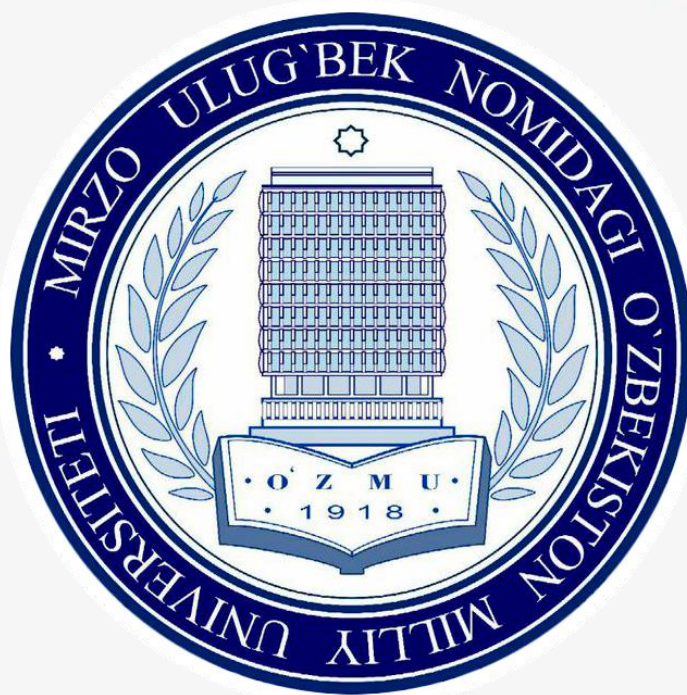


**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLYI VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI**

**OLYI TA'LIM TIZIMI PEDAGOG VA RAHBAR KADRLARINI QAYTA
TAYYORLASH VA ULARNING MALAKASINI OSHIRISHNI TASHKIL
ETISH BOSH ILMIY - METODIK MARKAZI**

**O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI PEDAGOG
KADRLARNI QAYTA TAYYORLASH VA ULARNING MALAKASINI
OSHIRISH TARMOQ (MINTAQAVIY) MARKAZI**



**“NANOFIZIKA ASOSLARI”
moduli bo'yicha**

O' Q U V - U S L U B I Y M A J M U A

Toshkent – 2022

Modulning ishchi o‘quv dasturi O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligining 2020 yil 7-dekabrda 648-sonli buyrug‘i bilan tasdiqlangan namunaviy o‘quv reja va dasturlar asosida ishlab chiqilgan.

Tuzuvchi:

O‘zMU professori,
f.-m.f.d., prof. **G. Abduraxmanov**

Taqrizchilar:

TDTU professori,
f.-m.f.d., prof. B. Umirzakov,
O‘zMU professori,
f.-m. f. doktori SH. Yuldashev

**O‘quv - uslubiy majmua Bosh ilmiy-metodik markaz Ilmiy metodik
Kengashining qarori bilan nashrga tavsiya qilingan
(2020 yil “30” dekabrda 5/4-sonli bayonnoma)**

MUNDARIJA

I. ISHCHI DASTUR	3
II. MODULNI O'QITISHDA FOYDALANILADIGAN INTERFAOL TA'LIM METODLARI.....	7
III. NAZARIY MASHG'ULOT MATERIALLARI.....	8
IV. AMALIY MASHG'ULOT MATERIALLARI	90
V. GLOSSARIY	91
VI. ADABIYOTLAR RO'YXATI.....	100

I. ISHCHI DASTUR

Kirish

Dastur O'zbekiston Respublikasining 2021 yil 23 sentabrda tasdiqlangan "Ta'lim to'g'risida"gi Qonuni, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevraldagi "O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish boyicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi PF-4947-son, 2019 yil 27 avgustdagi "Oliy ta'lim muassasalari rahbar va pedagog kadrlarining uzluksiz malakasini oshirish tizimini joriy etish to'g'risida"gi PF-5789-son, 2019 yil 8 oktabrdagi "O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim tizimini 2030 yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi PF-5847-sonli Farmonlari hamda O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2019 yil 23 sentabrdagi "Oliy ta'lim muassasalari rahbar va pedagog kadrlarining malakasini oshirish tizimini yanada takomillashtirish boyicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi 797-sonli Qarorlarida belgilangan ustuvor vazifalar mazmunidan kelib chiqqan holda tuzilgan bo'lib, u oliy ta'lim muassasalari pedagog kadrlarining kasb mahorati hamda innovasion kompetentligini rivojlantirish, sohaga oid ilg'or xorijiy tajribalar, yangi bilim va malakalarni o'zlashtirish, shuningdek amaliyotga joriy etish ko'nikmalarini takomillashtirishni maqsad qiladi.

