

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI

MATBOBOYEVA SAIDAXON DILMUROD QIZI

**NANO KREMNIYLI FOTOELEKTRIK O'ZGARTIRGICHLARNING
ELEKTROFIZIK XOSSALARINI TADQIQ QILISH**

01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi

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

Namangan-2025

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on physical-
mathematical sciences**

Matboboyeva Saidaxon Dilmurod qizi

Nano kremniyli fotoelektrik o'zgartirgichlarning elektrofizik xossalarini
tadqiq qilish 3

Матбобоева Саидахон Дилмурод кизи

Исследование электрофизических свойств нанокремниевых
фотоэлектрических преобразователей..... 27

Matboboyeva Saidakhon Dilmurod qizi

Investigation of electrophysical properties of nanosilicon photovoltaic
converters..... 51

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 55

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI

MATBOBOYEVA SAIDAXON DILMUROD QIZI

**NANO KREMNIYLI FOTOELEKTRIK O'ZGARTIRGICHLARNING ELEKTROFIZIK
XOSSALARINI TADQIQ QILISH**

01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi

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

Namangan-2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM987 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Andijon davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uchta tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume) Ilmiy kengashning veb-sahifasiga (www.namdtu.uz) va «ZiyoNet» axborot-ta'lim portaliga (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Nosirov Murodjon Zakirovich

fizika-matematika fanlari nomzodi, professor

Rasmiy opponentlar:

Onarqulov Karimberdi Egamberdiyevich

fizika-matematika fanlari doktori, professor.

Atamuratov Atabek Egamberdiyevich,

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Qarshi davlat universiteti.

Dissertatsiya himoyasi Namangan davlat texnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil 24.10. soat 9⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: info@namdtu.uz, Namangan davlat texnika universiteti 6-bino, 1-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (_____ raqam bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 160115, Namangan shahri, I.Karimov ko'chasi, 12-uy. Tel: (99869) 225-10-07.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil 9- oktabrda tarqatildi.

(2025 yil 9-oktabrdagi № 5 raqamli ryestr bayonnomasi.)

U.I. Erkaboyev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
raisi, f.-m.f.d., professor

A.A. Abdulkarimov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
ilmiy kotibi, PhD, dotsent

N.Yu.Sharibayev

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda energiya sarfining tobora ortib borishi va atrof muhitning ifloslanishishi bilan bog'liq muammolarning oldini olish uchun qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Hisob-kitoblarga ko'ra, XXI asrda quyosh energetikasini rivojlantirish barcha muqobil manbalar orasida asosiy bo'lib qoladi va 2050 yilga borib quyosh energiyasi global energiya ishlab chiqarishning 20-25% ni tashkil etadi. Quyosh energiyasidan foydalanishning sezilarli o'sish sur'atlariga qaramay, hozirgi vaqtda fotovoltaikaga asoslanib ishlab chiqarilgan elektr energiyasi ulushi boshqa energiya manbalariga nisbatan kichikdir, chunki ularning tannarxi yuqorilidir. Fotovoltaika an'anaviy energiya manbalari bilan raqobatlashishi uchun u ishlab chiqaradigan elektr energiyasining narxi taxminan 5-10 baravar kamayishi kerak. Buning uchun fotoelektrik o'zgartirgichlarning samarali, arzon texnologiyalari va konstruksiyalarini ishlab chiqish zarur. Shu jihatdan yangi istiqbolli mono va polikristall kremniyli ko'p qatlamli nanostrukturalardan foydalanishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda zamonaviy nanoelektronika asboblari va fotoelektrik qurilmalarning xususiyatlarini yaxshilash, ularning yuqori samaradorlikka ega bo'lishlarini ta'minlashga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada eng so'nggi fan va texnologiya yutuqlaridan oqilona foydalangan holda ko'p qatlamli nanostrukturalarning xususiyatlarini yaxshilashga qaratilgan maqsadli ilmiy tadqiqotlar olib borish, mavjud mikroelektronika asboblarining funksional imkoniyatlarini iste'molchilarning ehtiyojlariga moslab takomillashtirish, ko'p qatlamli strukturalarning optik xususiyatlari va sezgirligini yanada yaxshilash, ularning hajmida yutiluvchi fotonlar energetik spektrini kengaytirish, ular asosida yaratilgan fotoelektrik o'zgartirgichlarning samaradorligini oshirish uchun zaryad tashuvchilarning ko'p qatlamli nanostrukturalardan o'tishi, qaytishi va ularda bo'lish ehtimolliklarini modellashtirish orqali nazariy tadqiq etish, nanozarralarning kremniy hajmida kechadigan optik yutilishi va zaryad tashuvchilarning generatsiya-rekombinatsiya jarayonlarilarning fizik mexanizmlarini aniqlashga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda ilm-fanni rivojlantirishga, jumladan, yarimo'tkazgichli ko'p qatlamli kvant nanostrukturalar asosidagi fotoelektrik o'zgartirgichlarning samaradorligini oshirish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida "Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish"¹ bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, turli yarimo'tkazgichli asboblari va ko'p qatlamli nanostrukturalar asosidagi fotoelektrik o'zgartirgichlarda yorug'likning yutilishi, nomuvozanatli zaryad

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 28.01.2022 yildag PF-60-son Farmoni.

tashuvchilar generatsiyasi va rekombinatsiyasi, *p-n*-o‘tish sohasida zaryad ko‘chish jarayonlarining fizik mexanizmlarini raqamli modellashtirishga tayangan nazariy hisoblashlar orqali tadqiq etish muhim ahamiyatga kasb etmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni, 2020-yil 10-iyuldagi PQ-4779-son “Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg‘i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi², 2021-yil 9-apreldagi PQ-5063-son “O‘zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi va vodorod energetikasini rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi³, 2024-yil 14-iyundagi PQ-222-sonli “Energiya resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi⁴, 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-sonli “Fizika sohasidagi ta‘lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi⁵ qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustivor yo‘nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustivor yo‘nalishlariga, xususan, “III. Qayta tiklanuvchi energiyalarni rivojlantirish” - amaliy tadqiqotlar davlat dasturi doirasidagi: PPI-3, “Energetika, energiya va resurs tejamlorligi, transpopt, mashina va asboblilar qurilishi, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, elektron asboblilar qurilishini rivojlantirish” dasturlariga mos keladi.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Yorug‘lik energiyasini elektr energiyasiga aylantirishda zamonaviy ko‘p qatlamli nanostrukturalar asosidagi fotoelektrik o‘zgartirgichlarda kechadigan fizik jarayonlarni tadqiq etish bilan E.L.Weber, S.L.Mayer, E.L.Nolle, M.McCann, T.Song shug‘ullanishgan. Yarimo‘tkazgichli ko‘p qatlamli nanostrukturalar va nanozararacha kiritilgan kremniy asosli fotoelektrik o‘zgartirgichlarni tadqiq etish va samaradorligini oshirish bo‘yicha V.V.Klimov, A.Shuka, V.Ya.Demixovskiy, G.A.Vugalter va boshqalar tomonidan tadqiqot ishlari olib borilgan. Zamonaviy quyosh elementlarining yangi konstruksiyalari va ularni modellashtirish bo‘yicha tadqiqotlar J.I.Alferov, V.A.Milichko, M.A.Green, F.Kushning va boshqalar tomonidan o‘tkazilgan.

Respublikamizda fotoelektrik o‘zgartirgichlar yaratish va ularning samaradorligini oshirish bo‘yicha o‘ziga xos yangi texnik va texnologik yechimlar topish bo‘yicha tadqiqotlar akademiklar M.S.Saidov, R.A.Mo‘minov, M.S.Baxodirxonov, S.Zaynobidinov; professorlar R.Ya.Rasulov, E.Z.Imamov, G.Gulyamov, K.Ismailov, R.Aliev va boshqalar tomonidan bajarilgan.

² O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 10.07.2020 yildagi PQ-4779-son Qarori.

³ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 09.04.2021 yildagi PQ-5063-son Qarori.

⁴ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 14.06.2024 yildagi PQ-222-son Qarori.

⁵ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 19.03.2021 yildagi PQ-5032-son Qarori.

Mazkur tadqiqotlar natijasida nano kremniyli uch, to'rt va undan ortiq qatlamli strukturalarda elektronlarning qatlamlardan o'tishi, qaytishi va ularda bo'lish ehtimolliklarining qatlamlar soni, potensial baryerlar kengligi va balandligi hamda tashqi ta'sirlarga bog'liqligini nazariy tadqiq qilish, real quyosh elementlariga nanozarralar ta'siri va ularning parametrlarini aniqlash usullarini takomillashtirish bo'yicha tadqiqotlar yetarlicha o'tkazilmagan.

Disertatsiya tadqiqotning disertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi Andijon davlat universiteti Kondensirlangan muhitlar fizikasi kafedrasining "Injeksion asboblar va quyosh elementlari uchun ko'p qatlamli va polikristal strukturali yarimo'tkazgichlar olish va ularning elektrofizik xususiyatlarini o'rganish" mavzusidagi ilmiy tadqiqot rejalari hamda A-4-12 "Nanoplazmonika effekti va uning yordamida kremniyli p-n-strukturalarda fotoelektrik energiya olish samaradorligini oshirish" (2015-2017 yy., ilmiy rahbar prof. R.Aliev) va OT-F2-68 "Kristallarda kirishma-nuqsonli mikro va nanobirikmalar hosil bo'lish mexanizmlari va ularning keng imkoniyatli ko'p qatlamli strukturalar yaratishdagi roli" (2017-2021 yy., ilmiy rahbar akad. S.Zaynobiddinov) mavzularida bajarilgan davlat ilmiy texnika loyihalari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi kvant fizikasi qonuniyatlariga tayangan holda zaryad tashuvchilarning ko'p qatlamli nanostrukturalardagi xususiyatlarini raqamli modellashtirish asosida tadqiq qilish orqali fotoelektrik o'zgartirgichlarning samardorligini yaxshilash shartlarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

zaryad tashuvchilarning ko'p qatlamli nanostrukturalardagi harakatini tadqiq qilish;

zaryad tashuvchilarning ko'p qatlamli nanostrukturalardagi harakatiga elektr maydonining ta'sirini tadqiq qilish;

real quyosh elementlarining asosiy parametrlarini aniqlash usullarini takomillashtirish;

real quyosh elementlariga nanozarralar ta'sirini tadqiq qilish.

Tadqiqotning ob'ekti sifatida raqamli texnologiya asosida modellashtirilgan elektronning ko'p qatlamli nanostrukturalardagi harakati olingan.

Tadqiqotning predmeti raqamli texnologiya asosida modellashtirilgan elektronning ko'p qatlamli nanostrukturalardagi harakatiga strukturalar parametrlari va tashqi ta'sirlar hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida kvant mexanikasining matematik apparati, Shredinger tenglamasini yechishning analitik va sonli usullari, "Eng kichik kvadratlar" usuli, transsendent tenglamalarni yechish usullari, "Sentaurus TCAD" raqamli modellashtirish texnologiyalari hamda mavjud meyoriy hujjatlarda belgilangan usullardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ko'p qatlamli nanostrukturalarda elektronlarning baryerlardan o'tish koeffitsientida qatlamlar chegaralaridan o'tgan va qaytgan de Broyl to'lqinlarining interferensiyasi natijasida kvazi bog'langan holatlar yuzaga kelishi tufayli o'tish koeffitsientida qo'shimcha maksimum va minimumlar yuzaga kelishi aniqlangan;

ilk bora elektronlarning kremniyli to'rt qatlamli nanostrukturalardagi harakatini raqamli modellashtirish asosida tahlil qilish natijasida elektr maydoni to'rtinchi qatlamga qo'yilganda eng katta samaradorlikka erishilishi, elektronlar energiyasi baryer balandligidan kam bo'lsa ham elektr maydoni ta'sirida baryerlardan o'ta olishi hamda elektronlarning baryerlardan o'tish koeffitsienti va tok zichligining elektr maydoniga bog'liqligi ossilyatsion xarakterga ega ekanligi aniqlangan;

real quyosh elementlarining xususiyatlarini kuzatish tizimini yaratish hamda VAX tenglamasi va uning hosilasining qisqa tutashuv toki va salt ishlash kuchlanishi nuqtalaridagi qiymatlaridan foydalanilib trassendent tenglamani yechish orqali ularning parametrlarini aniqlash usullarini takomillashtirishga imkon beruvchi yangi usul ishlab chiqilgan;

p-tipli kremniy asosidagi fotoelektrik o'zgartirgichlarga sferik nanozarralar joylashtirilib, keng diapazonli quyosh spektri bilan nurlantirilganda lokallashtirilgan plazmon rezonansi yuzaga kelishi va nanozarralar ichidagi elektr maydonining keskin ortishi hisobiga yaxlit metalga nisbatan bir necha marta yuqori fotoemission tok hosil bo'lishi, nanozarra materiali sifatida nafaqat qimmatbaho oltin va kumush, balki misdan ham foydalanish mumkinligi, bunda samaradorlik 2% gacha ortishi ko'rsatilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

elektronlarning ko'p qatlamli nanostrukturalardagi, xususan, 2, 3 va 4 qatlamli strukturalardagi harakatini kompyuterda modellashtirish uchun EHM dasturiy mahsulotlari ishlab chiqilgan;

ishlab chiqilgan dasturiy mahsulotlar nanokremniyli to'rt qatlamli strukturalarga qo'llanilganda elektronlarning baryerlardan o'tish va qaytish koeffitsientlarida qo'shimcha maksimumlar paydo bo'lishi hamda elektr maydoni to'rtinchi qatlamga qo'yilganda eng katta samaradorlikka erishilishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi izlanishlarning kvant mexanikasining matematik apparati va modellashtirishning zamonaviy raqamli usullaridan foydalanilgan holda o'tkazilganligi, nazariy va eksperimental tadqiqotlarning o'zaro adekvatligi hamda o'lchash natijalarini qayta ishlashning umum qabul qilingan usullardan foydalanilgan holda bajarilganligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati elektronlarning kremniyli ko'p qatlamli nanostrukturalardagi fizik xususiyatlari haqida yangi bilimlar olishga imkon berishi hamda olingan matematik modellar va analitik bog'lanishlar boshqa shunga o'xshash ko'p qatlamli nanostrukturalarni tadqiq etishda qo'llash mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati yaratilgan EHM dasturiy mahsulotlari va metal nanozarralar dielektrik funksiyalarining yorug'likning to'lqin uzunligiga bog'liqligi bo'yicha olingan natijalar yarimo'tkazgichlar asosida tayyorlanadigan yangi ko'p qatlamli va optoelektronik qurilmalarni yaratishda, shu jumladan quyosh fotoelektrik o'zgartirgichlari, fotodetektorlar, fotokatalizatorlar, datchiklar, nano o'lchamli LEDlarni takomillashtirishda qo'llanilishi mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Ko‘p qatlamli nanostrukturalar va nanozarralar kiritilgan kremniyning asosiy elektrofizik xususiyatlarini raqamli modellashtirish bo‘yicha olingan natijalar asosida:

zaryad tashuvchilarning nano kremniyli ko‘p qatlamli strukturalardagi harakatini raqamli modellashtirish asosida olingan ilmiy natijalar “Foton” AJ da joriy qilingan (AJning 2025 yil 14 apreldagi № 58 raqamli ma’lumotnomasi). Natijada yarimo‘tkazgichli yangi ko‘p qatlamli va optoelektronik qurilmalarni, shu jumladan quyosh fotoelektrik o‘zgartirgichlari, fotodetektorlar, fotokatalizatorlar, datchiklar, nano o‘lchamli LEDlarni takomillashtirishda va ularning samaradorligini oshirishda yanada keng miqyosda foydalanish tavsiya etilgan.

Oltin, kumush va mis nanozarralarining fotoelektrik o‘zgartirgichlarga ta’siri bo‘yicha olingan ilmiy natijalar O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Materialshunoslik institutida 2021-2023 yillarga mo‘ljallangan FZ-201906066 "Noyob yer metallari asosida qattiq oksidli yoqilgi elementlarini olish texnologiyasini ishlab chiqish" mavzusidagi ilmiy amaliy loyihani bajarishda joriy etilgan (O‘z FA Materialshunoslik institutining 2025 yil 25 yanvardagi № 19 ma’lumotnomasi). Natijada mis nanozarrasi kiritilgan kremniyning fotoelektrik xususiyatlari oltin va kumush nanozarralari kiritilgan kremniyning fotoelektrik xususiyatlariga nisbatan samaraliroq ekanligi ko‘rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 12 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 36 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan 1 ta monografiya, O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta maqola, jumladan, 3 tasi Scopusda indeksiyalanadigan jurnallarda nashr etilgan. Dissertatsiya ishi mavzusining natijasi sifatida 6 ta EHM dasturiy maxsulotlarining mualliflik guvohnomalari olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rtta bob, umumiy xulosalar, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yhati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 118 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida mavzuning dolzarbliligi asoslangan, muammoning o‘rganilganlik darajasi bayon qilingan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqotning predmeti, ob‘yekt va metodlari tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari ko‘rsatilgan hamda natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati izohlangan.

Dissertatsiyaning **“Zamonaviy fotoelektrik o‘zgartirgichlarning elektrofizik xossalari o‘rganish bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar”** deb nomlangan birinchi bobida fotoelektrik qurilmalarning samaradorligini oshirish bo‘yicha olib borilayotgan tadqiqotlar, fotoelektrik o‘zgartirgichlarning ishlash prinsipi va yaratilish bosqichi bo‘yicha turlari, tuzilishi, asosiy parametrlari, ularning afzalliklari va kamchiliklari, kichik o‘lchamli tuzilmalarni hosil qilish usullari, molekulyar nurli epitaksiya usuli, gaz epitaksiyasi, nanostrukturalar olishning nanolitografiya usuli, metalloorganika

usullari, bir va nol o‘lchovli tuzilmalarni olishning submikron litografiya usuli, integral mikrosxemalar ishlab chiqarishning fotolitografiya usuli, elektron nurli litografiya, nanotuzilmalarning o‘z-o‘zidan shakllanishi haqida batafsil ma’lumotlar berilgan.

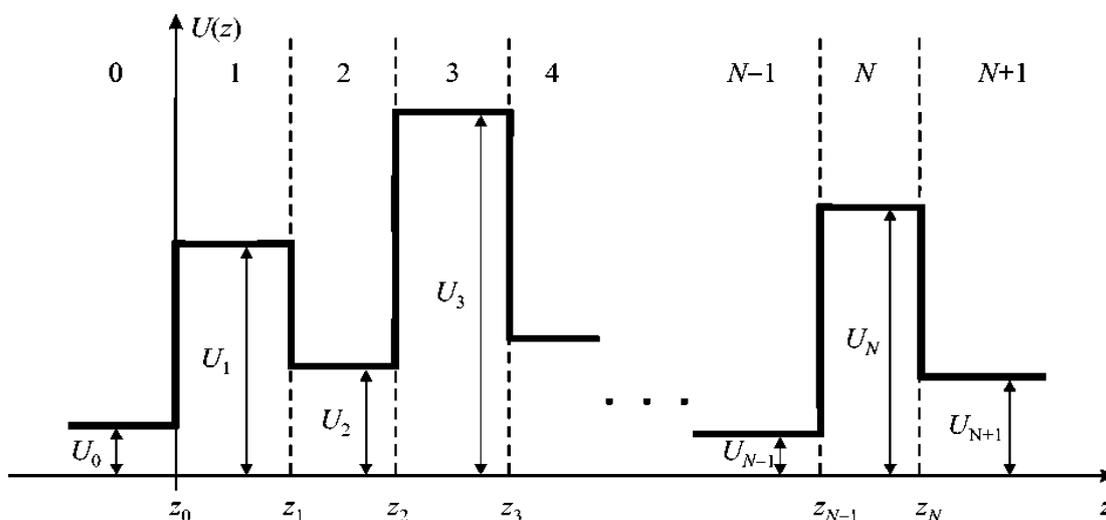
Dissertatsiyaning “**Elektronning ko‘p qatlamli kvant nanostrukturalardagi harakati**” deb nomlangan ikkinchi bobida elektronning bir o‘lchovli kvant o‘radagi harakati, bir o‘lchovli potensial baryerdan o‘tishi va ko‘p qatlamli kvant nanostrukturalardan o‘tishi ko‘rib chiqiladi.

Ko‘p qatlamli strukturalardagi elektron harakatiga oid masalalarni yechishda har bir qatlam uchun Shredinger tenglamasining yechimi tushuvchi va qaytuvchi de Broyl to‘lqinlarining yig‘indisi sifatida yoziladi va bu to‘lqinlar amplitudalarini aniqlash uchun qatlamlar orasidagi chegaraviy shartlardan foydalaniladi.

Yarim cheksiz soxalar orasida joylashgan N qatlamdan tashkil topgan nanostrukturani ko‘rib chiqamiz, bunda har bir qatlamdagi potentsiallarni o‘zgarmas deb faraz qilinadi (1-rasm):

$$U(z) = \begin{cases} U_0, z < z_0, \\ U_k, z_{k-1} < z < z_k \\ U_{N+1}, z > z_N \end{cases} \quad (1)$$

bu yerda z_k - k - va $k+1$ -qatlamlar chegarasi koordinatalari, $k = 1, \dots, N$.



