020. Т.63. № 4. с. 8-15. (№1 Web of Science, IF=0.671).
14. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Мамадалиев Н.З., Эшболтаев И.М. Электронные свойства полупроводниковой мультислойной структуры // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2019 . Т.21. № 2. с. 77 - 87 (01.00 00, №5).
15. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И.М., Мамадалиев Н.З. Ток увлечения фотонами в теллуре дырочной проводимости // Известия ВУЗов. Физика. Томск. 2019. Т.62. № 6. с. 144-150. (№1 Web of Science, IF=0.671).
16. Rasulov R. Ya., Rasulov V. R., Eshboltaev I. Linear photovoltaic effect in a semiconductor with a camel's back band structure with allowance for a coherent saturation effect // Russian Physics Journal, Germany. Springer, 2017. Т. 60. № 4. с. 723-728 (№1 Web of Science, IF=0.671).
17. Расулов В.Р., Расулов Р.Я. К теории двухфотонного линейного фотогальванического эффекта в n-GaP // ФТП. 2016. Т.50. № 2. с.145 - 147 (№3 Scopus, IF=0.705).
18. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Эшболтаев И.М. К теории баллистического линейного фотогальванического эффекта в полупроводниках симметрии тетраэдра при двухфотонном поглощении // Известия ВУЗов. Физика. Томск. 2016. Т.59. № 3. С. 114-121. (№1 Web of Science, IF=0.671).
19. Расулов В. Р. К теории прохождения электронов в полупроводниковой структуре, состоящей из чередующихся асимметричных прямоугольных потенциальных ям и барьеров // Известия высших учебных заведений. Физика. Томск. 2016. Т. 59. №. 10. С. 156-159. (№1 Web of Science, IF=0.671).
20. Rasulov V.R. Polarization-dependent photocurrent in p-GaAs // Ukr. J. Phys. Kiyev. 2016. V.61. No. 11. pp. 987-991 (01.00.00, №51).

## II бўлим (II часть, part II)

1. Расулов В. Р., Расулов Р. Я., Исомадинова У. М., Касимов Ф. Электронные состояния в многослойной кристаллической структуре в приближении Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна. Часть 2 // The 1st International scientific and practical conference "Progressive research in the modern world" (October 5-7, 2022) WoScience Publisher. - Boston, USA. 2022. pp.214-217.
2. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Муминов И.А., Эшболтаев И.М., Кучкаров М.Х. Междузонное трехфотонное поглощение в InSb / Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума «Наука и инновации-современные концепции». Москва. Инфинити. 21 мая. 2021.Том 1. С. 143-146.
3. Расулов В. Р., Расулов Р.Я., Эшболтаев И.М., Мамадалиева Н. Одноквантовый сдвиговый фототок в пьезополупроводниках // Наука России: цели и задачи. 2018. С. 25-27.
4. Rasulov V.R., R.Ya.Rasulov, D.Kambarov. The matrix elements of optical transitions in semiconductor with complex valence band at the four photonabsorption of light. / 2nd International Conference "Theoretical anApplied Sciences in the USA ". Section 8. Physics. New York, USA. February 5, 2015. pp.190-194.photon



5. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Kambarov D., Karimova G. Dimensionally quantization of electrons in a semiconductor with a composite conduction band / 8<sup>th</sup> Conference “Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings”. New York, USA. August 30, 2014. P.93-97.
6. Расулов Р.Я., Ахмедов Б.Б., Кучкаров М.Х., Расулов В.Р., Маматова М.А. К теории эффекта увличения фотонами в кристаллической размерно-квантованной структуре / Материалы III Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в кристаллических микро-и наноструктурах. Фергана. 14-15 ноября. 2014. с. 116-119.
7. Расулов Р.Я., Расулов В.Р., Камбаров Д.Х., Рахматуллаев Х.Х., Каримова Г.О. К теории двухфотонного поглощения света в n-GaP / Современное состояние естественных и технических наук. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Москва, 2014. с. 13-16.
8. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Камбаров Д., Каримова Г.О. О многофотонном фототоке в полупроводниках без центра симметрии / Материалы VIII международного симпозиума. Фундаментальные и прикладные науки.Т.1. Москва. 2013. с.124-134
9. Расулов В.Р. О фотонном механизме линейного фотогальванического эффекта в полупроводниках арсениде галлия дырочной проводимости / 11<sup>th</sup> International scientific conference. European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches Stuttgart 2014. с. 80-84.
- 10.Расулов В. Р. Линейный фотогальванический эффект в горбообразных полупроводниках с учетом эффекта Раби // Естественные и технические науки. 2009. №. 3. С. 45-46.
- 11.Мамадалиев Б., Расулов В.Р., Расулов Р.Я. Рахимов М.С. Кинетические уравнения для гальваномагнитных эффектов в наноструктуре полупроводника с вырожденными валентными зонами // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. 2007. №. 2. С. 25.



Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди (12.12.2024 йил).

Бичим 60x841/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи: 4,25. Адади 70. Буюртма № 60

Гувоҳнома reester № 10-4434

Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти  
босмаҳонасида chop этилган.

Босмаҳона манзили: 100057, Тошкент ш., Янгиолмазор кўчаси 20-уй

