

UDK 621.372.542

**ELEKTRONNING KREMNIYLI TO'RT QATLAMLI
NANOSTRUKTURALARDAGI HARAKATIGA ELEKTR
MAYDONINING TA'SIRI**

M.Z.Nosirov, S.D.Matboboyeva, N.M.Yuldasheva, S.D.Jonibekova
Andijon davlat universiteti
Tel.: +99890-549-81-49, e-mail: nmz1964@yandex.ru

Annotatsiya. Maqolada elektronning kremniyli to'rt qatlamli nanostrukturalardagi harakatini modellashtirish ko'rib chiqilgan va elektronlarning har bir qatlamda bo'lish ehtimolligiga elektr maydonining ta'siri tahlil qilingan. Dastlabki natijalar to'rt qatlamli nanostrukturalarda elektr maydonini 4-qatlamga qo'yish maqsadga nuvofig ekanligini ko'rsatmoqda.

Kalit so'zlar: elektron, potensial baryer, chegaraviy shartlar, Shredinger tenglamasi, ehtimollik, elektr maydoni.

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ДВИЖЕНИЕ
ЭЛЕКТРОНОВ В КРЕМНИЕВЫХ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ
НАНОСТРУКТУРАХ**

М.З.Носиров, С.Д.Матбобоев, Н.М.Юлдашева, С.Д.Жонибекова
Андижанский государственный университет
Тел.: +99890-549-81-49, e-mail: nmz1964@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается моделирование движения электронов в кремниевых четырехслойных наноструктурах и анализируется влияние электрического поля на вероятность нахождения электронов в каждом слое. Предварительные результаты показывают, что размещение электрического поля в 4-м слое в четырехслойных наноструктурах является целесообразным.

Ключевые слова: электрон, потенциальный барьер, граничные условия, уравнение Шрёдингера, вероятность, электрическое поле.

**THE EFFECT OF ELECTRIC FIELD ON ELECTRON MOTION IN
SILICON QUAD-LAYER NANOSTRUCTURES**

M.Z.Nosirov, S.D.Matboboyeva, N.M.Yuldasheva, S.D.Jonibekova
Andijan State University
Tel.: +99890-549-81-49, e-mail: nmz1964@yandex.ru

Abstract. *The article deals with the modeling of electron motion in silicon four-layer nanostructures and analyzes the influence of the electric field on the probability of finding electrons in each layer. Preliminary results show that placing the electric field in the 4th layer in four-layer nanostructures is appropriate.*

Keywords: *electron, potential barrier, boundary conditions, Schrödinger equation, probability, electric field.*

1. KIRISH

Jahonda energiya sarfining tobora ortib borishi va atrof muhitning ifloslanishishi bilan bog'liq muammolarning keskinlashuvi qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanishni yanada rivojlantirishni taqozo qilmoqda. Shuning uchun qayta tiklanuvchi energiya manbalari – yarimo'tkazgichli fotoelektrik energiya o'zgartirgichlarning samaradorligini oshirish bo'yicha bir qator ilmiy, amaliy va innovatsion tadqiqotlar olib borilmoqda. Yuqori samarali fotovoltaik qurilmalar uchun yangi istiqbolli mono va polikristalli ko'p qatlamli nanostrukturalar olish, ularning elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlarini tadqiq qilish, shuningdek, energiya manbalaridan samarali foydalanishning o'ziga xos imkoniyatlarini o'rganish shu kunning eng dolzarb muammolaridan biridir.

So'nggi yillarda bir qator yarimo'tkazgichli qurilmalar paydo bo'ldi, ularning ishlash printsiplari kichik o'lchamli tuzilmalarda kvant o'lchamli effektlarga asoslangan [1]. Cheklangan hajmda qo'zg'atilgan turli xil fizikaviy tabiatdagi to'lqinlar aniq tebranish chastotasiga ega bo'lib, zaryad tashuvchilarning harakatini cheklashga va energiya spektrining diskretlashishiga olib keladi. Bir fazoviy yo'nalishda yarimo'tkazgichning o'lchamining keskin pasayishi bilan elektron holatlar zichligining uzluksiz spektri bosqichma-bosqich bo'ladi. Ikkinchi darajadagi erkinlikdan mahrum bo'lgan yarimo'tkazgich holatlar spektrining cho'qqi shaklidagi zichligini ko'rsatadi. Uchta fazoviy yo'nalishda chegaralangan material holat spektrlarining zichligi alohida atomnikiga o'xshashligi sababli sun'iy atom yoki kvant nuqta (QN) deb ataladi. Turli o'lchamdagi QNlarni gradientli ko'p qatlamli nanotuzilmalarga yig'ish mumkin [2]. Bunday yangi materiallar yangi