1-rasm. Ko‘p qatlamli kvant nanostrukturalarda yuzaga keladigan potensial baryerlar.

Elektronlar manbai 0-soxada va strukturadan cheksiz uzoqda joylashgan va E energiyali elektron manbadan Oz o‘qi bo‘ylab musbat yo‘nalishda harakatlanmoqda deb faraz qilamiz.

k -soxadagi Shredinger tenglamasining yechimi

$$\psi_k = A_k e^{i\gamma_k z} + B_k e^{-i\gamma_k z} \quad (2)$$

ko‘rinishda yoziladi, bu yerda A_k va B_k - k -tushayotgan va qaytayotgan de Broyl to‘lqinining amplitudalari,

$$\gamma_k(E) = \frac{\sqrt{2m_k(E - U_k)}}{\hbar}, \quad (3)$$

$m_k - k$ -soxadagi elektronning effektiv massasi.

Bunday strukturalar uchun chegaraviy shartlar

$$\begin{cases} \psi_k(z_k) = \psi_{k+1}(z_{k+1}), \\ \frac{1}{m_k} \frac{\partial \psi_k}{\partial z}(z_k) = \frac{1}{m_{k+1}} \frac{\partial \psi_{k+1}}{\partial z}(z_{k+1}) \end{cases} \quad (4)$$

ko'rinishda yoziladi.

(2) umumiy yechimni (4) chegaraviy shartlarga qo'yib, A_k , B_k koeffitsiyentlar uchun algebraik tenglamalar sistemasini olamiz:

$$\begin{cases} A_k e^{i\gamma_k z_k} + B_k e^{-i\gamma_k z_k} = A_{k+1} e^{i\gamma_{k+1} z_k} + B_{k+1} e^{-i\gamma_{k+1} z_k}, \\ iA_k \frac{\gamma_k}{m_k} e^{i\gamma_k z_k} - iB_k \frac{\gamma_k}{m_k} e^{-i\gamma_k z_k} = iA_{k+1} \frac{\gamma_{k+1}}{m_{k+1}} e^{i\gamma_{k+1} z_k} - iB_{k+1} \frac{\gamma_{k+1}}{m_{k+1}} e^{-i\gamma_{k+1} z_k} \end{cases} \quad (5)$$

Bu sistemani algebraik almashtirishlar orqali

$$\begin{cases} A_{k+1} = \frac{A_k}{2} \left(1 + \frac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1} m_k} \right) e^{-i(\gamma_{k+1} - \gamma_k) z_k} + \frac{B_k}{2} \left(1 - \frac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1} m_k} \right) e^{-i(\gamma_{k+1} + \gamma_k) z_k}, \\ B_{k+1} = \frac{A_k}{2} \left(1 - \frac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1} m_k} \right) e^{i(\gamma_{k+1} + \gamma_k) z_k} + \frac{B_k}{2} \left(1 + \frac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1} m_k} \right) e^{i(\gamma_{k+1} - \gamma_k) z_k} \end{cases} \quad (6)$$

ko'rinishga keltirish mumkin. Elektron to'liqining o'tish va qaytish koeffitsiyentlari A_k , B_k koeffitsiyentlar orqali quyidagicha ifodalanadi:

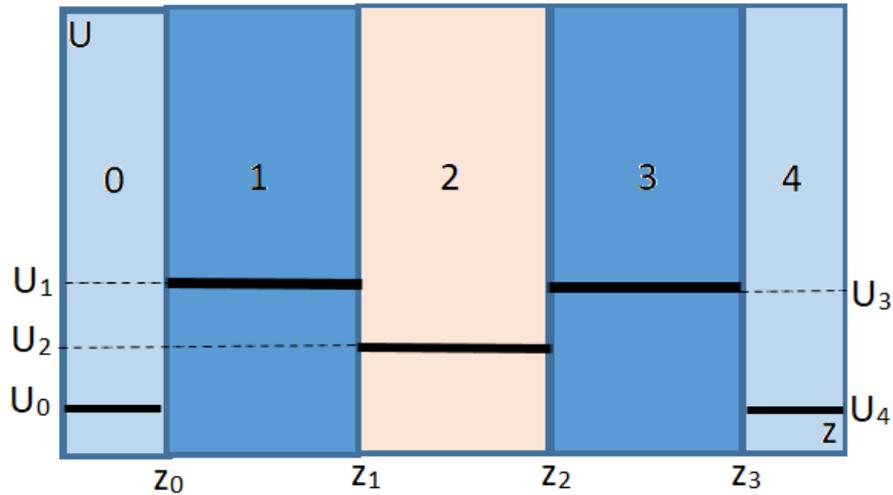
$$D = \frac{m_0}{m_{N+1}} \frac{|\gamma_{N+1}| |A_{N+1}|^2}{|\gamma_0| |A_0|^2} \quad (7)$$

$$R = \frac{|B_0|^2}{|A_0|^2} \quad (8)$$

N qatlamli (baryerli) strukturani ko'rib chiqish uchun ular atrofidagi ikki soxani hisobga olgan holda $N+2$ soxaning parametrlari va ular orasidagi chegaralar koordinatalarini bilish kerak bo'ladi. Masalan, 3 qatlamli baryerni o'rganish uchun 5 ta soxaning parametrlari va ular orasidagi 4 ta chegaralar koordinatalarini bilish kerak bo'ladi. Bu ma'lumotlar har bir soxadan o'tish va qaytish koeffitsiyentlarini, shuningdek, har bir soxadagi de Broyl to'liqini amplitudalarini aniqlashga imkon beradi.

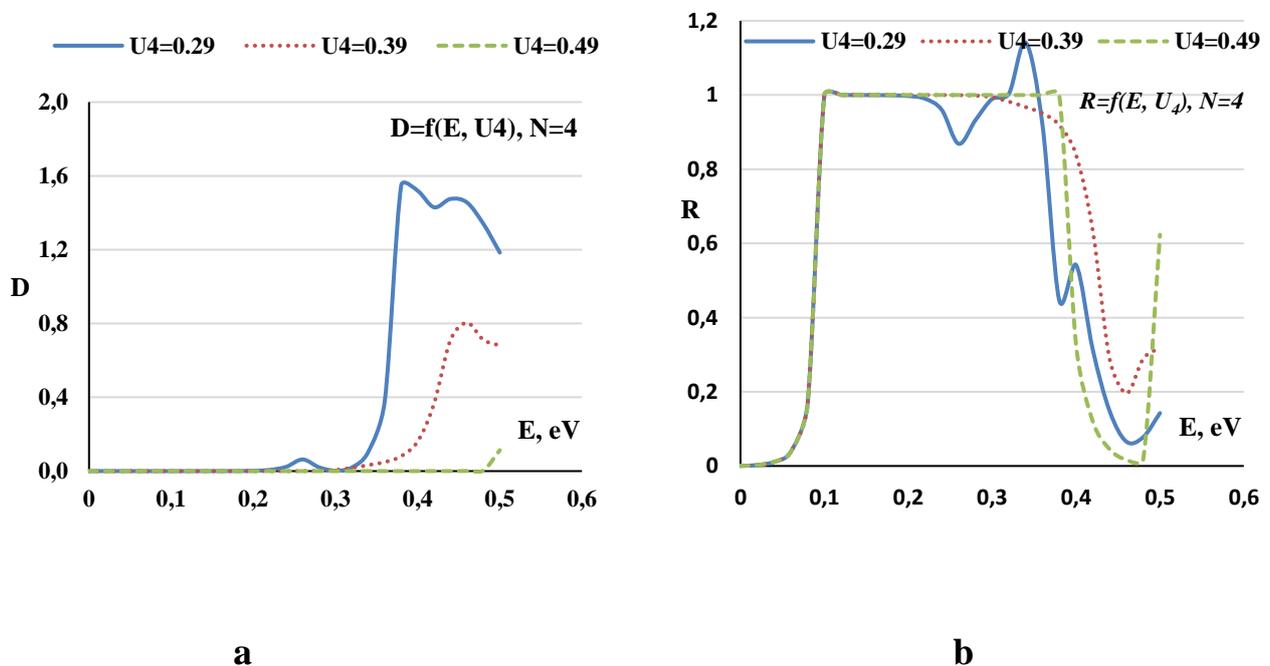
Yuqorida ko'rib o'tilgan ko'p qatlamli kvant strukturalardagi (2-rasmda uch qatlamli kvant struktura tasvirlangan) fizik jarayonlarni kompyuterda modellashtirish

uchun Visual Basicda dastur tuzildi, bunda $m_0 = m_4 = 0.05$ eV, $m_1 = m_2 = m_3 = 0.1$ eV, $U_0 = 0.09$ eV, $U_1 = 0.19$ eV, $U_2 = 0.29$ eV, $U_3 = 0.39$ eV, $U_4 = 0.09$ eV, $z_0 = 0$, $z_1 = 2$ nm, $z_2 = 4$ nm, $z_3 = 6$ nm.



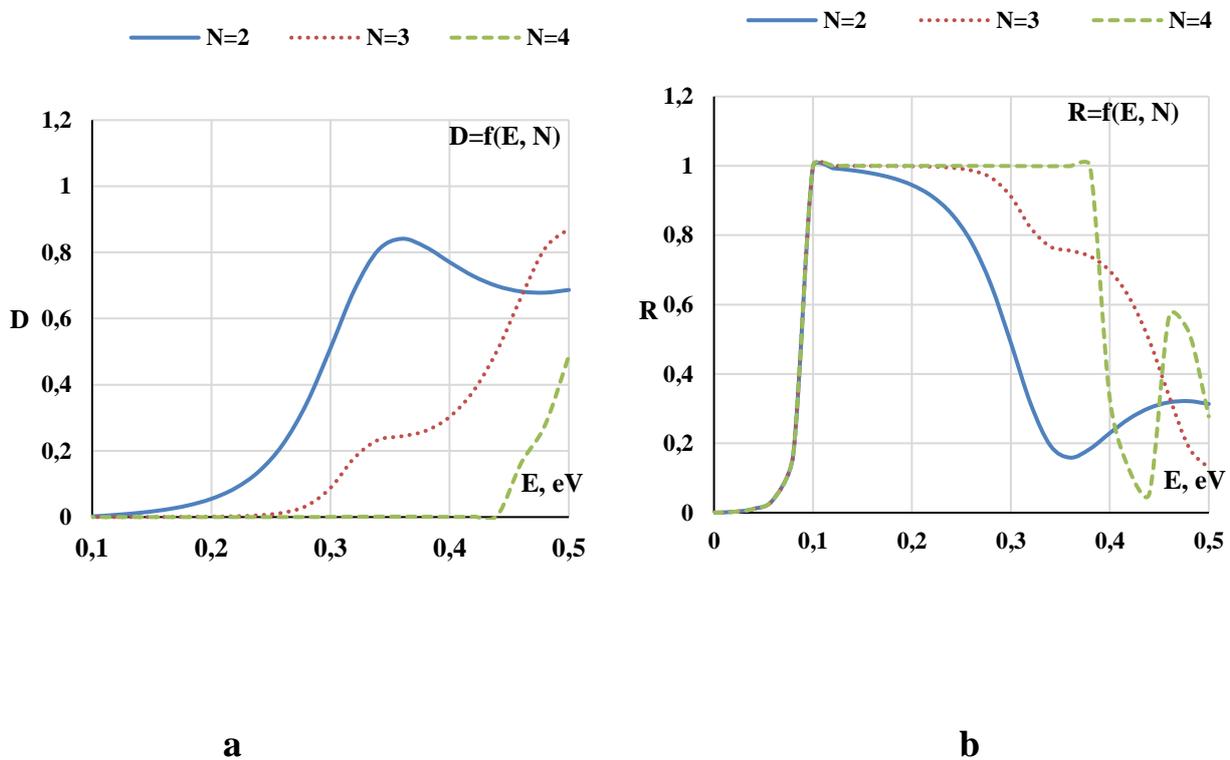
2-rasm. Uch qatlamli nanostruktura

Dastur qatlamlar soni, har bir qatlamdagi elektronning effektiv massasi, qatlam uchun potensial baryerning balandligi va kengligini kiritib, elektronlarning baryerlardan o'tish va qaytish koeffitsientlarini hamda ularning qatlamlarda bo'lish ehtimolliklarini hisoblashga imkon beradi. Hisoblash natijalari quyidagi rasmlarda keltirilgan.



3-rasm. To'rt qatlamli strukturalarda 4-qatlam potensial baryeri balandligining turli qiymatlarida elektronlarning baryerlardan o'tish va qaytish koeffitsientlarining energiyaga bog'liqligi ($d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = 2$ nm, $U_1 = 0.19$ eV, $U_2 = 0.29$ eV, $U_3 = 0.39$ eV).

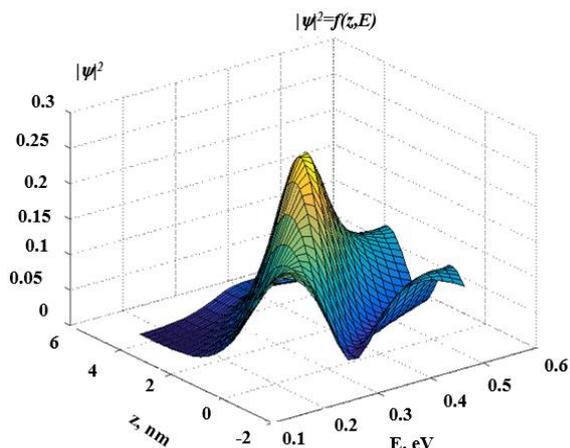
To'rt qatlamli strukturalarda o'tish va qaytish ko'effitsientlarining qatlamlar potensial baryerlari balandligiga bog'liqligi ko'rsatilgan rasmlardan ko'rinib turibdiki, 4-qatlam potensial baryeri balandligi $U_4=0.29$ eV bo'lganda $E\sim 0.26$ eV va $E\sim 0.38$ eV energiyali elektronlarning o'tish ko'effitsientida qo'shimcha maksimum, $E\sim 0.46$ eV energiyali elektronning o'tish ko'effitsientida esa qo'shimcha minimum paydo bo'ladi. Xuddi shuningdek, qaytish ko'effitsientida $E\sim 0.26$ eV va $E\sim 0.38$ eV energiyali elektronlarda minimum, $E\sim 0.38$ eV energiyali elektronlarda maksimum kuzatiladi. Potensial baryeri balandligi $U_4=0.39$ eV bo'lganda $E\sim 0.46$ eV energiyali elektronlarning o'tish ko'effitsientida qo'shimcha maksimum, qaytish ko'effitsientida esa qo'shimcha minimum kuzatiladi.



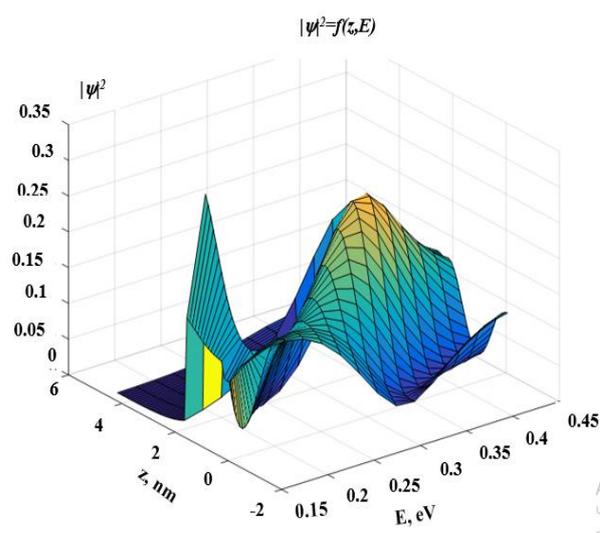
4-rasm. Ikki, uch va to'rt qatlamli strukturalarda elektronlarning baryerlardan o'tish va qaytish ko'effitsientlarining energiyaga bog'liqligi .

4-a,b-rasmlarda ikki, uch va to'rt qatlamli strukturalarda elektronlarning baryerlardan o'tish va qaytish ko'effitsientlarining energiyaga bog'liqligi keltirilgan ($d_1=d_2=d_3=d_4=2$ nm, $U_1=0.19$ eV, $U_2=0.29$ eV, $U_3=0.39$ eV, $U_4=0.49$ eV). Grafiklardan ko'rinib turibdiki, elektron energiyasi 0 dan 0.46 eVgacha o'zgarganda ikki qatlamli strukturadan o'tish ko'effitsienti yuqori bo'ladi, undan keyin esa uch qatlamli strukturalardan o'tish ko'effisienti katta bo'ladi. 5-b-rasmdan barcha qatlamli strukturalar uchun elektron energiyasi 0 dan 0.12 eV gacha oshganda bir xil o'zgarishini ko'rish mumkin. Elektron energiyasi 0.12 eVdan 0.4 eVgacha o'zgarganda to'rt qatlamli strukturada qaytish ko'effitsienti eng yuqori bo'ladi, undan keyin esa trigonometrik qonuniyat asosida kamayib boradi.

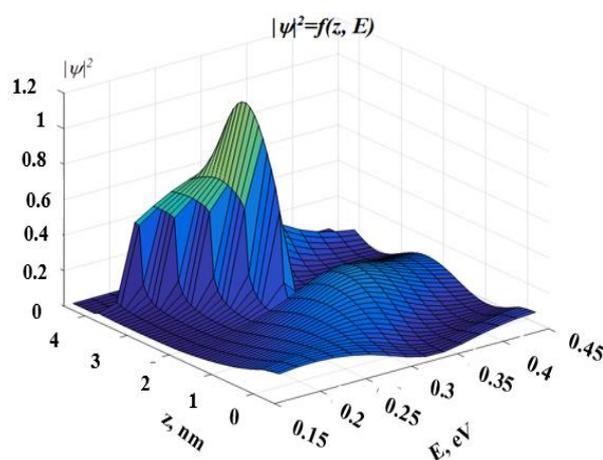
a



b



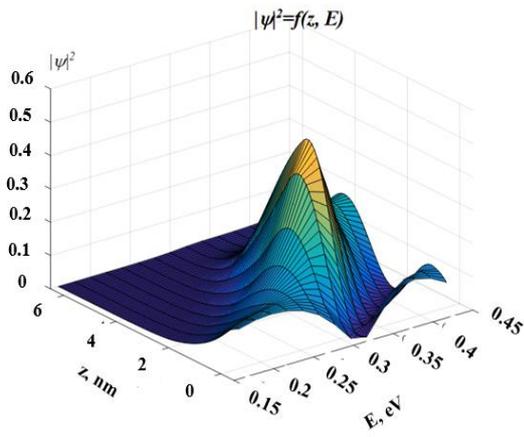
v



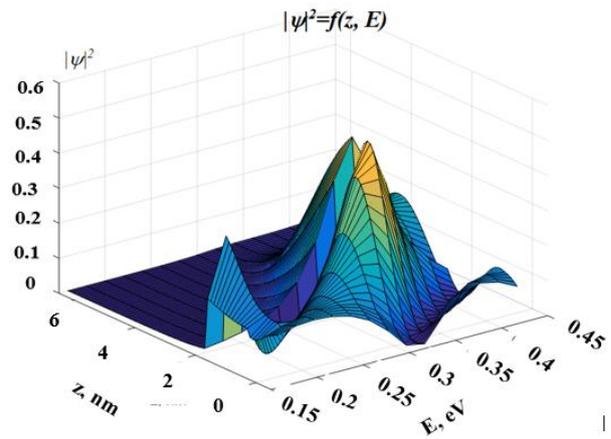
5-rasm. Ikki qatlamli strukturalarda ($U_1=0.19$ eV, $U_2=0.29$ eV) elektr maydoni qo'yilmaganda (a), 1-qatlamga (b) va 2-qatlamga (v) $U_E=0.1$ eV elektr maydoni qo'yilganda elektronning turli energiya qiymatlarida $|\psi|^2$ ning koordinataga bog'liqligi keltirilgan.

5-a-b-v-rasmlarda ikki qatlamli strukturalarda elektr maydoni qo'yilmaganda hamda birinchi va ikkinchi qatlamlarga $U_E=0.1$ eV elektr maydoni qo'yilganda turli energiyalarga ega bo'lgan elektronlarning topilish ehtimolligining koordinataga bog'liqligi keltirilgan. Rasmlardan ko'rinib turibdiki, elektr maydoni qo'yilmaganda $E=0.32$ eV energiyali elektronning ~ 1.5 nm atrofida topilish ehtimolligi eng katta bo'ladi, barcha elektronlar baryerlardan o'ta oladi. 1-qatlamga elektr maydoni qo'yilganda $E=0.32$ eV energiyali elektronning ~ 1.9 nm atrofida topilish ehtimolligida qo'shimcha maksimumlar kuzatiladi. 2-qatlamga elektr maydoni qo'yilganda esa $E=0.22-0.28$ eV energiyali elektronlarning ~ 3.0 nm atrofida topilish ehtimolliklari keskin ortadi. Barcha elektronlar baryerlardan o'ta oladi. Natijalar ikki qatlamli strukturalarda elektr maydonini 2-qatlamga qo'yish maqsadga muvofiq ekanligini ko'rsatmoqda.