Dastur doirasida berilayotgan mavzular ta'lim sohasi boyicha pedagog kadrlarni qayta tayyorlash va malakasini oshirish mazmuni, sifati va ularning tayyorgarligiga qoyiladigan umumiy malaka talablari va o'quv rejalari asosida shakllantirilgan bo'lib, uning mazmuni kredit modul tizimi va o'quv jarayonini tashkil etish, ilmiy va innovasion faoliyatni rivojlantirish, pedagogning kasbiy professionalligini oshirish, ta'lim jarayoniga raqamli texnologiyalarni joriy etish, maxsus maqsadlarga yo'naltirilgan ingliz tili, mutaxassislik fanlar negizida ilmiy va amaliy tadqiqotlar, o'quv jarayonini tashkil etishning zamonaviy uslublari boyicha so'nggi yutuqlar, pedagogning kreativ kompetentligini rivojlantirish, ta'lim jarayonlarini raqamli texnologiyalar asosida individuallashtirish, masofaviy ta'lim xizmatlarini rivojlantirish, vebinar, onlayn, «blended learning», «flipped classroom» texnologiyalarini amaliyotga keng qo'llash boyicha tegishli bilim, ko'nikma, malaka va kompetensiyalarni rivojlantirishga yo'naltirilgan.

Qayta tayyorlash va malaka oshirish yo'nalishining o'ziga xos xususiyatlari hamda dolzarb masalalaridan kelib chiqqan holda dasturda tinglovchilarning mutaxassislik fanlar doirasidagi bilim, ko'nikma, malaka hamda kompetensiyalariga qoyiladigan talablar takomillashtirilishi mumkin.

Modulning maqsadi va vazifalari

Modulning maqsadi: pedagog kadrlarni qayta tayyorlash va malakasini oshirish kursi tinglovchilarini zamonaviy nanotexnologiyalar asosidagi fizikaviy jarayonlar, nanomateriallar sintezi, ularning xossalarini o'rganish usullari va qo'llanish imkoniyatlari haqida oliy ta'lim

muassasalari pedagog kadrlarining bilim, ko'nikma va kompetensiyalarini oshirish.

Modulning vazifalari:

- Nanofizika sohasidagi so'nggi yangiliklar, zamonaviy eksperimental va kuzatuv texnologiyalari va xorijiy adabiyotlar haqidagi bilimlarini takomillashtirish, bu boradagi muammolarni aniqlash, tahlil etish va baholash, nanomateriallarni xalq xo'jaligida qo'llash imkoniyatlarini ko'rsatish;

- Zamonaviy nanofizika va nanomateriallar sohasida ilg'or tajribalarni o'rganish va amaliyotda qo'llash usullari haqida nazariy va amaliy bilimlarni, ko'nikma va malakalarni shakllantirishdan iborat.

Modul boyicha tinglovchilarning bilimi, ko'nikmasi, malakasi va kompetensiyalariga qoyiladigan talablar

Modulni o'zlashtirish jarayonida amalga oshiriladigan masalalar doirasida:

Tinglovchi:

- Nanofizika va nanotexnologiyalar sohasidagi zamonaviy revolyusion yangiliklar va zamonaviy adabiyotlar, so'nggi yillarda nanofizika va nanotexnologiyalarda aniqlangan fundamental qonuniyatlar, kashfiyotlar va tamoyillar, xozirgi zamon eksperimental tadqiqot usullaridan samarali foydalanish to'g'risidagi ***bilimlarga ega bo'lishi*** kerak;

- Nanomateriallar va nanotexnologiyalardan xalq xo'jaligida foydalanish imkoniyatlarini tushinishlari va bu haqda bilimlarni tahlil etish, boshqa tinglovchilarga, jumladan, talabalar va o'quvchilarga yetkaza bilish ***ko'nikmalariga ega bo'lishi*** lozim;

- Nanomasshtabda sodir bo'ladigan fundamental fizikaviy jarayonlarni va shu jarayonlarga asoslangan qurilmalarning ishini tahlil etish ***malakalariga ega bo'lishi*** lozim;

- Kvant mexanikasi va statistik fizika qonunlarini, qattiq jismlar fizikasi asoslarini tushunish va qo'llash ***kompetensiyalariga ega bo'lishi*** lozim.

Modulni tashkil etish va o'tkazish boyicha tavsiyalar

Modulni o'qitish ma'ruza, amaliy va ko'chma mashg'ulotlar shaklida olib boriladi.