avlod nano-, mikro- va optoelektronika qurilmalarini, jumladan, o'ta sezgir gaz sensorlari va akustik modulyatorlarni yaratish uchun ishlatiladi [3]. Rivojlanishning jadal sur'atlariga ega bo'lgan nanotexnologiya - bu bir atom va molekulalardan yuzlab nanometrgacha bo'lgan masshtabli fizik, kimyoviy va biologik ob'ektlarni, shu jumladan nanostrukturalar asosida yaratilgan yirik integral tizimlarni ishlab chiqarish va ishlatish usullari to'plamidir [4].

Organik matritsalar va ular ichiga o'rnatilgan sharsimon va murakkabroq shakldagi yarim o'tkazgich kvant nuqtalarni o'z ichiga olgan ko'p qatlamli tuzilmalar katta qiziqish uyg'otadi. Yarimo'tkazgichli QNlar nanokristallar bo'lib, ularning o'lchamlari ma'lum bir material uchun Bor eksitoni radiusi bilan taqqoslanarli bo'ladi va ularning noyob elektro-optik xususiyatlarini aniqlaydi. Ular molekulalarning va quyma yarimo'tkazgichlarning ba'zi xususiyatlariga ega bo'ladi. Energiya spektrining kvantlanishi har qanday kuzatiladigan effektlarda namoyon bo'lishi uchun energiya sathlari orasidagi masofa yetarlicha katta bo'ladi va tashuvchilarning issiqlik energiyasidan sezilarli darajada ortib ketadi. Ushbu shartning bajarilishi qo'shni sathdagi deyarli bir xil joylashuvni va ular o'rtasida tashuvchilarning tez-tez o'tishini oldini oladi, bu esa takrorlanadigan kvant effektlariga yordam beradi. O'sish jarayonida o'z-o'zini tashkil etish usuli bilan olingan QNlar fizikasi va texnologiyasi sohasidagi intensiv tadqiqotlar bugungi kunga ushbu sohada sezilarli yutuqlarga erishishga imkon berdi. Jumladan, QN optik diapazoni $1,2 \div 1,3$ mkm bo'lgan lazerlar uchun eng muhim natijalar ko'rsatildi: o'ta past chegarali oqim zichligi, rekord darajadagi differentsial samaradorlik va chiqish quvvati, ish xususiyatlarining yuqori harorat barqarorligi, ultra keng lazer emissiya spektrlari, yuqori ishlash muddati va boshqalar [6]. Kvant nuqtalaridan foydalanish man qilingan zona kengligi va shunga mos ravishda materialdagi yutilish spektrini loyihalash uchun katta imkoniyatlar ochadi. Manba materialining man qilingan zonasidan kamroq energiyaga ega fotonlarni elektron-teshik juftlariga samarali aylantirish va shunga mos ravishda quyosh elementi fototokini oshirish uchun oraliq zona sifatida QNda energiya sathidan foydalanish taklif qilindi. Shuningdek, ular ma'lum kaskadlarning spektral sezgirlikini

kengaytiradi va quyosh elementining qisqa tutashuv tokini oshiradi, shuning uchun quyosh radiatsiyasi spektridan foydalanish samaradorligini oshiradi. So'nggi paytlarda quyosh spektrining uzun to'lqinli soxasida QNlarning qo'shimcha yutilishi hisobiga fotovoltaik konvertorlarda qisqa tutashuvli tok zichligi oshishi ko'rsatildi. Bunday natijalar quyosh elementlarining yutish soxasini shakllantirish uchun, shuningdek, yuqori yutilish koeffitsientini talab qiladigan boshqa qurilmalarda ishlatilishi mumkin [7].

Adabiyotlar tahlilidan kelib chiqadiki, qatlamlararo sirt nuqsonlari bo'lmagan yupqa epitaksial qatlamlarning shakllanishi vertikal QN matritsasini yaratish usuli sifatida qaralishi mumkin. Shuning uchun ko'p qatlamli epitaksial plyonkalar ko'rinishidagi kichik o'lchamli tuzilmalarda elektronlar harakatining xususiyatlarini hisoblash tahlili dolzarb vazifadir. Ushbu ishda elektronlarning kremniyli to'rt qatlamli nano strukturalardagi harakatiga elektr maydonining ta'siri ko'rib chiqiladi.