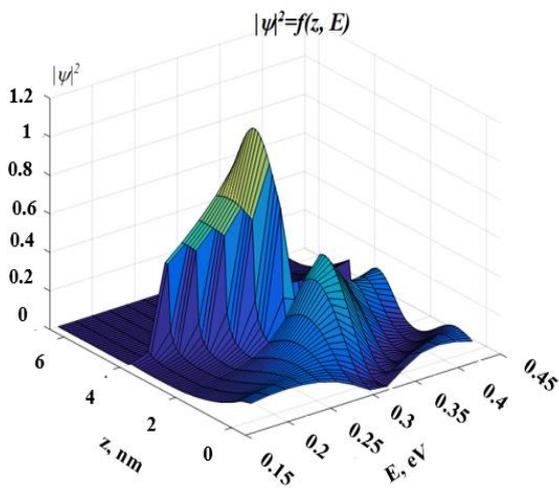
a



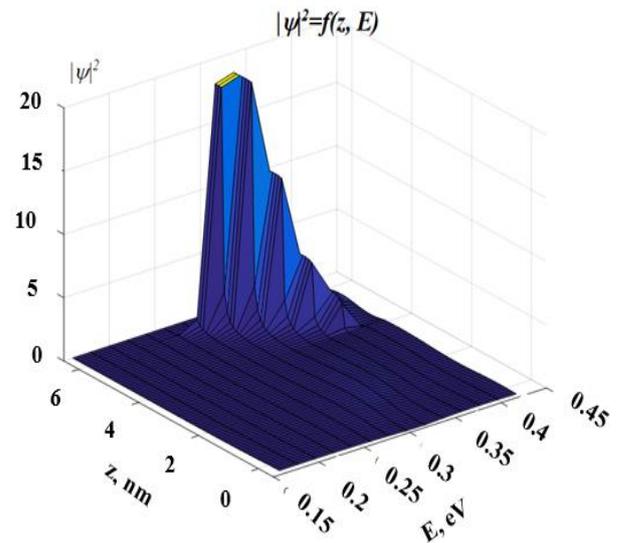
b



v



g



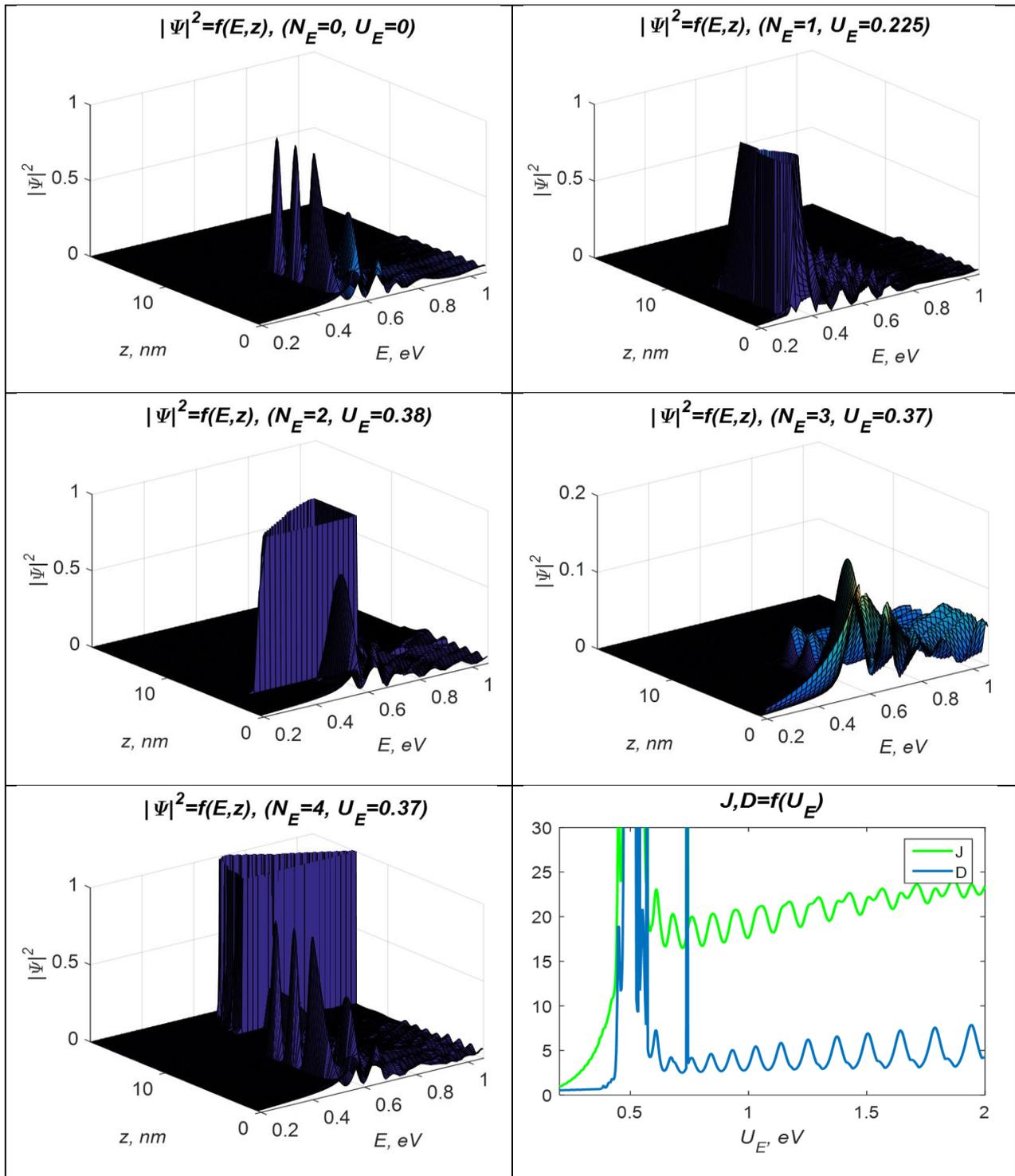
6-rasm. Uch qatlamli strukturalarda potensial baryerlar balandliklari $U_1=0.19$ eV, $U_2=0.29$ eV, $U_3=0.39$ eV bo'lganda hamda elektr maydoni qo'yilmaganda (a), 1-qatlamga (b), 2-qatlamga (v) va 3-qatlamga (g) $U_E=0.1$ eV elektr maydoni qo'yilganda elektronning turli energiya qiymatlarida $|\psi|^2$ ning koordinataga bog'liqligi .

6-a-b-v-g-rasmlarda uch qatlamli strukturalarda elektr maydoni qo'yilmaganda hamda birinchi, ikkinchi va uchinchi qatlamlarga $U_E=0.1$ eV elektr maydoni qo'yilganda turli energiyalarga ega bo'lgan elektronlarning topilish ehtimolligining koordinataga bog'liqligi keltirilgan. Rasmlardan ko'rinib turibdiki, uch qatlamli strukturalarda potensial baryerlar balandligi $U_1=0.19$ eV, $U_2=0.29$ eV, $U_3=0.39$ eV bo'lganda va elektr maydoni qo'yilmaganda baryerlardan o'ta oladi, $E=0.32$ eV energiyali elektronning ~ 1.8 nm atrofida topilish ehtimolligi eng katta bo'ladi. 1-qatlamga elektr maydoni qo'yilganda $E=0.18$ eV energiyali elektronning ~ 1.9 nm atrofida topilish ehtimolligida qo'shimcha maksimum kuzatiladi, $E=0.32$ eV dagi maksimumlar ikkiga bo'linadi. 2-qatlamga elektr maydoni qo'yilganda $E=0.24-0.3$ eV

1-jadval. Ba'zi yarimo'tkazgichlarning asosiy parametrlari

Material	Kristall tuzilishi	Panjara doimiysi, nm	Taqiqlangan zona kengligi, eV	Effektiv massasi, m/m_e
3C-SiC	kubik	0.436	2.36	0.29
GaN	kubik	0.45	3.2	0.18
Si	olmossimon	0.5341	1.11	0.26
Ge	olmossimon	0.5657	0.66	0.22
GaAs	kubik	0.5653	1.42	0.067
AlAs	kubik	0.5661	2.16	0.15
GaP	kubik	0.545	2.26	0.15
ZnSe	kubik	0.567	2.7	0.16
InP	kubik	0.587	1.35	0.08
PbS	kubik	0.594	0.41	0.09
InAs	kubik	0.6058	0.36	0.023
GaSb	kubik	0.61	0.72	0.039
AlSb	kubik	0.6135	1.58	0.12
InSb	kubik	0.6479	0.17	0.014
CdTe	kubik	0.648	1.5	0.11
$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	kubik	0.5869	0.75	0.041
HgCdTe	kubik	0.64–0.65	0.1–1.5	0.015–0.1
AlN	geksagonal	$a=3.11, c=4.98$	6.2	0.3
ZnO	geksagonal	$a=3.25, c=5.2$	3.37	0.24
CdS	geksagonal	$a=4.13, c=6.74$	2.42	0.21

8- rasmda kremniyli to'rt qatlamli (har bir qatlamda 8 tadan atomlar qatlami bo'lgan) nanostrukturada (Si-Ge-GaAs-AlAs: $m_1=0.26, m_2=0.22, m_3=0.067, m_4=0.15$; $U_1=0.555$ eV, $U_2=0.33$ eV, $U_3=0.71$ eV, $U_4=1.08$ eV; $d_1=4.2728$ nm, $d_2=4.5256$ nm, $d_3=4.5224$ nm, $d_4=4.5288$ nm) elektr maydoni qo'yilmaganda hamda 1-, 2-, 3- va 4-qatlamlarga elektr maydoni qo'yilganda elektronlarning topilish ehtimolligining koordinata va energiyaga bog'liqligi keltirilgan.



8-- rasm. Kremniyli to‘rt qatlamli nanostrukturada (Si-Ge-GaAs- AlAs: $m_1=0.26$, $m_2=0.22$, $m_3=0.067$, $m_4=0.15$; $U_1=0.555$ eV, $U_2=0.33$ eV, $U_3=0.71$ eV, $U_4=1.08$ eV; $d_1=4.2728$ nm, $d_2=4.5256$ nm, $d_3=4.5224$ nm, $d_4=4.5288$ nm) elektr maydoni qo‘yilmaganda hamda 1-, 2-, 3- va 4-qatlamlarga elektr maydoni qo‘yilganda elektronlarning topilish ehtimolligining koordinata va energiyaga bog‘liqligi.

Rasmlardan ko‘rinib turibdiki, elektr maydoni qo‘yilmaganda elektronlarning (0.56 eV; 4.3, 6.3, 8.2 nm), (0.6 eV, 1.9 nm) va (0.68 eV, 1.0 nm) nuqtalar atrofida topilish ehtimolligida cho‘qqilar paydo bo‘ladi. Elektr maydoni 1-qatlamga qo‘yilganda 0.34-0.42 eV energiyali elektronlarning 1.7-2.7 nm nuqtalar atrofida

topilish ehtimoligida maksimumlar paydo bo'ladi, ulardan (0.34 eV, 2.7 nm) nuqtadagi maksimum eng katta bo'ladi. Elektr maydoni 2-qatlamga qo'yilganda (0.56-0.7 eV) energiyali elektronlarning (4.3-7.4 nm) nuqtalarda topilish ehtimoligi keskin ortadi. Elektr maydoni 3-qatlamga qo'yilganda maksimumlar pasayadi. Elektr maydoni 4-qatlamga qo'yilganda energiyasi 0.56 eV dan katta bo'lgan elektronlarning ~13 nm dan katta nuqtalardagi topilish ehtimoligi keskin ortib ketadi, ya'ni bunday energiyali elektronlarning barchasi to'rt qatlamli nanostrukturadan bema'lol o'ta oladi. 8-e-rasmda tok zichligi va o'tish ko'effitsiyentining 4-qatlamga qo'yilayotgan elektr maydoniga bog'liqligi keltirilgan. Grafikdan ko'rinib turibdiki, tok zichligi va o'tish ko'effitsiyentining o'zgarish qonuniyatlari bir xil – ularning qiymati ossilyatsiyalanib turadi. Shuningdek, ular elektr maydonining qiymati 0.525 eV (1.08-0.525=0.555) va 0.740 (1.08-0.75=0.33) eV bo'lganda keskin cho'qqilarga ega bo'ladi. Bunga sabab – elektr maydonining bu qiymatlarida to'rtinchi qatlam baryeri balandligi va elektr maydoni ayirmasi birinchi va ikkinchi qatlamlar potensial baryerlari balandliklariga teng bo'lganda hamda elektronning de Broyl to'lqin uzunligi qatlam qalinligiga yaqinlashganda rezonans yuz beradi.

Ko'rib o'tilgan dastur va uning yordamida olingan natijalar kelgusida yarimo'tkazgichli ko'p qatlamli nanostrukturallarni loyihalash va tayyorlashda foydalanilishi mumkin.

Dissertatsiyaning "**Nanozarralardan fotoemission tok**" deb nomlangan uchinchi bobda g'alayonlanish nazariyasidan foydalanib, elektronning yorug'likni yutib, nanozarradan chiqishini tavsiflovchi Shredinger tenglamasini yechish usullari keltirilgan. Shuningdek, metall-yarimo'tkazgich bo'linish chegarasida elektromagnit maydon, elektronning effektiv massasi va potensialning o'zgarishi hisobga olinganda fotoemissiya ehtimoligi amplitudasi va fotoemission tok uchun ifodalar olingan. Olingan ifodalar nanozarralardan kremniyga fotoemissiya uchun tadbiq qilingan.

Nanozarrachalarda LPR qo'zg'alishida zaryad tashuvchilarning uzatilishi bilan bog'liq hodisalardan biri bu nanozarrachalardan fotoemissiyadir. Nanozarrachalardan fotoemissiya "makroskopik" metall strukturalardan fotoemissiyadan sezilarli darajada farq qiladi, chunki, birinchidan, LPR qo'zg'alganda EM maydon zarracha ichida va uning tashqarisida, nanozarracha yuzasiga yaqin sohalarda kuchli ortadi; ikkinchidan, nanozarracha sirtining uning hajmiga nisbati makroskopik tuzilmalarga qaraganda ancha katta. Nanozarrachalardan fotoemissiya miqdorini aniqlash va nanozarrachalardan fotoemissiya maksimal bo'lgan optimal parametrlarni aniqlash uchun nanozarrachalardan fotoemission tokni hisoblash kerak bo'ladi.

G'alayon nazariyasi asosida bo'linish chegarasiga tik yo'nalishda harakatlanayotgan fotoemission elektronning ehtimollik amplitudasi uchun

$$C_+(\infty) = \frac{|e|m}{\hbar\omega W_1} \int_{-\infty}^{\infty} dz (E_m \frac{d\Psi_0}{dz} \Psi_{1-} + \frac{1}{2} \Psi_{1-} \Psi_0 \frac{dE_m}{dz}) \quad (9)$$

ifoda olingan. Umumiy holda fotoemissiya ehtimoligi amplitudasi

$$C_+(\infty) = \frac{|e|m}{W_1(\hbar\omega)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dz (C_V + C_E + C_m) / m \quad (10)$$

ko‘rinishda bo‘ladi, bu yerda C_V , C_E , C_m – potensial, elektromagnit maydon va elektron massasining bo‘linish chegarasida o‘zgarishini hisobga olingan holdagi fotoemissiyani tavsiflaydi:

$$C_V = -EV' \Psi_0 \Psi_{1-}, \quad (11)$$

$$C_E = E' \{ (\hbar^2 / 2m) \Psi_0' \Psi_{1-}' + [E_0 - V + \hbar\omega / 2] \Psi_0 \Psi_{1-} \}, \quad (12)$$

$$C_m = Em' / m [E_0 - V + \hbar\omega / 2] \Psi_0 \Psi_{1-} \quad (13)$$

Metall nanozarrachalardan fotoemission tok

$$J_{ph-em} = C_{em} |F|^2 K_{geom} |E|^2 \quad (14)$$

ifoda orqali aniqlanadi, bu yerda

$$C_{em} = \frac{e^2 kTV^2}{\pi^2 \hbar^5 \omega^4} \int dx [1 + (\hbar\omega/V - 1)/x]^{1/2} \ln(1 + \exp(\frac{E_f - Vx}{kT})) U(x) |K_{dis}(x)|^2 \text{ fotoemissiya ehtimolligi};$$

$$U(x) = \frac{4r_m^2}{(r_m + 1)^2} \frac{x}{[x + r_m(1-x)] \{ (x + \hbar\omega/V)^{1/2} + [r_m(x + \hbar\omega/V - 1)]^{1/2} \}^2},$$

$$K_{dis}(x) = \frac{1}{2} (1 + \varepsilon_- / \varepsilon_+) [1 + \frac{1-r_m}{1+r_m} (2x + \hbar\omega/V - 1)] + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon_- / \varepsilon_+) [x + \hbar\omega/V]^{1/2} + i(1-x)^{1/2}]^2$$

$$F = \frac{1}{1 + R_{dep} - iR_{rad}} \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L}$$

- chegarada elektr maydonining o‘zgarishini hisobga oluvchi funksiyalar,

$$R_{dep} = \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L} (A\varepsilon_+ y^2 + B\varepsilon_+^2 y^4), \quad R_{rad} = \frac{16}{9r} (\frac{\pi m_+ a}{\lambda})^3 \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L},$$

$$L = \frac{r^2}{2} \int \frac{du}{(u + r^2)^2 (u + 1)^{1/2}} -$$

- depolyarizatsiya va radiatsion yo‘qotishlarni hisobga oluvchi funksiyalar,

$$\varepsilon_-(\lambda) = \varepsilon_m(\lambda) + (\lambda / \lambda_p)^2 \left[\frac{1}{1 + i\lambda / \lambda_f} - \frac{1}{1 + (i\lambda / \lambda_f)(a_c / a + 1)} \right], \quad \varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon_\infty + (\lambda / \lambda_p)^2 \frac{1}{1 + i\lambda / \lambda_f},$$

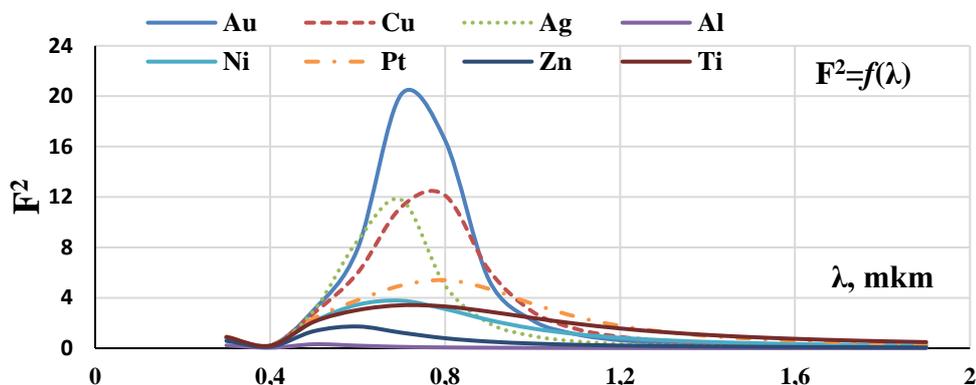
$$\varepsilon_+(\lambda) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^3 \frac{C_i}{1 - (\frac{1.242}{\lambda E_i})^2 - i \frac{1.242}{\lambda E_i} \gamma_i} - F_1 \chi_1^{-2}(\lambda) \ln[1 - \chi_1^2(\lambda)] - F_2 \chi_2^{-2}(\lambda) \ln \frac{1 - \chi_1^2(\lambda)}{1 - \chi_2^2(\lambda)}$$

nanometallar va kremniyning dielektrik funksiyalari.

Yuqoridagi ifodalar asosida metallarning plazmon parametrlarini, shuningdek, to‘lqin uzunligiga bog‘liq metall nanozarrachalardan fotoemission tok va elektr maydon intensivligini hisoblash uchun Visual Basicda dastur tuzildi. Dastur chiqish ishi, Fermi energiyasi, elektronning effektiv massasi, plazmonik parametrlar, nanozarracha o‘lchamlari va boshqalarni kiritish va o‘zgartirish imkonini beradi.

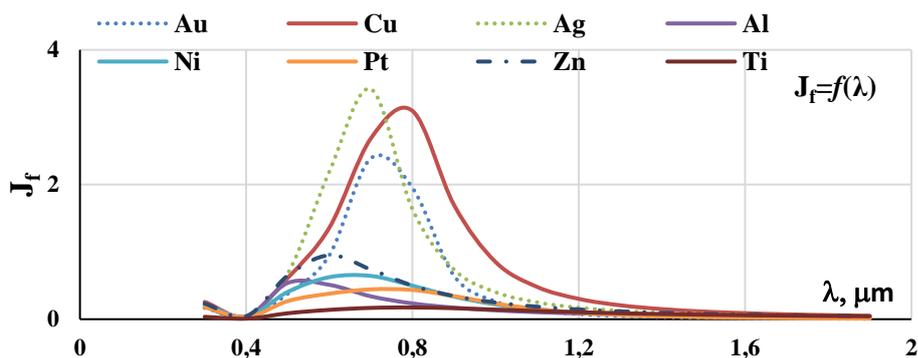
Hisoblash natijalari rasmlarda grafiklar shaklida ko‘rsatilgan.

8-rasmda kremniydagi metall nanozarrachalarning fotoelektron emissiyasi (F^2) elektr maydoni intensivligining spektral bog'liqligini hisoblash natijalari ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, oltin uchun eng yuqori intensivlik qiymatiga erishiladi.



8-rasm. Kremniydagi metall nanozarrachalarning fotoelektron emissiyasi (F^2) elektr maydonining intensivligi ortishining spektral bog'liqligi keltirilgan.

9-rasmda kremniydagi metall nanozarrachalardan fotoemission tokning (J_{fem}) spektral bog'liqligini hisoblash natijalari ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, fotoemission tokning eng yuqori qiymati kumush va mis uchun to'g'ri keladi.



9-rasm. Kremniyda metall nanozarrachalarning fotoemission tokning (J_f) spektral bog'liqligi.

Shunday qilib, Visual Basicda metallarning plazmon parametrlarini, shuningdek, tushayotgan yorug'lik to'liq uzunligiga qarab nanozarracha ichidagi elektr maydoni intensivligi va fotoemission toklarni hisoblash dasturi ishlab chiqildi. Dastur chiqish ishi, Fermi energiyasi, elektronning effektiv massasi, plazmon parametrlari, nanozarrachalar o'lchamlari va boshqalar qiymatlarini kiritish va o'zgartirish imkonini beradi. Yagona dasturiy ta'minot muhitida hisob-kitoblar natijalari MS Excelga eksport qilinadi va nafaqat jadval, balki grafik shaklda ham ifodalanadi. Nanozarracha material sifatida nafaqat qimmatbaho oltin va kumush, balki misdan ham foydalanish mumkinligi ko'rsatildi. Bundan tashqari, mis nanozarralari fotoemission tokning eng yuqori qiymatlariga ega.

Dissertatsiyaning “**Real quyosh elementlarining asosiy parametrlari**” deb nomlangan to'rtinchi bobida quyosh elementlarining tayyorlanish texnologiyasi, tuzilishi, ishlash prinsipi va rivojlanish bosqichlari haqida so'z boradi. Shuningdek,

unda quyosh energetikasi istiqbollari, quyosh elementlarining asosiy xarakteristikalari, real quyosh elementlarining parametrlari va ularni aniqlashda eng kichik kvadratlar usuli bayon qilingan.

Ma'lumki, real quyosh elementining volt-ampere xarakteristikasi

$$J = J_f - J_0 \left(\exp \left(\frac{e(U + JR_k)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{JR_k + U}{R_p} \quad (15)$$

tenglama orqali ifodalanadi, bu yerda J_f - fototok, J_0 - to'yinish toki, e - elektron zaryadi, A - ideallik koeffitsiyenti, k - Bolsman doimiysi, T - temperatura, R_k - ketma-ket qarshilik, R_p - parallel qarshilik.

Volt-ampere xarakteristikasi quyosh elementining eng muhim xarakteristikasi hisoblanadi, chunki u quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish samaradorligini belgilaydi: Quyosh elementining samaradorligi uning volt-ampere xarakteristikasi shakliga bog'liq bo'lganligi sababli, volt-ampere xarakteristikasi tenglamasiga kiritilgan parametrlar aniqlanadi. Shuning uchun quyosh elementlarini ishlab chiqish ularning parametrlarini ishonchli aniqlash usullaridan foydalanishni talab qiladi.

Quyosh elementining parametrlarini uning volt-ampere xarakteristikasidan aniqlashning ko'plab usullari mavjud. Ulardan ba'zilar QE parametrlarining nurlanishga bog'liqligi sababli qabul qilinishi mumkin bo'lmagan turli xil nurlanish intensivligida yoki tashqi elektr tokining turli qiymatlarida olingan bir nechta volt-ampere xarakteristikasidan foydalanishga asoslangan. Binobarin, quyosh elementlarining parametrlarini aniqlashning eng maqbul usullari hisob-kitoblar uchun yagona volt-ampere xarakteristikasi qo'llaniladigan usullardir⁷.

Quyosh elementi parametrlarini aniqlash usullarini amalga oshirishda qo'llaniladigan yaqinlashishlar, shuningdek, eksperimental tarzda aniqlangan va hisob-kitoblarda qo'llaniladigan miqdorlar M.Tivanov ishlarida keltirilgan⁸. Parametrlarni aniqlashning eng maqbul usuli volt-ampere xarakteristikaning koordinata o'qlariga og'ish burchaklaridan foydalanishga asoslangan. Biroq, bu usul bir nechta muhim kamchiliklarga ega: birinchidan, hisoblashda ishlatiladigan volt-ampere xarakteristikaning og'ish burchaklarini to'g'ri aniqlash qiyinligi; ikkinchidan, barcha parametrlarni mustaqil ravishda ifodalashning mumkin emasligi. Ushbu usulda diod koeffitsientiga dastlab ma'lum bir qiymat berilishi kerak, keyin qolgan parametrlar hisoblab chiqiladi, shundan so'ng topilgan parametr qiymatlari yordamida diod koeffitsienti yana hisoblab chiqiladi. Sikl hisoblash belgilangan aniqlikka erishilgunga qadar davom etadi. Biroq, siklning yaqinlashishi diod koeffitsientining boshlang'ich qiymatini tanlashning muvaffaqiyatiga bog'liq bo'lib, noma'lum turdagi quyosh elementi bilan ishlashda buni qilish juda qiyin.

Yuqorida aytib o'tilgan deyarli barcha usullarda hisoblashlar davomida $R_k/R_p \rightarrow 0$ yaqinlashishdan foydalaniladi. Bu yaqinlashishni hisoblash o'rtasida emas, balki boshida qilinsa (15) tenglama

⁷ Элзеин И., Петренко Т.П. Прогнозирующая модель управления системой обеспечения максимальной выходной мощности фотоэлектрической станции. // Системный анализ и прикладная информатика, 2015, №4, С.17-25.

⁸ Tivanov M. et al. Determination of solar cell parameters from its current-voltage and spectral characteristics.// Solar energy materials and solar cells, 2015, v. 87 (1-4), p. 457-465.

$$J = J_{sc} - J_0 \left(\exp \left(\frac{e(U + JR_s)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p} \quad (16)$$

ko‘rinishga keladi va hisobalshalar ancha soddalashadi.

Biz taklif etilayotgan usulda bu yaqinlashishdan foydalanilmaydi. Ideallik koeffitsiyenti $A=1$ deb hisoblab, VAX (tok kuchi) tenglamasi (15) va uning hosilasining qisqa tutashuv toki va salt ishlash kuchlanishi nuqtalaridagi qiymatlaridan foydalanilsa, ketma-ket qarshilikni (R_s) aniqlash uchun quyidagi trassendent tenglama hosil bo‘ladi⁹:

$$\frac{(1 + bR_s)e(1 + aR_s)(C_1 - C_2)}{AkT(a - b)} - \frac{J_{sc}R_s(C_1 - 1) + U_{oc}(1 - C_2)}{J_{sc}^2 R_s} = 0 \quad (17)$$

bu yerda

$$C_1 = \exp \left(\frac{eU_{oc}}{AkT} \right);$$

$$C_2 = \exp \left(\frac{eJ_{sc}R_s}{AkT} \right);$$

$a=J'(0)$; $b=J'(U_{oc})$; J_{sc} - qisqa tutashuv toki; U_{oc} - salt ishlash kuchlanishi. Ketma-ket qarshilik aniqlangach,

$$R_p = R_s \frac{(C_1 - 1)}{(1 - C_2)} + \frac{U_{oc}}{J_{sc}} \quad (18)$$

$$J_0 = \frac{J_{sc}R_s}{R_p(1 - C_2)} \quad (19)$$

ifodalar yordamida parallel qarshilik (R_p) va to‘yinish toki (J_0) aniqlanadi.

Quyosh elementining ideallik koeffitsiyentini (A) aniqlash uchun “Eng kichik kvadratlar” usulidan foydalanamiz. Ma’lumki, bu usulda (15) ifoda tok kuchi va kuchlanishning tajribada olingan (J_i , U_i) natijalarni qoniqarli tavsiflasi uchun o‘rtacha kvadratik hatolik

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[J_{sc} - J_0 \left(\exp \left(\frac{e(U_i + J_i R_s)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{J_i R_s + U_i}{R_p} - J_i \right]^2 \quad (20)$$

minimal bo‘lishi kerak. Buning uchun (20) ifodadan A bo‘yicha olingan hosila nolga teng bo‘lishi kerak

$$\frac{d\chi^2}{dA} = \sum \left\{ J_q - J_0 \left(\exp \left(\frac{e(U_i + J_i R_k)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{J_i R_k + U_i}{R_p} - J_i \right\} \exp \left(\frac{e(U_i + J_i R_k)}{AkT} \right) (U_i + J_i R_k) = 0 \quad (21)$$

Bu usul yordamida aniqlangan A kattalik asosida yuqorida topilgan (R_k , R_p , J_0) parametrlarga aniqlik kiritiladi. Barcha parametrlar aniqlangach, quvvat ifodasi hosilasining nolga tengligi shartidan maksimal quvvat (P_m) va unga mos keluvchi tok kuchi (J_m) va kuchlanishlar (U_m) aniqlanadi. So‘ngra esa bu kattaliklar orqali foydali ish koeffitsiyenti (η) va to‘ldirish koeffitsiyenti (ξ) aniqlanadi.

⁹Насиров М.З. Метод наименьших квадратов на основе “Mobile Basic” // Universium: Технические науки, 2021, № 1(82), с. 11-14.

Yuqorida keltirilgan ifodalar asosida va “Eng kichik kvadratlar usuli” yordamida real quyosh elementlarining asosiy parametrlarni hisoblash uchun Visual Basicda dastur tuzildi. Dastur (17) transsendent tenglama va (18), (19) ifodalar yordamida ketma-ket qarshilik (R_s), parallel qarshilik (R_p), to‘yinish toklarini (J_0) aniqlash, so‘ngra volt-ampere xarakteristika bo‘yicha tajribada olingan natijalarni “Eng kichik kvadratlar usuli” yordamida qayta ishlash orqali ideallik koeffitsiyentini (A) aniqlash, keyinchalik maksimal quvvat (P_m) va foydali ish koeffitsiyenti (η) kabi asosiy parametrlarni aniqlash va natijalarni MS Excelga jo‘natib, tasvirlashga imkon beradi. Dasturda shuningdek, volt-ampere xarakteristika bo‘yicha tajribada olingan natijalarni¹⁰ ekrandagi maxsus oynachalar yoki MS Excel orqali qabul qilish imkoniyati yaratilgan. Hisoblash aniqligi o‘rtacha kvadratik hatolikning qiymati (χ^2) orqali nazorat qilib boriladi. Dastlabki hisoblash natijalari 1-jadvalda va 12-rasmda keltirilgan.

1-jadval. Kremniyli quyosh elementining asosiy parametrlari

$J_{SC}, mA/sm^2$	0.035	$J_m,$ mA/sm^2	0.033
U_{OC}, V	0.58	$U_m,$ V	0.48
$J_0, mA/sm^2$	11.133	$P_m,$ mVt	16.2
A	1.025	ff	0.797
R_s, Om	0.6019	η	16.192
R_p, GOm	1.559	χ^2	$9.077 \cdot 10^{-4}$

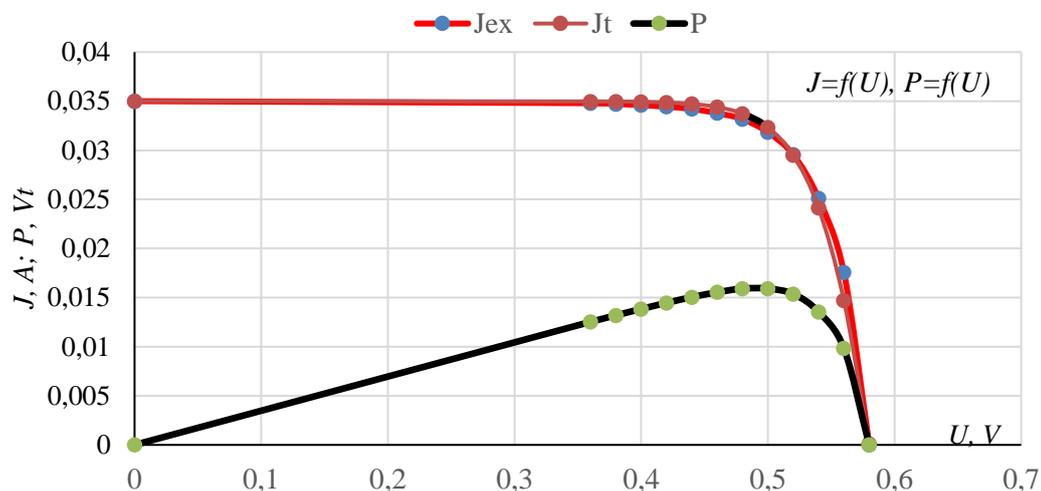
1-jadvalda keltirilgan natijalardan ko‘rinib turibdiki, hisoblangan parametrlar eksperimental natijalarga juda yaqin. Buni o‘rtacha kvadratik hatolikning (χ^2) qiymatidan ham ko‘rish mumkin.

R.Aliev¹¹ va boshqalar tomonidan nanoplazmonika effekti yordamida fotoelektrik o‘zgartirgichlarning samaradorligini oshirish uchun har xil turdagi metall nanozarralardan foydalanish mumkinligi haqida xabar berilgan, ular tomonidan modellashtirish usuli yordamida turli o‘lchamdagi va tarqalish zichligiga ega bo‘lgan turli o‘lchamdagi metall nanozarralarini o‘z ichiga olgan yupqa kremniyli p-n-o‘tishli

¹⁰ Aliev R., Gulomov J. et al. Stimulation of Photoactive Absorption of Sunlight in Thin Layers of Silicon Structures by Metal Nanoparticles // Applied Solar Energy, 2020, Vol. 56, No. 5, pp. 364–370.

¹¹ Aliev R., Nosirov M. et al. Increasing the optical efficiency of silicon solar cells by using metal nanoparticles, in *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennyye problemy vozobnovlyayemykh istochnikov energii i ustoichivoi okruzhayushchei sredy”* (Proc. International Conference “Contemporary Issues of Renewable Energy Sources and Sustainable Environment”), Tashkent, Sept. 25–27, 2019, pp. 14–20.

tuzilmalarida zaryad ko‘chishining fotoelektrik jarayonlari o‘rganilgan. Dielektrik qoplamaning yupqa qatlamlarida, yuqori va past legirlash darajalariga ega bo‘lgan emitter va asosda, shuningdek, ushbu qatlamlarning chegaralarida metall nanozarrachalarni o‘z ichiga olgan fotovoltaik o‘zgartirgichlarning yutilish va volt-amper xarakteristikalari ko‘rib chiqilgan hamda nanozarralar emitterga joylashtirilganda eng yaxshi natijaga erishilishi aniqlangan.



12-Rasm. Quyosh elementining volt-amper va volt-vatt xarakteristikalari keltirilgan.

Real quyosh elementlarining asosiy parametrlarini aniqlash bo‘yicha yuqorida tavsiflangan usul va dastur yordamida turli metall nanozarralari kiritilgan quyosh elementlarining asosiy parametrlari hisoblandi. Hisoblash natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval. Metall nanozarralari kiritilgan quyosh elementlarining asosiy parametrlari

Parametrlar	Nanozarrasiz	Ag kiritilgan	Au kiritilgan	Cu kiritilgan
$J_{SC}, mA/sm^2$	0.035	0.037	0.038	0.039
U_{OC}, V	0.58	0.58	0.58	0.58
$J_0, mA/sm^2$	11.133	9.29	9.547	9.798
A	1.025	1.014	1.014	1.014
R_s, Om	0.6019	0.1961	0.1756	0.1573
R_p, GOm	1.559	2.450	2.413	2.376
$J_m, mA/sm^2$	0.033	0.034	0.035	0.036
U_m, V	0.48	0.5	0.5	0.5
P_m, mVt	16.2	17.1	17.6	18.2
ff	0.797	0.799	0.801	0.803
η	16.192	17.168	17.664	18.165
χ^2	$9.077 \cdot 10^{-4}$	$1.361 \cdot 10^{-3}$	$1.451 \cdot 10^{-3}$	$1.547 \cdot 10^{-3}$

Natijalardan ko‘rinib turibdiki, mis nanozarralari kiritilgan quyosh elementining parametrlari eng yaxshi ko‘rsatkichlarga ega bo‘ladi.

Shunday qilib, ushbu bitta transsendent tenglamani yechish va volt-amper xarakteristika bo'yicha tajribada olingan natijalarni "Eng kichik kvadratlar usuli" yordamida qayta ishlash orqali real quyosh elementlarining asosiy parametrlarini aniqlash usuli taklif etildi. Taklif etilgan usulning afzalligi - bitta volt-amper xarakteristikasidan foydalanish va quyosh elementining parametrlarini hisoblash aniqligining nazorat qilib borilishidadir. Hisob-kitob natijalarining tajriba natijalariga juda yaqinligi usulning samaradorligini ko'rsatadi. Taklif etilgan usul va dastur quyosh elementlarining xususiyatlarini kuzatish tizimini yaratish va ularning parametrlarini aniqlash usullarini takomillashtirishga yordam beradi.

XULOSA

Ko'p qatlamli nanostrukturalar va nanozarralar kiritilgan kremniyning asosiy elektrofizik xususiyatlarini raqamli modellashtirish orqali chuqur tahlil natijasida quyidagi asosiy xulosalar shakllantirildi:

1. Ko'p qatlamli strukturalarda elektronlarning baryerlardan o'tish koeffitsienti elektronlar energiyasi 0.25 eVdan 0.43 eVgacha o'zgarganda qatlamlar qalinligi va balandligiga teskari proporsional ravishda o'zgarishi, 1- va 4-qatlamlar potensial baryeri balandligi 0.29 eV va 0.39 eV bo'lganda qatlamlar chegaralaridan o'tgan va qaytgan elektron to'lqinlarining interferensiyasi natijasida kvazi bog'langan holatlar yuzaga kelishi tufayli o'tish koeffitsientida qo'shimcha maksimum va minimumlar paydo bo'lishi aniqlandi.

2. Ko'p qatlamli strukturalarda elektronlarning baryerlardan o'tish koeffitsientining qatlamlar soniga bog'liqligi bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar o'tish koeffitsienti elektron energiyasi 0 dan 0.12 eV gacha o'zgarganda barcha qatlamlar uchun bir xil, 0.12 eV dan 0.46 eVgacha o'zgarganda ikki qatlamli strukturalarda yuqori, undan keyin esa tigonometrik qonuniyat asosida kamayib borishi ko'rsatildi.

3. Birinchi marta elektronlarning kremniyli to'rt qatlamli nanostrukturalardagi harakatini tahlil qilish natijasida elektr maydoni to'rtinchi qatlamga qo'yilganda eng katta samaradorlikka erishilishi, elektronlar energiyasi baryer balandligidan kam bo'lsa ham elektr maydoni ta'sirida baryerlardan o'ta olishi hamda elektronlarning baryerlardan o'tish koeffitsienti va tok zichligining elektr maydoniga bog'liqligi ossilyatsion xarakterga ega ekanligi aniqlandi.

4. p-tipli kremniyda joylashgan sferik nanozarralarda lokallashgan plazmon rezonansi yuzaga kelishi, nanozarralar yaxlit metalga nisbatan bir necha marta yuqori fotoemission tok hosil qilishi, nanozarra materiali sifatida nafaqat qimmatbaho oltin, balki misdan ham foydalanish mumkinligi ko'rsatildi.

5. Bitta transsendent tenglamani yechish va volt-amper xarakteristika bo'yicha tajriba natijalarini "Eng kichik kvadratlar usuli" yordamida qayta ishlash orqali real quyosh elementlarining asosiy parametrlarini tez va oson aniqlash usuli taklif etildi. Taklif etilgan usul quyosh elementlarining xususiyatlarini kuzatish tizimini yaratish va ularning parametrlarini aniqlash usullarini takomillashtirishga yordam beradi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD. 03/30.11.2022.FM/Т.66.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАТБОБОЕВА САИДАХОН ДИЛМУРОД КИЗИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НАНОКРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Наманган-2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2023.4.PhD/FM987.

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете.
Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.namdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	Носиров Муроджон Закирович кандидат физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич доктор физико-математических наук, профессор Атамуратов Атабек Эгамбердиевич доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Урганч государственный университет

Защита диссертации состоится 24-октября 2025 года в в 9⁰⁰ часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней PhD.03/30.11.2022.FM/T/66/04 при Наманганском государственном техническом университете. (Адрес: 160115, г, Наманган, ул, Касансайская - 7. Наманганский государственный технический университет, здание 6, 1-й этаж, кабинет Научного совета, Тел/факс: (99869) 225-10-07; Факс: (99869) 225-76-75. e-mail: info@namdtu.uz)

Диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Наманганского государственного технического университета (зарегистрирована за №__) по адресу: 160115, г. Наманган, ул. И.Каримов -12, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225- 76-75.