2. ASOSIY TENGLAMALAR

Kvant mexanikasining boshlanishida faqat atom tizimlari bilan shug'ullanilgan bo'lsa, o'tgan asrning oxirlarida yarimo'tkazgichlar texnologiyasi shu darajaga rivojlandiki, o'lchamlari elektronlarning xarakterli de Broyl to'lqin uzunligi bilan taqqoslanarli tuzilmalarni ishlab chiqarish mumkin bo'ldi va kvant mexanikasiga bo'lgan qiziqishlar yanada ortdi [6, 7].

Effektiv massa usuli yordamida amalga oshirilgan yarimo'tkazgichli nanostrukturalardagi elektron holatlarni hisoblash qatlamlar tekisligiga perpendikulyar yo'nalishda elektronlar harakati uchun bir o'lchovli bo'lgan statsionar Shredinger tenglamasini yechishga asoslangan. 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 [8].

Yarim cheksiz soxalar orasida joylashgan N qatlamdan tashkil topgan nanostrukturani ko'rib chiqamiz

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

k-soxadagi Shredinger tenglamasining yechimi

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

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

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

Bunday strukturalar uchun

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

chegaraviy shartlardan foydalanib, (3) umumiy yechimdan A_k , B_k koefitsiyetlarni aniqlash uchun

$$\begin{cases} A_{k+1} = \frac{A_k}{2} \left(1 + \frac{y_k m_{k+1}}{y_{k+1} m_k} \right) e^{-i(y_{k+1} - y_k)z_k} + \frac{B_k}{2} \left(1 - \frac{y_k m_{k+1}}{y_{k+1} m_k} \right) e^{-i(y_{k+1} + y_k)z_k}, \\ B_{k+1} = \frac{A_k}{2} \left(1 - \frac{y_k m_{k+1}}{y_{k+1} m_k} \right) e^{i(y_{k+1} + y_k)z_k} + \frac{B_k}{2} \left(1 + \frac{y_k m_{k+1}}{y_{k+1} m_k} \right) e^{i(y_{k+1} - y_k)z_k} \end{cases} \quad (5)$$

rekurent ifodalarni olish mumkin.

3. NATIJALAR VA MUHOKAMA

Yuqorida ko'rib o'tilgan ko'p qatlamli kvant strukturalardagi, xususan, kremniyli to'rt qatlamli nanostrukturallardagi fizik jarayonlarni kompyuterda modellashtirish uchun MatLabda dastur tuzildi. Dastur qatlamlar soni, har bir qatlamdagi material turi, ulardagi elektronning effektiv massasi, qatlam uchun potensial baryerning balandligi (man qilingan zonasi kengligi) va kengligi (panjara doimiysi) ni kiritish va o'zgartirishga, shuningdek, elektronlarning qatlamlarda bo'lish, ulardan o'tish va qaytish ehtimolliklarini hisoblashga imkon beradi [9,