Автореферат диссертации разослан 9-октября 2025 года.
(реестр протокола рассылки № 5 от 9-октября 2025 г).

У.И. Эркабоев
Председатель Научного
совета по присуждению ученых
степеней, д.ф-м.н., профессор

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

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Для предотвращения проблем, связанных с ростом энергопотребления и загрязнением окружающей среды в мире, использование возобновляемых источников энергии выходит на лидирующие позиции. По прогнозам, развитие солнечной энергетики в XXI веке останется основным среди всех альтернативных источников, и к 2050 году на солнечную энергетику будет приходиться 20-25% мирового производства энергии. Несмотря на значительные темпы роста использования солнечной энергии, доля электроэнергии, вырабатываемой на основе фотовольтаики, в настоящее время невелика по сравнению с другими источниками энергии, поскольку их стоимость высока. Для того чтобы фотовольтаика могла конкурировать с традиционными источниками энергии, себестоимость вырабатываемой ею электроэнергии должна быть снижена примерно в 5-10 раз. Для этого необходимо разработать эффективные, недорогие технологии и конструкции фотоэлектрических преобразователей. В этой связи особое внимание уделяется использованию новых перспективных моно- и поликристаллических кремниевых многослойных наноструктур.

В мире ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на улучшение свойств современных нанoeлектронных приборов и фотоэлектрических устройств, обеспечение их высокой эффективности. В этой связи особое внимание уделяется проведению целевых научных исследований, направленных на улучшение свойств многослойных наноструктур, рациональное использование новейших научно-технических достижений, расширение функциональных возможностей существующих микроэлектронных приборов в соответствии с потребностями потребителей, дальнейшее совершенствование оптических свойств и чувствительности многослойных структур, расширение энергетического спектра поглощаемых в их объеме фотонов и повышение эффективности создаваемых на их основе фотоэлектрических преобразователей. Теоретические исследования проводятся путем моделирования вероятности прохождения, возврата и нахождения носителей заряда в многослойных наноструктурах, определения физических механизмов оптического поглощения наночастиц в объеме кремния и процессов генерации-рекомбинации носителей заряда.

В нашей республике реализуются комплексные меры по развитию науки, в том числе по повышению эффективности фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводниковых многослойных квантовых наноструктур, и достигаются определенные результаты. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы поставлены важные задачи по «обеспечению бесперебойного снабжения экономики электроэнергией и активному внедрению технологий «зеленой экономики» во всех отраслях, повышению энергоэффективности экономики на 20 процентов»¹. При реализации этих задач

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 28.01.2022 г. № УФ-60.

важно, в частности, изучать физические механизмы поглощения света, асимметричную генерацию и рекомбинацию носителей заряда, процессы переноса заряда в р-п-переходе в различных полупроводниковых приборах и фотоэлектрических преобразователях на основе многослойных наноструктур путем проведения теоретических расчетов на основе цифрового моделирования.

Данная диссертационная работа в определенной степени способствует реализации задач, изложенных в Указе Президента Республики Узбекистан № ПФ-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», в постановлениях № ПП-4779 от 10 июля 2020 года «О дополнительных мерах по повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетических продуктов за счет привлечения существующих ресурсов»², № ПП-5063 от 9 апреля 2021 года «О мерах по развитию возобновляемой и водородной энергетики в Республике Узбекистан»³, № ПП-222 от 14 июня 2024 года «О дополнительных мерах по повышению эффективности использования энергетических ресурсов»⁴, № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики»⁵ и других нормативно-правовых документах, связанных с этой деятельностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям развития науки и техники Республики Узбекистан «III. Развитие возобновляемых источников энергии» - в рамках государственной программы прикладных исследований: ППИ-3, в частности «Развитие энергетики, энерго- и ресурсосбережения, транспорта, станкостроения, современной электроники, микроэлектроники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Э.Л. Вебер, С.Л. Майер, Э.Л. Нолле, М. Макканн, Т. Сонг занимались изучением физических процессов, происходящих в современных фотоэлектрических преобразователях на основе многослойных наноструктур при преобразовании световой энергии в электрическую. В.В. Климов, А.Шука, В.Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер и другие проводили исследования по изучению и повышению эффективности полупроводниковых многослойных наноструктур и фотоэлектрических преобразователей на основе наночастиц. Исследования по разработке новых конструкций современных солнечных элементов и их моделированию проводили Ж.И. Алферов, В.А. Миличко, М.А. Грин, Ф. Кушнинг и другие. В нашей республике исследования по поиску новых технических и технологических решений для создания фотоэлектрических преобразователей и повышения их эффективности

² Постановление Президента Республики Узбекистан от 10.07.2020 № ПП-4779.

³ Постановление Президента Республики Узбекистан от 09.04.2021 № ПП-5063.

⁴ Постановление Президента Республики Узбекистан от 14.06.2024 № ПП-222.

⁵ Постановление Президента Республики Узбекистан от 19.03.2021 № ПП-5032.

проводили академики М.С. Саидов, Р.А. Моминов, М.С. Баходирхонов, С. Зайнобидинов; профессора Р.Я. Расулов, Э.З. Имамов, Г. Гулямов, К. Исмаилов, Р. Алиев и др.

В результате проведенных исследований установлено, что теоретические исследования зависимости вероятности прохождения электронов через слои, возвращения и пребывания в них в трех-, четырех- и более слойных структурах нанокремния от числа слоев, ширины и высоты потенциальных барьеров, внешних воздействий, а также исследования влияния наночастиц на реальные солнечные элементы и совершенствование методов определения их параметров проведены недостаточно.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа соответствует научному плану кафедры физики конденсированных сред Андиганского государственного университета «Получение многослойных и поликристаллических полупроводников для инъекционных устройств и солнечных элементов и изучение их электрофизических свойств», проектам А-4-12 «Эффект наноплазмоники и повышение эффективности получения фотоэлектрической энергии в кремниевых р-п-структурах» (2015-2017 гг., научный руководитель проф. Р.Алиев) и ОТ-Ф2-68 «Механизмы образования микро- и нанокомпозитов с примес-дефектами в кристаллах и их роль в создании многослойных структур с широкими возможностями» (2017-2021 гг., научный руководитель акад. С.Зайнобидинов).

Целью исследования является определение условий повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей путем исследования свойств носителей заряда в многослойных наноструктурах на основе численного моделирования, основанного на законах квантовой физики.

Задачи исследования:

исследование движения носителей заряда в многослойных наноструктурах; исследование влияния электрического поля на движение носителей заряда в многослойных наноструктурах;

совершенствование методов определения основных параметров реальных солнечных элементов;

исследование влияния наночастиц на реальные солнечные элементы.

Объектом исследования являлось движение электронов в многослойных наноструктурах, моделируемое с использованием цифровых технологий.

Предметом исследования является влияние параметров структур и внешние воздействия на движение электронов в многослойных наноструктурах, моделируемых с использованием цифровых технологий.

Методы исследований. В процессе исследования использовались математический аппарат квантовой механики, аналитические и численные методы решения уравнения Шредингера, метод «наименьших квадратов»,

методы решения трансцендентных уравнений, технологии цифрового моделирования «Sentaurus TCAD», а также методы, предусмотренные действующими нормативными документами

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что в многослойных наноструктурах возникают дополнительные максимумы и минимумы коэффициента прохождения электронов через барьеры, обусловленные возникновением квазисвязанных состояний вследствие интерференции волн де Бройля, проходящих через границы слоев и возвращающихся от них;

впервые в результате численного моделирования движения электронов в кремниевых четырехслойных наноструктурах установлено, что наибольшая эффективность достигается при приложении электрического поля к четвертому слою, что электроны могут проходить сквозь барьеры под действием электрического поля, даже если их энергия меньше высоты барьера, а зависимость коэффициента переноса электронов и плотности тока от электрического поля носит осциллирующий характер;

разработан новый метод, позволяющий создать систему контроля свойств реальных солнечных элементов и усовершенствовать методы определения их параметров путем решения трансцендентного уравнения с использованием значений уравнения ВАХ и его производной в точках тока короткого замыкания и пикового рабочего напряжения;

показано, что при размещении сферических наночастиц на фотоэлектрических преобразователях на основе кремния р-типа и облучении широким спектром солнечного света возникает локализованный плазмонный резонанс, а резкое увеличение электрического поля внутри наночастиц приводит к возникновению тока фотоэмиссии, в несколько раз превышающего ток фотоэмиссии в твердом металле. Показано, что в качестве материала для наночастиц могут быть использованы не только драгоценные золото и серебро, но и медь, с повышением эффективности до 2%.

Практические результаты исследования следующие:

разработаны программные продукты для компьютерного моделирования движения электронов в многослойных наноструктурах, в частности, в 2-, 3- и 4-слойных структурах;

при применении разработанных программных продуктов к четырехслойным структурам нанокремния обнаружено появление дополнительных максимумов в коэффициентах прохождения электронов через барьеры и возврата, а наибольшая эффективность достигается при приложении электрического поля к четвертому слою.

Достоверность результатов исследований. Достоверность результатов исследования основана на том, что исследование проведено с использованием математического аппарата квантовой механики и современных численных методов моделирования, взаимной адекватности теоретических и экспериментальных исследований, обработке результатов измерений общепринятыми методами.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования обусловлена тем, что они позволяют получить новые знания о физических свойствах электронов в кремниевых многослойных наноструктурах, а полученные математические модели и аналитические соотношения могут быть использованы при исследовании других подобных многослойных наноструктур.

Практическая значимость результатов исследования обусловлена тем, что созданные программные продукты и полученные результаты по зависимости диэлектрических функций металлических наночастиц от длины волны света могут быть использованы при создании новых многослойных и оптоэлектронных устройств на основе полупроводников, включая солнечные фотоэлектрические преобразователи, фотодетекторы, фотокатализаторы, сенсоры и наноразмерные светодиоды.

Внедрение результатов исследования.

На основании полученных результатов численного моделирования основных электрофизических свойств многослойных наноструктур и кремния с введением наночастиц:

научные результаты, полученные на основе численного моделирования движения носителей заряда в многослойных структурах нанокремния, внедрены в АО «Фотон» (номер обращения АО № 58 от 14 апреля 2025 г.). В результате они рекомендованы к более широкому использованию при совершенствовании новых полупроводниковых многослойных и оптоэлектронных приборов, включая солнечные фотоэлектрические преобразователи, фотодетекторы, фотокатализаторы, сенсоры, наноразмерные светодиоды и повышении их эффективности.

полученные научные результаты по влиянию наночастиц золота, серебра и меди на фотоэлектрические преобразователи были внедрены при выполнении научно-практического проекта ФЗ-201906066 «Разработка технологии получения твердооксидных топливных элементов на основе редкоземельных металлов» в Институте материаловедения АН РУз на 2021-2023 годы (справка №19 Института материаловедения АН РУз от 25 января 2025 года). В результате показано, что фотоэлектрические свойства кремния с введением наночастиц меди более эффективны, чем фотоэлектрические свойства кремния с введением наночастиц золота и серебра.

Аппробация результатов исследования. Основные результаты диссертации были обсуждены на 12 международных и 4 республиканских научнщ-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 36 научных работ, в том числе 1 монография, 7 статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 3 в журналах, индексируемых в Scopus. По теме диссертации получены авторские свидетельства на 6 программных продуктов для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 118 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы, констатируется степень изученности проблемы, формулируются цель и задачи исследования, описываются предмет, объект и методы исследования, научная новизна и практические результаты, показаны результаты исследований и объяснена научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе диссертации под названием «**Исследования по изучению электрофизических свойств современных фотоэлектрических преобразователей**» приведены исследования по повышению эффективности фотоэлектрических устройств, типы, конструкция и основные параметры фотоэлектрических преобразователей по принципу действия и этапы их создания, их преимущества и недостатки, даны подробные сведения о методах формирования малоразмерных структур, молекулярно-лучевая эпитаксия, газовая эпитаксия, нанолитографический метод получения наноструктур, металлоорганических методах, субмикронной литографии, методе получения одно- и нульмерных структур, фотолитографии, методе изготовления интегральных микросхем, электронно-лучевой литографии, самоформировании наноструктур.

Вторая глава диссертации под названием «**Движение электронов в многослойных квантовых наноструктурах**» посвящена движению электронов в одномерной квантовой среде, прохождению через одномерный потенциальный барьер и прохождению через многослойные квантовые наноструктуры.

При решении задач, связанных с движением электронов в многослойных структурах, решение уравнения Шрёдингера для каждого слоя записывается в виде суммы падающих и возвращающихся волн де Бройля, а граничные условия между слоями используются для определения амплитуд этих волн. Рассмотрим наноструктуру, состоящую из N слоев, расположенных между полубесконечными областями, где потенциалы в каждом слое считаются постоянными (рис. 1):

$$U(z) = \begin{cases} U_0, z < z_0, \\ U_k, z_{k-1} < z < z_k \\ U_{N+1}, z > z_N \end{cases} \quad (1)$$

где z_k — координаты границы k - и $k+1$ -слоев, $k = 1, \dots, N$.

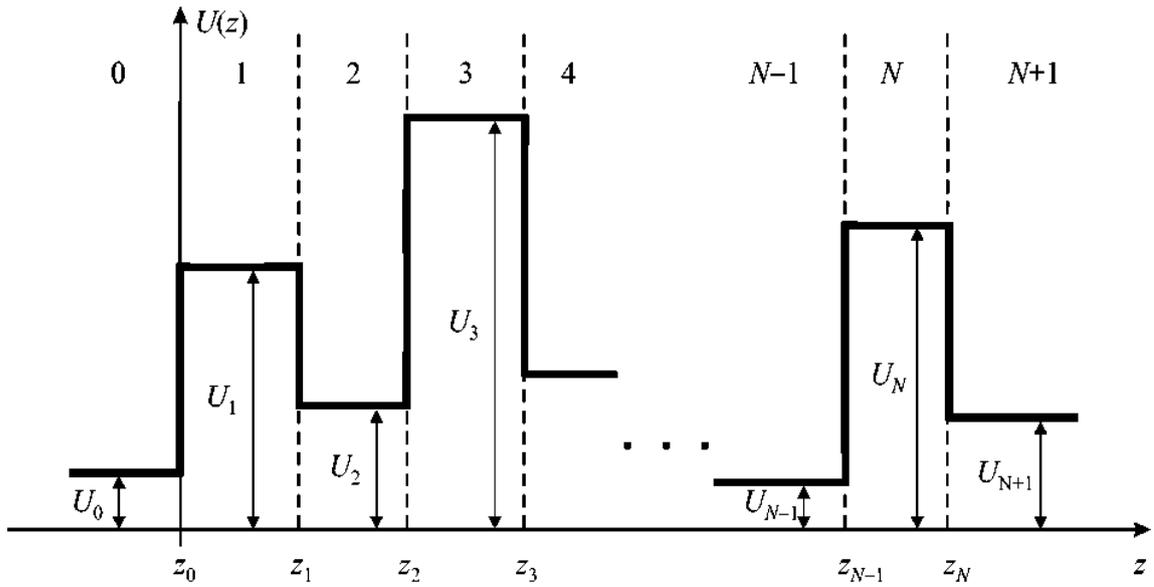


Рис. 1. Потенциальные барьеры в многослойных квантовых наноструктурах.

Будем считать, что источник электронов расположен в области 0 и бесконечно далеко от структуры, а электрон с энергией E движется от источника вдоль оси Oz в положительном направлении.

Решение уравнения Шрёдингера в k -области (2) записывается в виде

$$\psi_k = A_k e^{i\gamma_k z} + B_k e^{-i\gamma_k z} \quad (2)$$

где A_k и B_k — амплитуды k -падающей и отраженной волны де Бройля,

$$\gamma_k(E) = \frac{\sqrt{2m_k(E - U_k)}}{\hbar}, \quad (3)$$

m_k — эффективная масса электрона в k -области. Граничные условия для таких структур записываются в форме

$$\begin{cases} \psi_k(z_k) = \psi_{k+1}(z_{k+1}), \\ \frac{1}{m_k} \frac{\partial \psi_k}{\partial z}(z_k) = \frac{1}{m_{k+1}} \frac{\partial \psi_{k+1}}{\partial z}(z_{k+1}) \end{cases} \quad (4)$$

Подставив общее решение (2) к граничным условиям (4), получим систему алгебраических уравнений для коэффициентов A_k, B_k :

$$\begin{cases} A_k e^{i\gamma_k z_k} + B_k e^{-i\gamma_k z_k} = A_{k+1} e^{i\gamma_{k+1} z_k} + B_{k+1} e^{-i\gamma_{k+1} z_k}, \\ iA_k \frac{\gamma_k}{m_k} e^{i\gamma_k z_k} - iB_k \frac{\gamma_k}{m_k} e^{-i\gamma_k z_k} = iA_{k+1} \frac{\gamma_{k+1}}{m_{k+1}} e^{i\gamma_{k+1} z_k} - iB_{k+1} \frac{\gamma_{k+1}}{m_{k+1}} e^{-i\gamma_{k+1} z_k} \end{cases} \quad (5)$$

С помощью алгебраических преобразований эту систему можно привести в вид

$$\begin{cases} A_{k+1} = \frac{A_k}{2} \left(1 + \frac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1} m_k} \right) e^{-i(\gamma_{k+1} - \gamma_k) z_k} + \frac{B_k}{2} \left(1 - \frac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1} m_k} \right) e^{-i(\gamma_{k+1} + \gamma_k) z_k}, \\ B_{k+1} = \frac{A_k}{2} \left(1 - \frac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1} m_k} \right) e^{i(\gamma_{k+1} + \gamma_k) z_k} + \frac{B_k}{2} \left(1 + \frac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1} m_k} \right) e^{i(\gamma_{k+1} - \gamma_k) z_k} \end{cases} \quad (6)$$

Коэффициенты прохождения и отражения электронной волны выражаются коэффициентами A_k , B_k следующим образом

$$D = \frac{m_0}{m_{N+1}} \frac{|\gamma_{N+1}| |A_{N+1}|^2}{|\gamma_0| |A_0|^2} \quad (7)$$

$$R = \frac{|B_0|^2}{|A_0|^2} \quad (8)$$

Чтобы рассмотреть N-слойную (барьерную) структуру, необходимо знать параметры N+2 областей и координаты границ между ними с учетом двух областей вокруг них. Например, для изучения трехслойного барьера необходимо знать параметры пяти областей и координаты четырех границ между ними. Эти данные позволяют определить коэффициенты перехода и отражения, а также амплитуды волн де Бройля в каждом секторе в каждой области.

На языке Visual Basic создана программа для компьютерного моделирования физических процессов в упомянутых выше многослойных квантовых структурах (на рис. 2 изображена трехслойная квантовая структура), где $m_0 = m_4 = 0.05$ eV, $m_1 = m_2 = m_3 = 0.1$ eV, $U_0 = 0.09$ eV, $U_1 = 0.19$ eV, $U_2 = 0.29$ eV, $U_3 = 0.39$ eV, $U_4 = 0.09$ eV, $z_0 = 0$, $z_1 = 2$ nm, $z_2 = 4$ nm, $z_3 = 6$ nm.

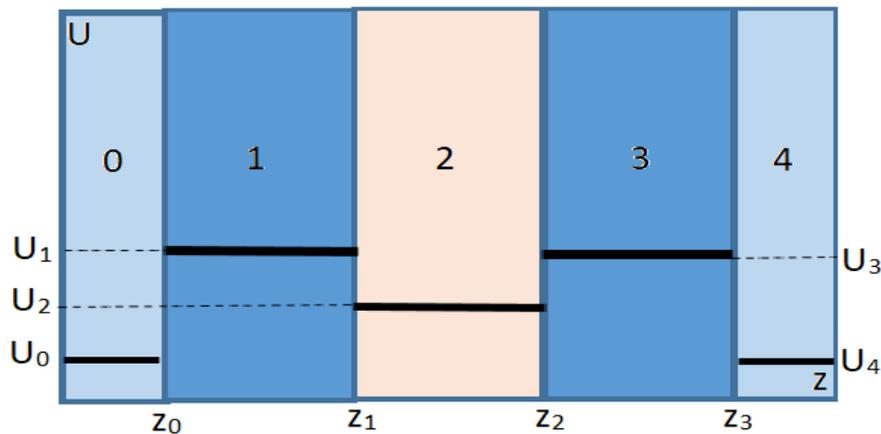


Рисунок 2. Трехслойная квантовая структура.

Программа позволяет ввести количество слоев, эффективную массу электрона в каждом слое, высоту и ширину потенциального барьера для слоя, а также рассчитать коэффициенты перехода и отражения электронов из барьеров и вероятности пребывания в слоях. Результаты расчетов представлены на следующих рисунках [9, 10].

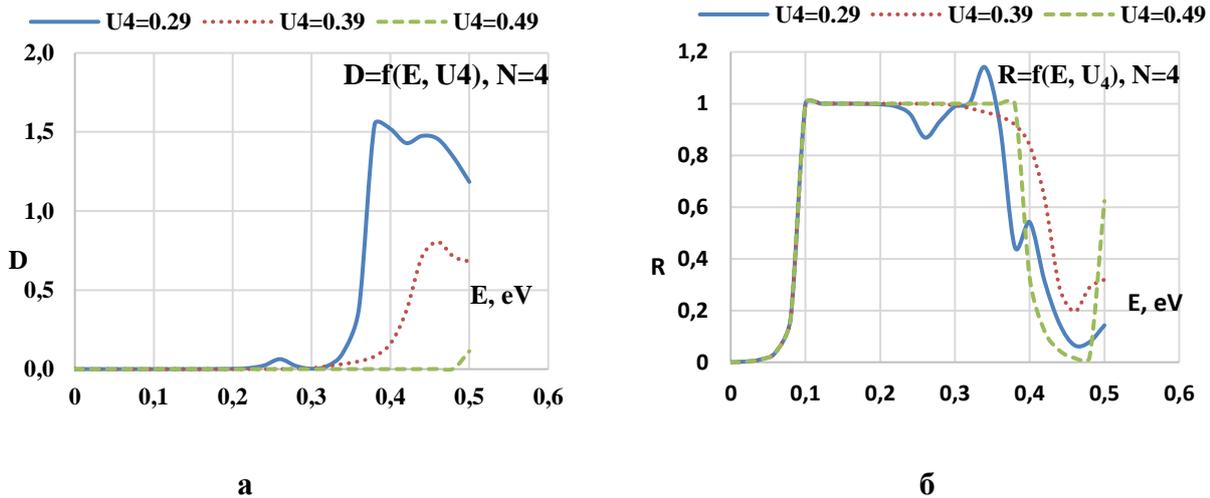


Рис. 3. Энергетические зависимости коэффициентов перехода и отражения электронов при различных значениях высоты потенциального барьера 4-го слоя ($d_1=d_2=d_3= d_4=2$ nm, $U_1=0.19$ eV, $U_2=0.29$ eV, $U_3=0.39$ eV).

Из рисунков 3-а-б, показывающих зависимость коэффициентов передачи и отражения от высоты потенциальных барьеров в четырехслойных структурах, видно, что при высоте потенциального барьера 4-го слоя $U_4 = 0,29$ эВ, электроны с энергией $E \sim 0,26$ эВ и $E \sim 0,38$ эВ появляется дополнительный максимум коэффициента перехода и дополнительный минимум коэффициента перехода электрона с энергией $E \sim 0,46$ эВ. Аналогично в коэффициенте отражения наблюдается минимум для электронов с энергией $E \sim 0,26$ эВ и $E \sim 0,38$ эВ, и максимум для электрона с энергией $E \sim 0,38$ эВ. При высоте потенциального барьера $U_4 = 0,39$ эВ наблюдается дополнительный максимум в коэффициенте перехода электронов с энергией $E \sim 0,46$ эВ и дополнительный минимум в коэффициенте отражения.

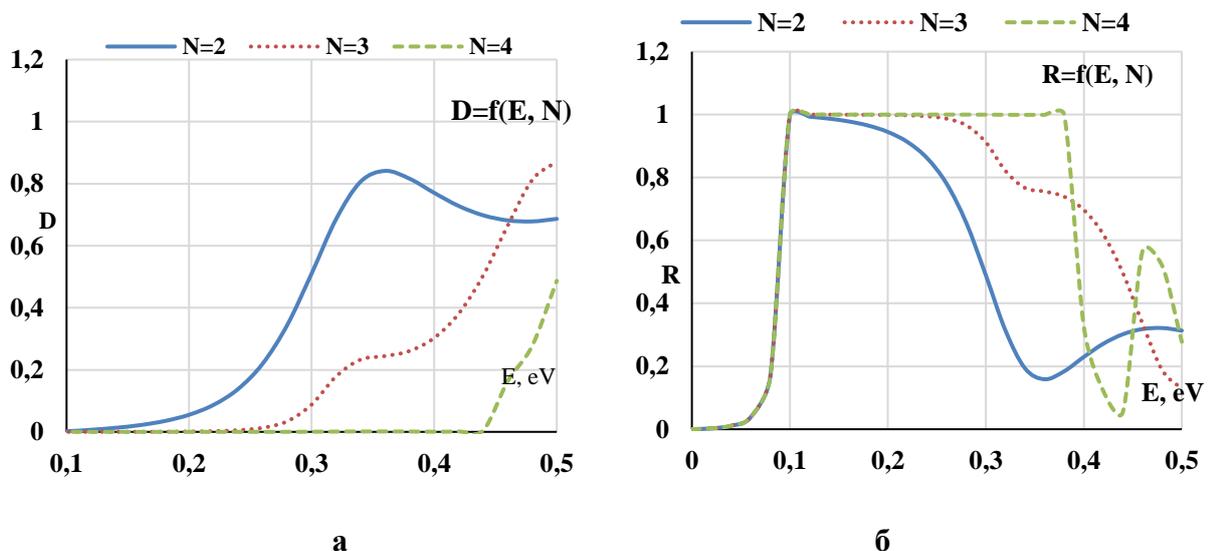
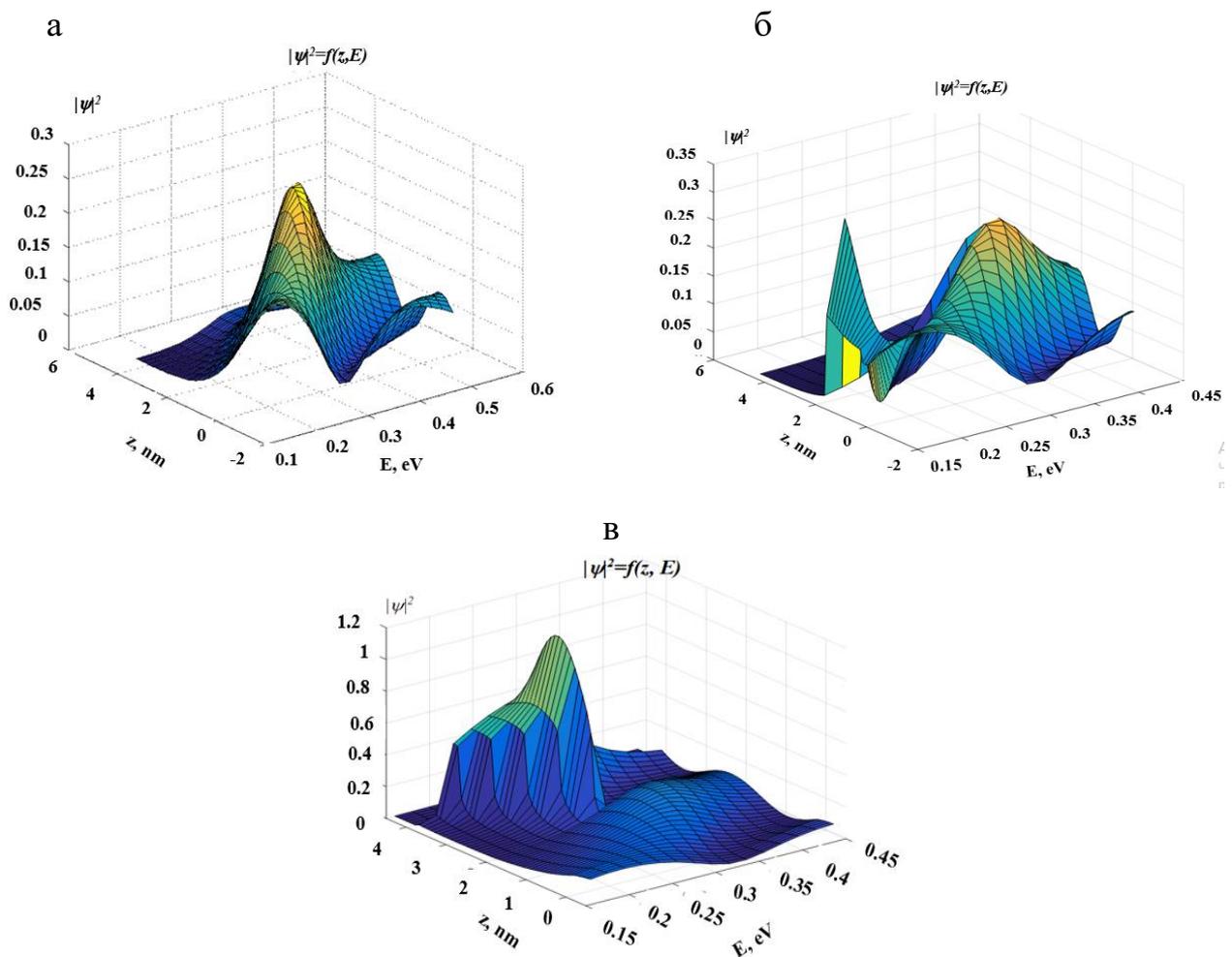


Рис. 4 Энергетические зависимости коэффициентов перехода и отражения электронов в двух-, трех- и четырехслойных структурах ($d_1=d_2=d_3= d_4=2$ nm, $U_1=0.19$ eV, $U_2=0.29$ eV, $U_3=0.39$ eV, $U_4=0.49$ eV).

На рисунках 4 представлены энергетические зависимости коэффициентов перехода и отражения электронов в двух-, трех- и четырехслойных структурах. Как видно из графиков, при изменении энергии электронов от 0 до 0,46 эВ коэффициент перехода двухслойной структуры высок, а затем велик коэффициент перехода трехслойных структур. Из рис. 5-б видно, что коэффициент перехода электронов для всех слоистых структур изменяется одинаково при увеличении энергии от 0 до 0,12 эВ. Коэффициент отражения наиболее в четырехслойной структуре при изменении энергии электронов от 0,12 эВ до 0,4 эВ, а затем уменьшается по тригонометрическому закону.

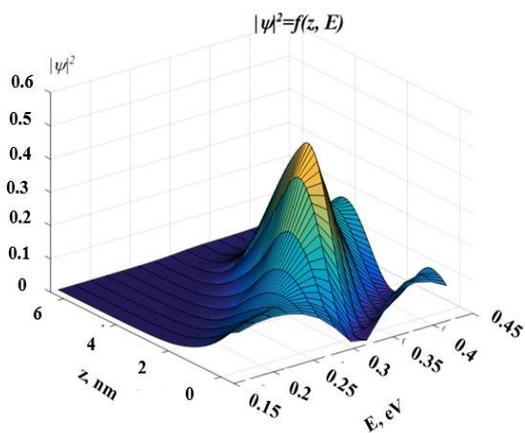


5 Рис. Зависимость $|\psi|^2$ от координаты в двухслойных структурах при высотах потенциальных барьеров $U_1=0,19$ эВ, $U_2=0,29$ эВ при отсутствии (а) и при приложении электрического поля $U_E=0,1$ эВ к слою 1 (б), к слою 2 (в) и слою при различных значениях энергии электронов.

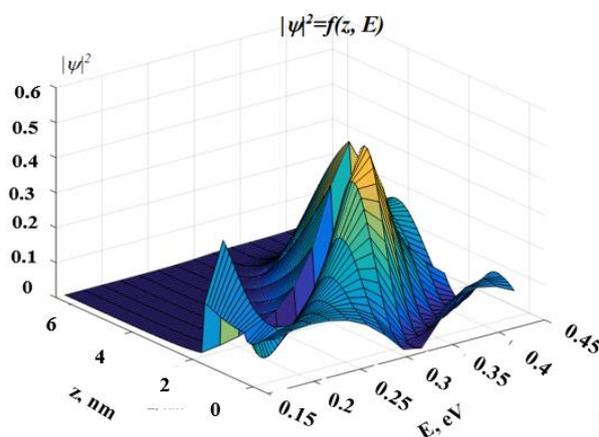
На рисунках 5 представлена координатная зависимость вероятности обнаружения электронов с разными энергиями при отсутствии приложения и при приложении электрического поля $U_E=0,1$ эВ в двухслойных структурах к первому и второму слоям. Как видно из рисунков, вероятность нахождения

электрона с энергией $E=0,32$ эВ в районе $\sim 1,5$ нм наибольшая, когда электрическое поле отсутствует, все электроны могут пройти через барьеры. При приложении электрического поля к 1-му слою наблюдаются дополнительные максимумы вероятности обнаружения электрона с энергией $E=0,32$ эВ в районе $\sim 1,9$ нм. При приложении электрического поля ко 2-му слою вероятность обнаружения электронов с энергией $E=0,22-0,28$ эВ в районе $\sim 3,0$ нм резко возрастает. Все электроны могут проходить через барьеры. Результаты показывают, что в двухслойных структурах целесообразно размещать электрическое поле во 2-м слое.

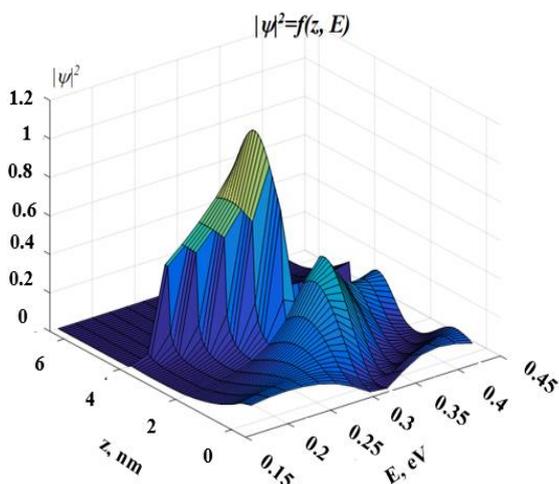
а



б



в



г

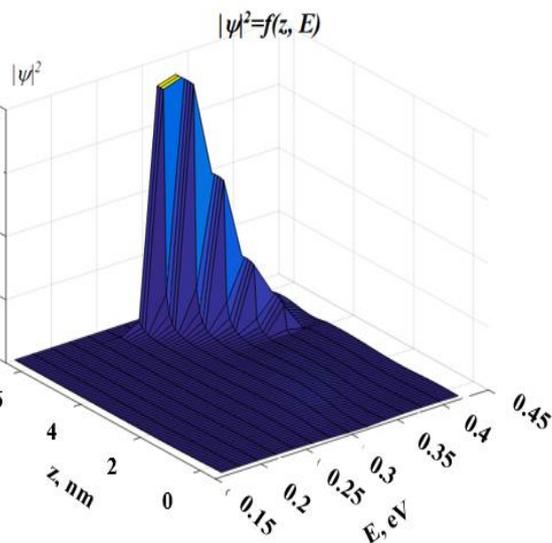


Рис. 6. Зависимость $|\psi|^2$ от координаты в трехслойных структурах при высотах потенциальных барьеров $U_1=0,19$ эВ, $U_2=0,29$ эВ, $U_3=0,39$ эВ при отсутствии (а) и при приложении электрического поля $U_E=0,1$ эВ к слою 1 (б), к слою 2 (в) и слою 3 (г) при различных значениях энергии электронов.

На рисунках 6 представлена координатная зависимость вероятности обнаружения электронов в трехслойных структурах с разными энергиями при отсутствии и при приложении электрического поля $U_E=0,1$ эВ к первому, второму и третьему слоям. Из рисунков видно, что в трехслойных структурах, когда не приложено электрическое поле, вероятность обнаружения электронов с энергией $E=0,32$ эВ наибольшая вокруг $\sim 1,8$ нм. При приложении электрического поля к 1-му слою наблюдается дополнительный максимум вероятности обнаружения электрона с энергией $E=0,18$ эВ в районе $\sim 1,9$ нм, а максимумы при $E=0,32$ эВ разделяются на два. При приложении электрического поля ко 2-му слою увеличивается вероятность обнаружения электронов с энергией $E=0,24-0,3$ эВ в районе $\sim 3,3$ нм. При приложении электрического поля к 3-му слою вероятность обнаружения электронов с энергией $E=0,3-0,38$ эВ в районе $\sim 5,5$ нм резко возрастает. Результаты показывают, что в трехслойных структурах целесообразно размещать электрическое поле в третьем слое.

В последние годы выполнено множество научных исследований и технических разработок электронных устройств, основанных на туннелировании электронов в трехслойных структурах с двойным потенциальным барьером (GaAs-Al_xGa_{1-x}As-GaAs), разделенных квантовой ямой, и взаимодействии этих электронов с уровнями энергии размерного квантования в ямах⁶. Получение столь тонких слоев стало возможным лишь с развитием современных технологий, в частности, молекулярно-лучевой эпитаксии. Как известно, критерием перехода к размерному квантованию является уменьшение толщины слоя до величины порядка длины волны де Бройля электрона. Именно с этого момента основными характеристиками электрона и его взаимодействия с внешней средой становятся его волновые свойства.

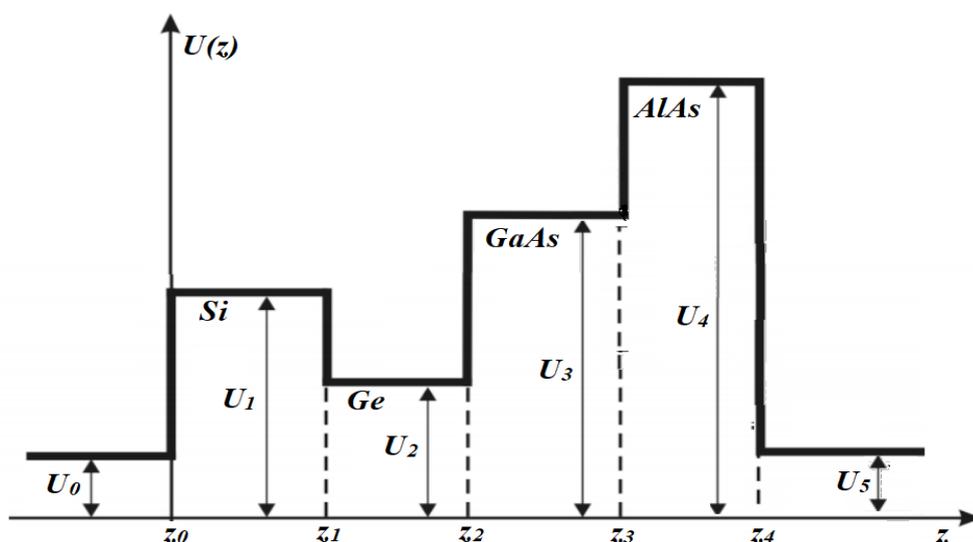


Рис. 7. Кремниевая четырехслойная наноструктура (Si-Ge-GaAs-AlAs).

⁶ Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. -М. Логос, 2000. -248 с. ISBN 5-88439-045-9; Усанов Д.А. др. Компьютерное моделирование наноструктур: Учеб. пособие. – Саратов, 2013. –100 с.

На основе упомянутой программы и полученных с её помощью результатов рассмотрим четырёхслойные кремниевые наноструктуры (рис. 7). В таблице 1 приведены основные параметры некоторых полупроводников. Из них для кремния выбраны Ge, GaAs и AlAs, поскольку постоянные решётки этих полупроводников близки, а запрещённые зоны (потенциальные барьеры) возрастают равномерно.

Табл. 1. Основные параметры некоторых полупроводников

Материал	Кристаллическая структура	Постоянная решетки, нм	Ширина запрещенной зоны, эВ	Эффективная масса, m/m_e
3C-SiC	кубическая	0.436	2.36	0.29
GaN	кубическая	0.45	3.2	0.18
Si	алмазаподобная	0.5341	1.11	0.26
Ge	алмазаподобная	0.5657	0.66	0.22
GaAs	кубическая	0.5653	1.42	0.067
AlAs	кубическая	0.5661	2.16	0.15
GaP	кубическая	0.545	2.26	0.15
ZnSe	кубическая	0.567	2.7	0.16
InP	кубическая	0.587	1.35	0.08
PbS	кубическая	0.594	0.41	0.09
InAs	кубическая	0.6058	0.36	0.023
GaSb	кубическая	0.61	0.72	0.039
AlSb	кубическая	0.6135	1.58	0.12
InSb	кубическая	0.6479	0.17	0.014
CdTe	кубическая	0.648	1.5	0.11
$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	кубическая	0.5869	0.75	0.041
HgCdTe	кубическая	0.64–0.65	0.1–1.5	0.015–0.1
AlN	гексагональная	a=3.11, c=4.98	6.2	0.3
ZnO	гексагональная	a=3.25, c=5.2	3.37	0.24
CdS	гексагональная	a=4.13, c=6.74	2.42	0.21

На рисунках 8. показаны зависимости вероятности нахождения электронов от координаты и энергии при отсутствии электрического поля и при приложении электрического поля к 1-му, 2-му, 3-му и 4-му слоям в кремниевой четырехслойной наноструктуре (в каждом слое по 8 атомных слоев) (Si-Ge-GaAs-AlAs: $m_1=0,26$, $m_2=0,22$, $m_3=0,067$, $m_4=0,15$; $U_1=0,555$ эВ, $U_2=0,33$ эВ, $U_3=0,71$ эВ, $U_4=1,08$ эВ; $d_1=4,2728$ нм, $d_2=4,5256$ нм, $d_3=4,5224$ нм, $d_4=4,5288$ нм).