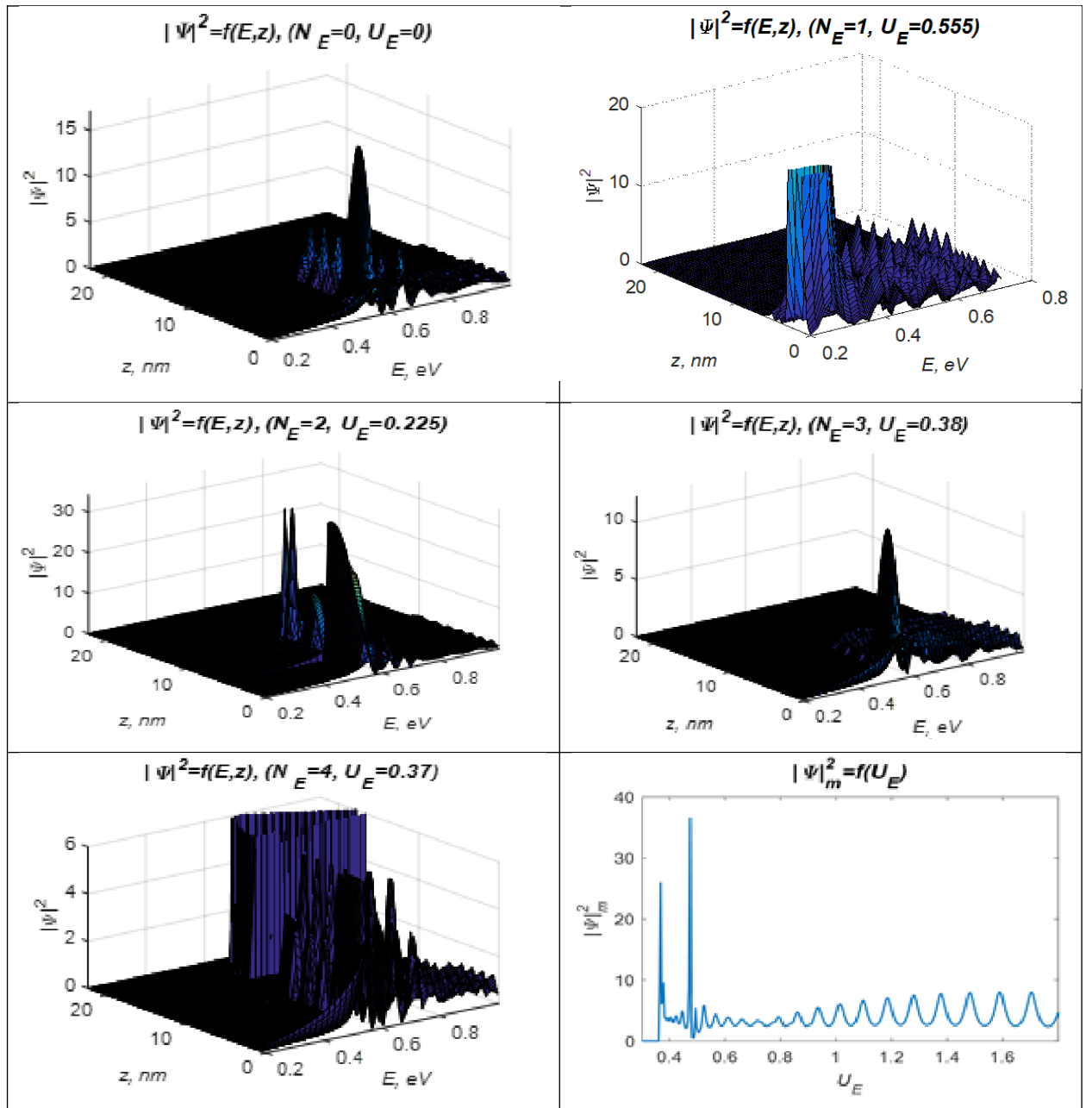
10]. Dasturda shuningdek, nanostrukturaga tashqi ta'sirlar, hususan, elektr maydoni ta'sirini tadqiq qilish imkoniyati yaratilgan.

1-jadvalda ba'zi yarimo'tkazgichlarning asosiy parametrlari keltirilgan. Ulardan kremniy uchun *Ge*, *GaAs* va *AlAs* larni tanlaymiz, chunki bu yarimo'tkazgichlarning panjara doimiylari bir-biriga yaqin va taqiqlangan zonalari (potensial baryerlari) bir tekisda ortib boradi.

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

1-a, b, v, g, d, e –rasmlarda kremniyli to'rt qatlamli, har bir qatlamida 10 tadan atomi bo'lgan nanostrukturalarda (*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; $d_1=0.5341$ nm, $d_2=0.5657$ nm, $d_3=0.5653$ nm, $d_4=0.5661$ nm) elektr maydoni qo'yilmaganda hamda 1-, 2-, 3- va 4-qatlamlarga elektr maydoni qo'yilganda elektronlarning topilish ehtimolligining koordinata va energiyaga bog'liqlik grafiklari keltirilgan.



1-a, b, v, g, d, e- rasmlar. 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; $d_1=0.5341$ nm, $d_2=0.5657$ nm, $d_3=0.5653$ nm, $d_4=0.5661$ 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 elektronlar energiyasi 0.5-0.8 eV bo'lganda 0-0.6 nm atrofida topilish ehtimolligi yuqori bo'ladi va (0.58 eV, 2.5 nm) nuqtada maksimumga erishadi. Elektr maydoni 1-qatlamga qo'yilganda elektronlar energiyasi 0-0.3 eV bo'lganda 0-0.35 nm nuqtalar oralig'ida topilish ehtimolligi ortib ketadi. Elektr maydoni 2-qatlamga