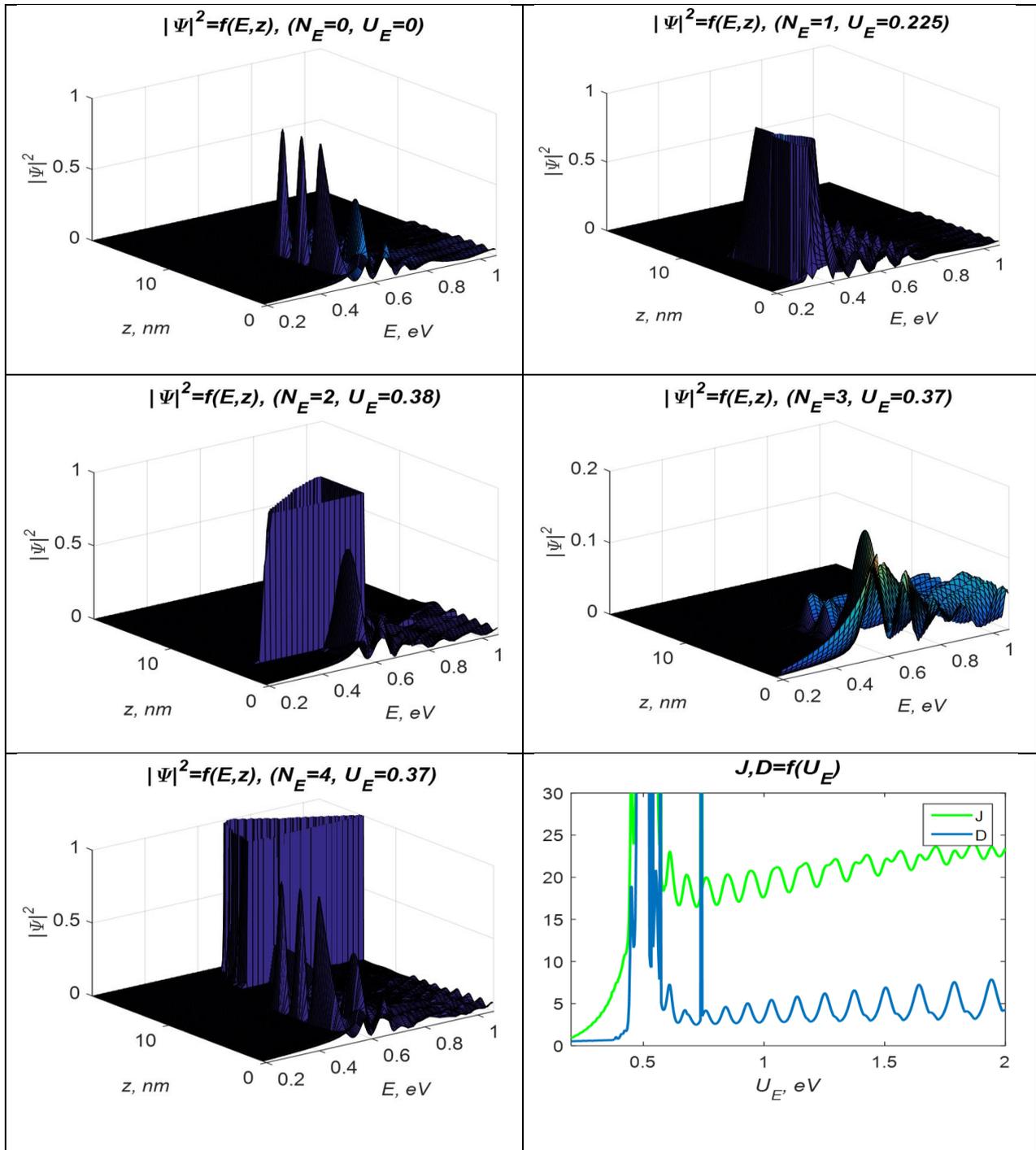


Рис. 8. Зависимость вероятности нахождения электронов от координаты и энергии в отсутствие электрического поля и при приложении электрического поля к 1-му, 2-му, 3-му и 4-му слоям в кремниевой четырехслойной наноструктуре (Si-Ge-GaAs-AlAs: $m_1=0,26$, $m_2=0,22$, $m_3=0,067$, $m_4=0,15$; $U_1=0,555$ эВ, $U_2=0,33$ эВ, $U_3=0,71$ эВ, $U_4=1,08$ эВ; $d_1=4,2728$ нм, $d_2=4,5256$ нм, $d_3=4,5224$ нм, $d_4=4,5288$ нм).

Как видно из рисунков, при отсутствии электрического поля вероятности нахождения электронов появляются пики около точек (0,56 эВ; 4,3, 6,3, 8,2 нм), (0,6 эВ, 1,9 нм) и (0,68 эВ, 1,0 нм). При приложении электрического поля к 1-му слою появляются пики в вероятности нахождения электронов с энергией 0,34-0,42 эВ около точек 1,7-2,7 нм, из которых максимум в точке (0,34 эВ, 2,7 нм) является наибольшим. При приложении электрического поля ко 2-му слою вероятность нахождения электронов с энергией (0,56-0,7 эВ) в точках (4,3-7,4 нм) резко возрастает. При приложении электрического поля к 3-му слою максимумы уменьшаются. При приложении электрического поля к 4-му слою резко возрастает вероятность нахождения электронов с энергией более 0,56 эВ в точках более ~13 нм, т. е. все электроны с такими энергиями могут свободно проходить через четырехслойную наноструктуру. На рисунке 8-е представлена зависимость плотности тока и коэффициента переноса от электрического поля, приложенного к 4-му слою. Как видно из графика, законы изменения плотности тока и коэффициента переноса одинаковы — их значения осциллируют. Так, они имеют острые пики при электрическом поле 0,525 эВ (1,08-0,525=0,555) и 0,740 (1,08-0,75=0,33) эВ. Причина этого в том, что при данных значениях электрического поля резонанс наступает, когда разность высоты барьера четвертого слоя и электрического поля становятся равными высотам потенциальных барьеров первого и второго слоев, а длина волны де Бройля электрона приближается к толщине слоя.

Рассмотренная программа и полученные с ее помощью результаты могут быть использованы в будущем для проектирования и изготовления полупроводниковых многослойных квантовых наноструктур.

Диссертация называется в третьей главе, озаглавленной «**Ток фотоэмиссии из наночастиц**», представлены методы решения уравнения Шредингера, описывающего испускание электрона из наночастицы путем поглощения света, с использованием теории возмущений. Также получены выражения для амплитуды вероятности фотоэмиссии и тока фотоэмиссии с учетом изменения электромагнитного поля, эффективной массы электрона и потенциала на границе раздела металл-полупроводник. Полученные выражения были применены к фотоэмиссии кремния из наночастиц.

Одним из явлений, связанных с переносом носителей заряда при возбуждении ЛПП в наночастицах, является фотоэмиссия из наночастиц. Фотоэмиссия из наночастиц существенно отличается от фотоэмиссии из «макроскопических» металлических структур, поскольку, во-первых, при возбуждении ЛПП сильно возрастает ЭМ поле внутри частицы и снаружи ее, в областях, близких к поверхности наночастицы; во-вторых, отношение поверхности наночастицы к ее объему значительно больше, чем у макроскопических структур. Для определения количества фотоэмиссии из наночастиц и определения оптимальных параметров, при которых фотоэмиссия из наночастиц максимальна, необходимо рассчитать ток фотоэмиссии из наночастиц.

На основе теории возмущений для амплитуды вероятности фотоэмиссионного электрона, движущегося в направлении, перпендикулярном границе расщепления получено выражение

$$C_+(\infty) = \frac{|e|m}{\hbar\omega W_1} \int_{-\infty}^{\infty} dz (E_m \frac{d\Psi_0}{dz} \Psi_{1-} + \frac{1}{2} \Psi_{1-} \Psi_0 \frac{dE_m}{dz}) \quad (9)$$

В общем случае амплитуда вероятности фотоэмиссии записывается в виде

$$C_+(\infty) = \frac{|e|m}{W_1(\hbar\omega)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dz (C_V + C_E + C_m) / m \quad (10)$$

где C_V , C_E , C_m - описывают фотоэмиссию с учетом изменения потенциала, электромагнитного поля и массы электрона на границе раздела:

$$C_V = -EV' \Psi_0 \Psi_{1-}, \quad (11)$$

$$C_E = E' \{ (\hbar^2/2m) \Psi_0' \Psi_{1-}' + [E_0 - V + \hbar\omega/2] \Psi_0 \Psi_{1-} \}, \quad (12)$$

$$C_m = Em' / m [E_0 - V + \hbar\omega/2] \Psi_0 \Psi_{1-} \quad (13)$$

Фотоэмиссионный ток из металлических наночастиц определяется выражением

$$J_{ph-em} = C_{em} |F|^2 K_{geom} |E|^2 \quad (14)$$

где

$$C_{em} = \frac{e^2 k T V^2}{\pi^2 \hbar^5 \omega^4} \int dx [1 + (\hbar\omega/V - 1)/x]^{1/2} \ln(1 + \exp(\frac{E_f - Vx}{kT})) U(x) |K_{dis}(x)|^2 - \text{вероятность}$$

фотоэмиссии;

$$U(x) = \frac{4r_m^2}{(r_m + 1)^2} \frac{x}{[x + r_m(1-x)] \{ (x + \hbar\omega/V)^{1/2} + [r_m(x + \hbar\omega/V - 1)]^{1/2} \}^2},$$

$$K_{dis}(x) = \frac{1}{2} (1 + \varepsilon_- / \varepsilon_+) [1 + \frac{1-r_m}{1+r_m} (2x + \hbar\omega/V - 1)] + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon_- / \varepsilon_+) [x + \hbar\omega/V]^{1/2} + i(1-x)^{1/2}]^2$$

$$F = \frac{1}{1 + R_{dep} - iR_{rad}} \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L} -$$

- функции, учитывающие изменения электрического поля на границе,

$$R_{dep} = \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L} (A\varepsilon_+ y^2 + B\varepsilon_+^2 y^4), \quad R_{rad} = \frac{16}{9r} \left(\frac{\pi m_+ a}{\lambda} \right)^3 \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L},$$

$$L = \frac{r^2}{2} \int \frac{du}{(u+r^2)^2 (u+1)^{1/2}} -$$

- функции, учитывающие деполяризацию и радиационных потер,

$$\varepsilon_-(\lambda) = \varepsilon_m(\lambda) + (\lambda/\lambda_p)^2 \left[\frac{1}{1+i\lambda/\lambda_f} - \frac{1}{1+(i\lambda/\lambda_f)(a_c/a+1)} \right], \quad \varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon_\infty + (\lambda/\lambda_p)^2 \frac{1}{1+i\lambda/\lambda_f},$$

$$\varepsilon_+(\lambda) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^3 \frac{C_i}{1 - \left(\frac{1.242}{\lambda E_i}\right)^2 - i \frac{1.242}{\lambda E_i} \gamma_i} - F_1 \chi_1^{-2}(\lambda) \ln[1 - \chi_1^2(\lambda)] - F_2 \chi_2^{-2}(\lambda) \ln \frac{1 - \chi_1^2(\lambda)}{1 - \chi_2^2(\lambda)}$$

- диэлектрические функции металлов и кремния.

На основе приведенных выражений была создана программа в Visual Basic для расчета плазмонных параметров металлов, а также тока фотоэмиссии и напряженности электрического поля от наночастиц металлов в зависимости от длины волны. Программа позволяет вводить и изменять работу выхода, энергию Ферми, эффективную массу электрона, параметры плазмоны, размера наночастиц и многое другое.

Результаты расчетов представлены в виде графиков.

На рис. 8 представлены результаты расчета спектральной зависимости напряженности электрического поля фотоэлектронной эмиссии (F^2) металлических наночастиц в кремнии. Как видно из рисунка, наибольшее значение интенсивности достигается для золота.

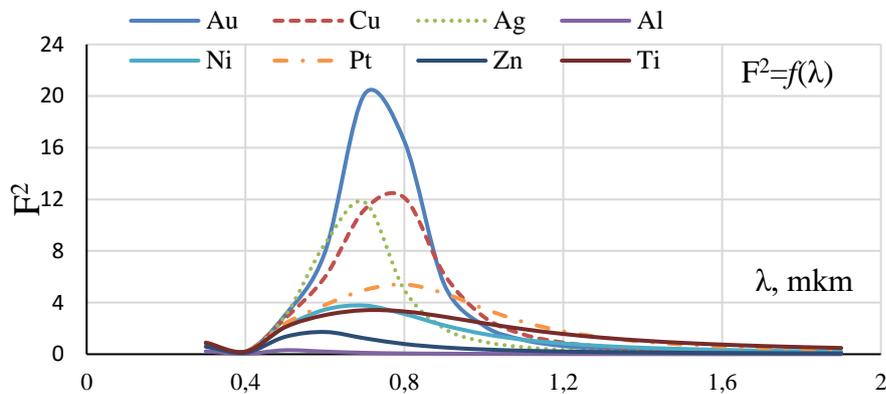


Рис. 8. Зависимость увеличения напряженности электрического поля фотоэлектронной эмиссии (F^2) металлических наночастиц в кремнии.

На рис. 9 представлены результаты расчета спектральной зависимости тока фотоэмиссии (J_{fem}) металлических наночастиц в кремнии. Как видно из рисунка, наибольшее значение тока фотоэмиссии соответствует серебру и меди.

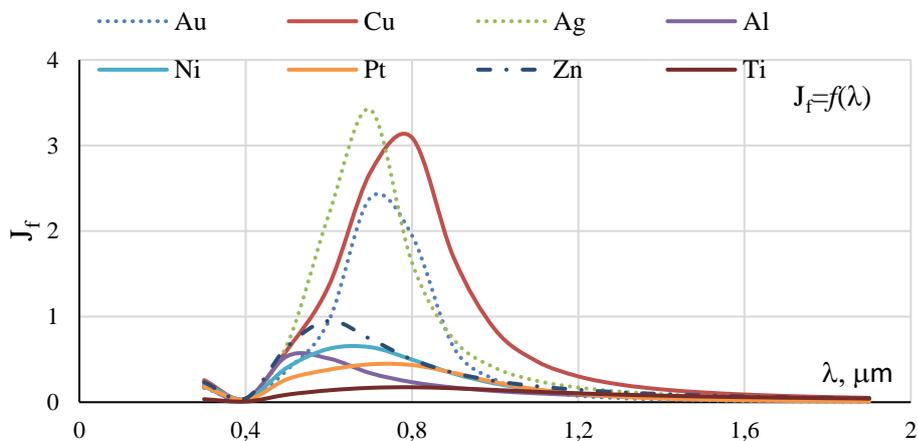


Рис. 9. Спектральная зависимость тока фотоэмиссии (J_{fem}) металлических наночастиц в кремнии.

Так, разработана программа на Visual Basic для расчета плазменных параметров металлов, а также напряженности электрического поля и токов фотоэмиссии внутри наночастицы в зависимости от длины волны падающего света. Программа позволяет вводить и изменять значения работы выхода, энергии Ферми, эффективной массы электрона, параметров плазмона, размеров наночастиц и т.д. В единой программной среде результаты расчетов экспортируются в MS Excel и выражаются не только в табличной, но и графической форме. Показано, что в качестве материала наночастиц можно использовать не только драгоценные золото и серебро, но и медь. Кроме того, наночастицы меди имеют самые высокие значения тока фотоэмиссии.

Четвертая глава диссертации под названием «**Основные параметры реальных солнечных элементов**» рассказывает о технологии изготовления, устройстве, принципе работы и этапах разработки солнечных элементов. Также описаны перспективы солнечной энергетики, основные характеристики солнечных элементов, параметры реальных солнечных элементов и метод наименьших квадратов для их определения.

Известно, что вольт-амперная характеристика реального солнечного элемента выражается уравнением

$$J = J_f - J_0 \left(\exp \left(\frac{e(U + JR_k)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{JR_k + U}{R_p} \quad (15)$$

где J_f – фототок, J_0 – ток насыщения, e – заряд электрона, A – коэффициент идеальности, k – постоянная Больсмана, T – температура, R_k – последовательное сопротивление, R_p – параллельное сопротивление.

Вольт-амперная характеристика является важнейшей характеристикой солнечного элемента, поскольку определяет эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую: поскольку КПД солнечного элемента зависит от формы его ВАХ, определяются параметры, входящие в уравнения вольт-амперной характеристики. Поэтому разработка солнечных элементов требует использования методов надежного определения их параметров.

Существует множество способов определения параметров солнечного элемента по его вольт-амперной характеристике. Некоторые из них основаны на использовании нескольких вольт-амперных характеристик, полученных при разных интенсивностях излучения или при разных значениях внешнего электрического тока, что недопустимо из-за радиационной зависимости параметров КЭ. Поэтому наиболее подходящими методами определения параметров солнечных элементов являются методы, использующие для расчетов одну вольт-амперную характеристику⁷.

Приближения, используемые при реализации методов определения параметров солнечного элемента, а также величины, определяемые экспериментально и используемые в расчетах цитируются в работах

⁷ Элзеин И., Петренко Т.П. Прогнозирующая модель управления системой обеспечения максимальной выходной мощности фотоэлектрической станции. // Системный анализ и прикладная информатика, 2015, №4, С.17-25.

М.Тиванова⁸. Оптимальный метод определения параметров основан на использовании углов отклонения вольт-амперной характеристики к осям координат. Однако этот метод имеет ряд важных недостатков: во-первых, трудно правильно определить углы отклонения используемой при расчете вольт-амперной характеристики; во-вторых, невозможность выразить все параметры независимо. В этом методе коэффициенту диода сначала необходимо присвоить определенное значение, затем вычисляются остальные параметры, после чего коэффициент диода рассчитывается заново, используя найденные значения параметров. Цикл продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность. Однако сходимость цикла зависит от успешности выбора начального значения диодного коэффициента, что очень сложно сделать при работе с неизвестным типом солнечного элемента.

Практически во всех упомянутых выше методах при расчетах используется приближение $R_k/R_p \rightarrow 0$. если это приближение выполнено в начале, а не в середине расчета, то уравнение (15) принимает вид

$$J = J_{sc} - J_0 \left(\exp \left(\frac{e(U + JR_s)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p} \quad (16)$$

и вычисления значительно упрощаются.

Предлагаемый нами метод не использует это приближение. Предполагая коэффициент идеальности $A=1$, используя уравнение ВАХ (15) и значения его производных в точках тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, для определения последовательного сопротивления формируется следующее трансцендентное

уравнение⁹:

$$\frac{(1 + bR_s)e(1 + aR_s)(C_1 - C_2)}{AkT(a - b)} - \frac{J_{sc}R_s(C_1 - 1) + U_{oc}(1 - C_2)}{J_{sc}^2R_s} = 0 \quad (17)$$

где

$$C_1 = \exp \left(\frac{eU_{oc}}{AkT} \right);$$

$$C_2 = \exp \left(\frac{eJ_{sc}R_s}{AkT} \right);$$

$a=J'(0)$; $b=J'(U_{oc})$; J_{sc} - ток короткого замыкания; U_{oc} - напряжение холостого хода.

После определения последовательного сопротивления определяются параллельное сопротивление и ток насыщения

$$R_p = R_s \frac{(C_1 - 1)}{(1 - C_2)} + \frac{U_{oc}}{J_{sc}} \quad (18)$$

⁸ Tivanov M. et al. Determination of solar cell parameters from its current–voltage and spectral characteristics.// Solar energy materials and solar cells, 2015, v. 87 (1-4), p. 457-465.

⁹ Насиров М.З. Метод наименьших квадратов на основе “Mobile Basic” // *Universum: Технические науки*, 2021, № 1(82), с. 11-14.

$$J_0 = \frac{J_{sc} R_s}{R_p (1 - C_2)} \quad (19)$$

Для определения коэффициента идеальности солнечного элемента воспользуемся методом «наименьших квадратов». Как известно, в этом методе для удовлетворительного описания экспериментальных данных выражение (15) должно быть минимальным среднее квадратичное отклонение

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[J_{sc} - J_0 \left(\exp \left(\frac{e(U_i + J_i R_s)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{J_i R_s + U_i}{R_p} - J_i \right]^2 \quad (20)$$

Для этого производная по A от выражения (20) должно быть равным нулю

$$\frac{d\chi^2}{dA} = \sum \left\{ J_q - J_0 \left(\exp \left(\frac{e(U_i + J_i R_k)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{J_i R_k + U_i}{R_p} - J_i \right\} \exp \left(\frac{e(U_i + J_i R_k)}{AkT} \right) (U_i + J_i R_k) = 0 \quad (21)$$

На основе значения A , определенного этим методом, уточняются найденные выше параметры (R_k , R_p , J_0). После определения всех параметров максимальную мощность (P_m) и соответствующие ей ток (J_m) и напряжение (U_m) определяют из условия равенства нулю производной выражения мощности. Затем по этим величинам определяются коэффициент полезного действия (η) и коэффициент наполнения (ξ). На основе приведенных выражений и с использованием «Метода наименьших квадратов» была создана программа на языке Visual Basic для расчета основных параметров реальных солнечных элементов. Программа использует трансцендентное уравнение (17) и выражения (18), (19) для определения последовательного сопротивления (R_s), параллельного сопротивления (R_p), токов насыщения (J_0), а затем для определения вольт-амперной характеристики. коэффициент идеальности (A) путем обработки результатов, полученных в эксперименте с помощью «Метода наименьших квадратов», затем быстро определить основные параметры, такие как максимальная мощность (P_m) и коэффициент полезной работы (η) и полученные результаты экспортируются в MS Excel и отображать в виде графика. В программе также возможно получение результатов, полученных в эксперименте по вольт-амперной характеристике, через специальные окна на экране или через MS Excel. Точность расчета контролируется значением среднеквадратического отклонения (χ^2). Результаты предварительных расчетов представлены в таблице 1 и на рисунке 12.

Таблица 1. Основные параметры кремниевого солнечного элемента

χ^2	$9.52 \cdot 10^{-4}$	J_m, A	0.0331
J_0, A	0.841	U_m, V	0.48
A	1.012	P_m, Vt	0.0159
R_s, Om	0.389	ff	0.784
R_p, MOm	2374	η	15.92%
J_{sc}, A	0.035	U_{oc}, V	0.58

Как видно из результатов, представленных в таблице 1, рассчитанные параметры очень близки к экспериментальным результатам. Это также видно по значению среднеквадратичного отклонения (χ^2).

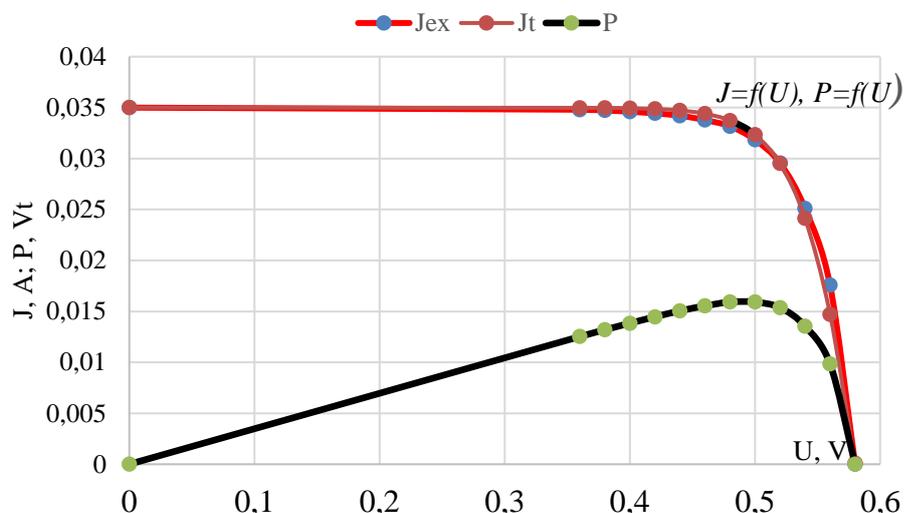


Рис. 12. Вольт-амперная и вольт-ваттная характеристика солнечного элемента.

Таким образом, в данной главе был предложен метод определения основных параметров реальных солнечных элементов путем решения одного трансцендентного уравнения и обработки результатов, полученных в эксперименте по вольт-амперной характеристике с использованием «Метода наименьших квадратов». Преимуществом предлагаемого метода является использование одной вольт-амперной характеристики и контроль точности расчета параметров солнечного элемента. Близость результатов расчета к результатам эксперимента свидетельствует об эффективности метода. Предлагаемые метод и программа помогут создать систему мониторинга свойств солнечных элементов и усовершенствовать методы определения их параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате тщательного анализа основных электрофизических свойств многослойных наноструктур и кремния с введенными наночастицами с помощью численного моделирования сделаны следующие основные выводы:

1. Установлено, что коэффициент перехода электронов через барьеры в многослойных структурах изменяется обратно пропорционально толщине и высоте слоев при изменении энергии электронов от 0,25 эВ до 0,43 эВ, а при высотах потенциальных барьеров 1-го и 4-го слоев 0,29 эВ и 0,39 эВ в коэффициенте переноса появляются дополнительные максимумы и минимумы, обусловленные возникновением квазисвязанных состояний в результате интерференции проходящих и отраженных от границ слоев электронных волн.

2. Исследования зависимости коэффициента переноса электронов через барьеры в многослойных структурах от числа слоев показали, что коэффициент переноса одинаков для всех слоев при изменении энергии электронов от 0 до

0.12 эВ, высок в двухслойных структурах при ее изменении от 0.12 эВ до 0.46 эВ, а затем уменьшается по тригонометрическому закону.

3. Впервые анализ движения электронов в кремниевых четырехслойных наноструктурах показал, что наибольшая эффективность достигается при приложении электрического поля к четвертому слою, что электроны могут проходить сквозь барьеры под действием электрического поля, даже если их энергия меньше высоты барьера, а зависимость коэффициента переноса электронов и плотности тока от электрического поля носит осциллирующий характер.

4. Показано, что локализованный плазмонный резонанс возникает в сферических наночастицах, расположенных в кремнии p-типа, что наночастицы создают ток фотоэмиссии в несколько раз выше, чем у сплошного металла, и что в качестве материала наночастиц можно использовать не только драгоценное золото, но и медь.

5. Предложен метод быстрого и простого определения основных параметров реальных солнечных элементов путем решения одного трансцендентного уравнения и обработки экспериментальных результатов вольт-амперной характеристики с использованием «Метода наименьших квадратов». Предложенный метод позволит создать систему контроля свойств солнечных элементов и усовершенствовать методы определения их параметров.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE
NAMANGAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

ANDIJAN STATE UNIVERSITY

MATBOBOYEVA SAIDAKHON DILMUROD KIZI

**STUDY OF THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES
OF NANO-SILICON PHOTOELECTRIC TRANSDUCERS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Namangan – 2025

The theme of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2023.4.PhD/FM987. The dissertation was carried out at the Andijan State University.

The abstract of the dissertation was posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of “ZiyoNet” information and educational portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor: **Nosirov Murodjon Zakirovich**
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
professor

Official opponents: **Onarqulov Karimberdi Egamberdiyevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Atamuratov Atabek Egamberdiyevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Qarshi state university**

The defense of the dissertation will be held at 9⁰⁰ on October 24, 2025 at the meeting of Scientific Council PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan State Technical University. (Address: 160115, Namangan city, Kasansay Str. 7, Building 6, 1st floor, Scientific Council room, phone: (+99869)228-76-68, 225-10-07, Fax: (+99869) 228-76-75. e-mail: info@namdtu.uz)

You can get acquainted with the dissertation work at the Information Resource Center of the Namangan State Technical University (registration number No. ____). Address: 160115, Namangan city, I.Karimov Str 12, tel. (+99869) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75.

The abstract of the dissertation was sent on October 24, 2025.
(mailing protocol No. 5 on October 24, 2025)

U.I. Erkaboev
Chairman of Scientific Council on award of Scientific
Degrees, Doctor of Physical-mathematical sciences, Professor

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

N.Yu.Sharibayev
Vice-Chairman of the academic seminar under
the Scientific Council awarding Scientific Degrees,
Doctor of Physical-Mathematical Science, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the study is to determine the conditions for increasing the efficiency of photovoltaic converters by investigating the properties of charge carriers in multilayer nanostructures based on numerical modeling based on the laws of quantum physics.

The object of the research is a electron motion in quantum nanostructures modeled using digital technology.

The subject of the research is of structural parameters and external influences on the motion of electrons in quantum nanostructures modeled using digital technology

The scientific novelty of the research is as follows:

It was established that in multilayer nanostructures, additional maxima and minima of the electron transmission coefficient through barriers arise due to the emergence of quasi-bound states due to the interference of de Broglie waves passing through and returning from the layer boundaries;

For the first time, numerical modeling of electron motion in silicon four-layer nanostructures established that the greatest efficiency is achieved by applying an electric field to the fourth layer, that electrons can pass through barriers under the influence of an electric field, even if their energy is less than the barrier height, and that the dependence of the electron transport coefficient and current density on the electric field is oscillatory;

A new method has been developed that makes it possible to create a system for monitoring the properties of real solar cells and improve methods for determining their parameters by solving a transcendental equation using the values of the I–V equation and its derivative at the short-circuit current and peak operating voltage points;

It was shown that when spherical nanoparticles are placed on p-type silicon photovoltaic converters and irradiated with broad-spectrum sunlight, a localized plasmon resonance occurs. A sharp increase in the electric field within the nanoparticles leads to the generation of a photoemission current several times greater than that of a solid metal. It was shown that not only precious gold and silver, but also copper, can be used as a nanoparticle material, increasing efficiency to 2%.

The practical results of the research are as follows:

Software products have been developed for computer modeling of electron motion in multilayer nanostructures, particularly in 2-, 3-, and 4-layer structures;

When applying the developed software products to four-layer nanosilicon structures, additional maxima were observed in the electron transmission and return coefficients, with the greatest efficiency achieved when applying an electric field to the fourth layer.

Application of research results:

Based on the results of numerical modeling of the fundamental electrophysical properties of multilayer nanostructures and silicon with the introduction of nanoparticles: The scientific results obtained from numerical modeling of charge carrier motion in multilayer nanosilicon structures have been implemented at Foton JSC (JSC Application No. 58, April 14, 2025). As a result, they are recommended for

wider use in improving new semiconductor multilayer and optoelectronic devices, including solar photovoltaic converters, photodetectors, photocatalysts, sensors, and nanoscale LEDs, as well as increasing their efficiency.

The obtained scientific results on the effect of gold, silver, and copper nanoparticles on photovoltaic converters were implemented during the implementation of the scientific and practical project FZ-201906066 "Development of a Technology for the Production of Solid Oxide Fuel Cells Based on Rare Earth Metals" at the Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan for 2021-2023 (Reference No. 19 of the Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan dated January 25, 2025). The results demonstrated that the photovoltaic properties of silicon with the introduction of copper nanoparticles are more effective than those of silicon with the introduction of gold and silver nanoparticles.

Dissertation structure and size. The dissertation consists of an introduction, four chapters, general conclusions, a bibliography, and appendices. It is 118 pages long.

E'lon qilingan ishlar ro'yhati

I-bo'lim.

1. **S.Matboboyeva**, M.Nosirov Real quyosh elementlarining asosiy parametrlari. (monografiya), Andijon, 2024, 112 b. ISBN: 978-9910-769-90-0-3061.
2. M.Nosirov, **S.Matbabayeva**, N. Mirzaalimov, A. Mirzaalimov, I. Gulomova Photoemission Current from Metal Nanoparticles in Silicon// Journal of nano- and electronic physics, 2024, V. 16, № 5, 05026(4pp). (№ 3, Scopus).
3. M.Z.Nosirov, **S.D.Matbabayeva**, R.Aliyev The Influence of Electric Field on the Motion of Electrons in Multilayer Quantum Nanostructures //Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2025, Vol. 61, No. 5, pp. 781–786. © Allerton Press, Inc., 2025, ISSN 1068-3755. Russian Text © The Author(s), 2025, published in Elektronnaya Obrabotka Materialov, 2025, No. 5, pp. 177–184. DOI: 10.3103/S1068375525700851 (№ 3, Scopus).
4. M.Nosirov, **S.Matboboyeva**, S.Jonibekova Elektronning kvant nanostrukturalardagi harakatini modellashtirish //NamDU ilmiy axborotnomasi, 2024, № 2, 57-65 b. (№14 01.00.00.).
5. M.Nosirov, **S.Matboboyeva**, S.Jonibekova Elektronning ko'p qatlamli kvant strukturalardagi harakati //QarDU xabarlar, 2024, № 1, 27-34 b.
6. M.Nosirov, **S.Matboboyeva**, N.Mirzaalimov Real quyosh elementlarining parametrlarini aniqlashda eng kichik kvadratlar usuli //NamDU ilmiy axborotnomasi, 2024, № 4, 62-67 b. (№14 01.00.00.).
7. R.U.Aliev, M.Z.Nosirov, **S.D.Matboboyeva** Elektronning ko'p qatlamli nanostrukturalardagi harakatiga elektr maydonining ta'siri // Scientific bulletin Physical and Mathematical Research, 2024, t. 2, 9-14 b. (№13 01.00.00.).
8. M.Z.Nosirov, **S.D.Matboboyeva**, N.M.Yuldasheva, S.D.Jonibekova Elektronning kremniyli to'rt qatlamli nanostrukturalardagi harakatiga elektr maydonining ta'siri //NamDU ilmiy axborotnomasi, 2025, № 8, 52-56 b. (№14 01.00.00.).

II-bo'lim

9. M.Z.Nosirov, **S.D.Matboboyeva**, S.D.Jonibekova Simulation of electron movement in quantum nanostructures //Science and innovation international scientific journal, 2023, v. 2, № 12, pp.296-301 <https://doi.org/10.5281/zenodo.104332606>
10. **S.D.Matboboyeva** Real quyosh elementlarining asosiy parametrlari. "Problems, solutions, methods of teaching modern physics and astronomy", Int. scientific and practical conference, Tashkent, april 16, 2024, p. 139-143.
11. M.Nosirov, S.Matboboyeva, N.Yuldasheva, R.Aliev The influence of electric field on the motion of electrons in multilayer quantum nanostructures. Materials of the XXVI International scientific and practical conference Renewable energy and energy efficiency in the XXI century, may 21–23, 2025, Kyiv, p.50-51.
12. **S.Matboboyeva**, S.Jonibekova, S.Temirov Turli potentsiallar uchun elektronning ikki qatlamli nanostrukturalardagi harakati. "Zamonaviy fizika va energetikani fundamental va amaliy muammolari" mavzusida Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman (fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent G.Dadamirzayev

- tavalludining 80 yillik xotirasiga bagishlangan) materiallari, Namangan 5-6 iyun, 2025, 128-132 b.
13. М.Носиров, Н.Юлдашева, **С.Матбобоева** Плазмонные и электрофизические параметры металлов для наноплазмоники //Universum: Технические науки, 2024, 2(119), с. 23-28. DOI - 10.32743/ UniTech.2024.119.2.16892 (1-9). [№12 Index Copernicus, №16 Directory Indexing of International Research Journals-CiteFactor, №16 Ulrich’s Periodicals Directory, №35 CrossRef].
 14. М.Nosirov, **S.Matboboyeva**, N.Yuldasheva, J.Ziyoitdinov, M.Abdukakhkhorova Least square method in determining the basic parameters of Solar cells. XXV International Scientific and Practical Conference "Renewable energy and energy efficiency in the XXI century", Kyiv, May 22–24, 2024, p.257-258.
 15. М.Nosirov, **S.Matboboyeva**, N.Yuldasheva, M.Mirzakarimova Dielectric functions of metals for nanoplazmonics //German Internatinal journal of Modern Sciences, 2022, № 33, p. 48-52
 16. М.Nosirov, N.Yuldasheva, **S.Matboboyeva**, J.Gulomov Semi-Empirical Plasmon Coefficients of Metals for Nanoplasmonics //Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 14, No 4, 04024(3pp), 2022. [№ 3, Scopus].
 17. М.Носиров, Н.Юлдашева, **С.Матбобоева**, М.Кучкарова Численное решение уравнения Шредингера для произвольного потенциала//«Научный импульс», 2022, № 4 (100), с. 718-722.
 18. М.Носиров, **С.Матбабаева**, С.Жанибекова Движения электрона в многослойных квантовых наноструктурах. Colletions of scientific works of int. onlain conf. “Innovation in the modern education system”, Washington, USA, 2024, pp. 51-56.
 19. М.Носиров, Н.Юлдашева, **С.Матбобоева**, М.Мирзакаримова Куёш элементларининг самарадорлигини оширишда наноплазмониканинг роли Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari, UrDU, 2022, 127-129 b.
 20. М.Nosirov, N.Yuldasheva, **S.Matboboyeva** Kvant o‘radagi elektron uchun Shredinger tenglamasining sonli yechimi, ”Yarimo‘tkazgichlar, nanomateriallar va fotoenergetikaning dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani, Urganch, 9-10 – dekabr, 2022 yil, 123-126 b.
 21. S.Zaynobidinov, M.Nosirov, N.Yuldasheva, **S.Matboboyeva**, S.Jonibekova Quyosh elementlari samaradorligini oshirish, «Farg’ona vodiysida fan va texnologiya» ilmiy konferensiya materiallar to‘plami, Namangan sh., 11 - 12 - may 2023, 75-78 b.
 22. М.Носиров, **С.Д.Матбобоева**, Н.М.Юлдашева, М.Абдукаххорова Электрофизические параметры металлов для наноплазмоники. Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах», Фергана, 2023, с.138-140.
 23. М.Носиров, С.Жонибекова, **С.Матбобоева**, У.Исмоилов, М.Абдукаххорова Метод наименьших квадратов на основе “MobileBasic”. Материалы международной научно-практической конференции

- “Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы, Андижан, 2023, с.42-43.
24. M.Nosirov, N.Yuldasheva, **S.Matboboyeva**, V.Abduazimov, S.Jonibekova Fotoelektrik o‘zgartirgichlar samaradorligini oshirishda AKTdan foydalanish. Материалы международной научно-практической конференции “Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы, Андижан, 2023, с.167-168.
 25. M.Nosirov, **S.D.Matboboyeva**, N.M.Yuldasheva, S.D.Jonibekova Fotoelektrik o‘zgartirgichlar samaradorligini oshirishda AKTdan foydalanish. “Fizika fanini axborot va innovatsion texnologiyalar muhitida o‘qitishning zamonaviy tendensiyalari: muammo va yechimlar mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiya materiallari, Navoiy, 2023, 29-32 b.
 26. M.Z.Nosirov, **S.D.Matboboyeva**, N.M.Yuldasheva, S.D.Jonibekova Elektronning ko‘p qatlamli kvant strukturalardagi harakatining potensial baryer balandligiga bog‘liqligi. Yarimo‘tkazgichlar fizikasining rivojlanishi va istiqbollari mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy seminari. Andijon, 2024, 36-37 b.
 27. M.Nosirov, **S.D.Matboboyeva**, N.M.Yuldasheva Elektronning kvant nanostrukturalardagi harakatini modellashtirish. “Aniq fanlarni o‘qitishda innovatsion texnologiyalarni qo‘llash”, Xalqaro ilmiy anjuman materiallari, Andijon, 2024, 124-127 b.
 28. M.Носиров, **С.Д.Матбобоева**, В.А.Абдуазимов Фотоэмиссионный ток из металлических наночастиц в кремний. The International scientific-practical conference on subject: “Fundamental and practical problems of semiconductor physics, modern electronics and energetics”, Namangan, 2024, 18-19 september, p. 322-326.
 29. R.U.Aliev, M.Nosirov, **S.D.Matboboyeva** Elektronning ko‘p qatlamli nanostrukturalardagi harakatiga elektr maydonining ta’siri. “Yarimo‘tkazgichlar fizikasining fundamental va amaliy uammolari:yechimlari va istiqbollari” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari, Namangan, 2024, 4-5- oktabr, 96-100 b.
 30. M.Nosirov, **S.D.Matboboyeva**, S.D.Jonibekova, N.M.Yuldasheva Elektronning ko‘p qatlamli kvant nanostrukturalardagi harakati. “Fizikaning zamonaviy muammolari va rivojlanish istiqbollari” I xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari, Namangan, 2024, 22-23 oktabr, 23-24 b.
 31. M.Nosirov, N.Yuldasheva, S.Matboboeva Nanoplazmonika uchun metallarning dielektrik funksiyalari, EHM uchun dasturiy mahsulot, № DGU 17752, 2022.
 32. M.Nosirov, N.Yuldasheva, **S.Matboboyeva**, M.Qo‘chqarova Shredinger tenglamasi, EHM uchun dasturiy mahsulot, № DGU 20966, 2022.
 33. M.Nosirov, **S.Matboboyeva**, V.Abduazimov, A.Xakimov Nostatsionar Shredinger tenglamasi, EHM uchun dasturiy mahsulot, № DGU 20235640, 2023.
 34. M.Nosirov, **S.Matboboyeva**, N.Yuldasheva, S.Jonibekova Quyosh elementlarining asosiy parametrlari, EHM uchun dasturiy mahsulot, № DGU 34872, 2024.

35. M.Nosirov, **S.Matboboyeva**, N.Yuldasheva Elektronning ko‘p qatlamli kvant nanostrukturalardagi harakati, EHM uchun dasturiy mahsulot, № DGU 36080, 2024.
36. M.Nosirov, **S.Matboboyeva**, N.Yuldasheva Elektronning kremniyli to‘rt qatlamli kvant nanostrukturalardagi harakati, EHM uchun dasturiy mahsulot, № DGU 53558, 2025.

Avtoreferat O‘zbekiston respublikasi “Usmon Nosir media” nashriyotida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi (____.____.2025 y. №____).