qo'yilganda 0.56-0.58 eV energiyali elektronlarning ~ 2.5 nm va ~ 8 nm nuqtalar atrofida topilish ehtimolligi ortadi. Elektr maydoni 3-qatlamga qo'yilganda maksimumlar pasayadi. Elektr maydoni 4-qatlamga qo'yilganda 0.54-1.04 eV energiyali elektronlarning 16.5-22 nm nuqtalar atrofidagi topilish ehtimolligi keskin ortib ketadi. 1-e-rasmda elektronlar topilish ehtimolligi maksimumlarining 4-qatlamga qo'yilayotgan elektr maydonining qiymatiga bog'liqligi keltirilgan. Grafikdan ko'rinib turibdiki, elektr maydonining qiymati ortishi bilan elektronlarning topilish ehtimolligi ortib va kamayib boradi. Topilish ehtimolligi elektr maydoni 0.3663 eV va 0.4736 eV bo'lganda maksimumlar paydo bo'ladi. Demak, kremniyli to'rt qatlamli nanostrukturalarda 0.3663 eV va 0.4736 eV li elektr maydoni to'rtinchi qatlamga qo'yilganda eng katta samaradorlikka erishiladi.

4. XULOSALAR

Shunday qilib, ushbu ishda ko'p qatlamli kvant nanostrukturalardagi elektron harakatini modellashtirish uchun har bir qatlamdagi (bir o'lchovli potensial baryerdagi) elektron uchun Shredinger tenglamasining analitik yechimi va qatlamlar orasidagi chegaraviy shartlardan foydalanildi hamda ko'rib o'tilgan jarayon uchun MatLabda dastur tuzildi. Dastur qatlamlar soni, har bir qatlamdagi material turi, ulardagi elektronning effektiv massasi, qatlam uchun potensial baryerning balandligi (man qilingan zonasi kengligi) va kengligi (panjara doimiysi) ni kiritish va o'zgartirishga, shuningdek, elektronlarning qatlamlarda bo'lish, ulardan o'tish va qaytish ehtimolliklarini hisoblashga imkon beradi

Natijalar kremniyli to'rt qatlamli, har bir qatlamida 10 tadan atomi bo'lgan nanostrukturalarda elektr maydoni qo'yilmaganda elektronlar energiyasi 0.5-0.8 eV bo'lganda 0-0.6 nm atrofida topilish ehtimolligi yuqori bo'lishi va (0.58 eV, 2.5 nm) nuqtada maksimumga erishishi, elektr maydoni 4-qatlamga qo'yilganda 0.7-1.04 eV energiyali elektronlarning 16.5-22 nm nuqtalar atrofidagi topilish ehtimolligi keskin ortib ketishi, topilish ehtimolligi elektr maydoni 0.3663 eV va 0.4736 eV bo'lganda maksimumlar paydo bo'lishi aniqlandi. Demak, kremniyli

to'rt qatlamli nanostrukturalarda 0.3663 eV va 0.4736 eV li elektr maydoni to'rtinchi qatlamga qo'yilganda eng katta samaradorlikka erishiladi.

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

Adabiyotlar

1. Мошников В.А., Александрова О.А. Наночастицы, наносистемы и их применение. Ч.1. Коллоидные квантовые точки. -Уфа: Аэтерна, 2015.- 236 с.
2. Игошина С.Е., Карманов А.А. Волновые функции электрона в квантовых точках «ядро / оболочка» типа I. // Молодой учёный. -2014. -№ 8 (67). С. 41-45.
3. Жигунов Д.М. Оптика квантовых низкоразмерных систем. Москва: МГУ. 2017. - 114 с.
4. Неверов В.Н., Титов А.Н. Физика низкоразмерных систем. - Екатеринбург: УралГУ. 2008. – 233 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Квантовая механика (нерелятивистская теория). Т.3, стереот., 2021, -800 с., ISBN 978-5-9221-0530-9.
6. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. -Москва: "Логос", 2000. -248 с.
7. Гульд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. т. 1-2. - Москва: Мир, 1990. -321 с.
8. Nosirov M., Matboboyeva S., Janibekova S. Elektronning ko'p qatlamli kvant strukturalardagi harakati //QarDU xabarleri, 2024, № 1, 27-34 b.
9. Nosirov M., Matboboyeva S., Janibekova S. Elektronning kvant nanostrukturalardagi harakatini modellashtirish // NamDU ilmiy axborotnomasi, 2024, № 2, 57-65 b.
10. Aliev R.U., Nosirov M.Z., Matboboyeva S.D. Elektronning ko'p qatlamli nanostrukturalardagi harakatiga elektr maydonining ta'siri // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research, 2024, Vol. 6, Iss. 2, p. 9-14.