Modulni o'qitish jarayonida ta'limning zamonaviy metodlari, pedagogik texnologiyalar va axborot-kommunikasiya texnologiyalari qo'llanilishi nazarda tutilgan:

- ma'ruza darslarida zamonaviy kompyuter texnologiyalari yordamida prezentasion va elektron-didaktik texnologiyalardan;

- o'tkaziladigan amaliy mashg'ulotlarda texnik vositalardan, ekspress-so'rovlar, test so'rovlari, aqliy hujum, guruhli fikrlash, kichik guruhlar bilan ishlash, kollokvium o'tkazish, va boshqa interaktiv ta'lim usullarini qo'llash nazarda tutiladi.

- ko'chma mashg'ulotlarda zamonaviy ilmiy tajriba qurilmalari va kuzatuv asboblari bilan bevosita tanishish nazarda tutiladi.

Modulning o'quv rejadagi boshqa modullar bilan bog'liqligi va uzviyligi

“Koinot strukturasi va evolyusiyasi, materiyaning yangi formalari” moduli mazmuni o'quv rejadagi “Kredit modul tizimi va o'quv jarayonini tashkil etish”, “Ilmiy va innovasion faoliyatni rivojlantirish”, “Pedagogning kasbiy professionalligini oshirish”, “Ta'lim jarayoniga raqamli texnologiyalarni joriy etish”, “Nanofizika asoslari” va “Kvant aloqa. Fizik jarayonlarni kompyuterda modellashtirish” o'quv modullari bilan uzviy bog'langan holda pedagoglarning ta'lim jarayonida nanofizika, nanomateriallar, nanozarralarni xosil qilish va ularni kuzatish vositalari boyicha kasbiy pedagogik tayyorgarlik darajasini oshirishga xizmat qiladi.

Modulning oliy ta'limdagi o'rni

Modulni o'zlashtirish orqali tinglovchilarning ta'lim jarayonini tashkil etishda texnologik yondashuv asoslarini va bu boradagi ilg'or tajribani o'rganadilar, ularni tahlil etish, amalda qo'llash va baholashga doir kasbiy kompetentlikka ega bo'ladilar.

Moduli bo'yicha soatlar taqsimoti

№	Modul mavzulari	Auditoriya		
		Jami	jumladan	
			Nazariy	Amaliy
1.	Nanotexnologiya va nanofizikaning tarixi, vazifalari hamda zamonaviy fanlar va texnologiyalardagi o'rni. O'zbekistonda nanotexnologiyalar va nanomateriallarni qo'llash istiqbollari	2	2	
2.	Qattiq jism fizikasi elementlari. Zonalar nazariyasi, metall, dielektrik va yarimo'tkazgichlar haqida tushincha.	2	2	
3.	Nanomateriallar. Fulleren, uglerod nanonaylari va grafen. Ularning fizik xususiyatlari va amaliyotda qo'llanishi	2	2	2
4.	Nanostrukturalarda fundamental elektron hodisalar I. Kvant o'lcham effektlari. Kvant chegaralanishi. Energetik holatlar zichligi. Nanozarralar va ularning fizik xususiyatlari	2	2	2
5.	Nanostrukturalarda fundamental elektron hodisalar II. Ikki o'lchovli "elektron gaz". Energetik holatlar zichligi. Energetik holatlar zichligi. Ballistik transport. Metall, dielektrik (oksid), yarimo'tgazgich (MDYa yoki MOP) tranzistorlar. Geterostrukturalar	4	2	2
6.	Xollning kvant effektlari. Butun sonli Xoll effekti. Kasr sonli Xoll effekti	2	2	2
7.	Kvant tunnellanish effekti. Rezonans tunnellanish. Bir elektronli tranzistor. Sirt plazmon rezonansi (SPR). Nanofotonika elementlari	2	2	4
Jami: 26 soat		26	14	12

NAZARIY MASHG'ULOTLAR MAZMUNI

1-mavzu: Nanofizika va nanotexnologiyalarga kirish (2 soat).

- 1.1. Nanotexnologiyaning tarixi.
- 1.2. Nanofizika va nanotexnologiyalarning vazifalari hamda zamonaviy fanlar va texnologiyalardagi o'rni.
- 1.3. O'zbekistonda nanotexnologiyalar va nanomateriallarni qo'llash istiqbollari.

2-mavzu: Qattiq jism fizikasi elementlari (2 soat).

- 2.1. Qattiq jismlarning turlari, tuzilishi. Kristall panjara. Blox teoremasi.

- 2.2. Metallar o'tkazuvchanligining Drude va Zommerfeld nazariyalari.
2.3. Zonalar nazariyasi, metall, dielektrik va yarimo'tkazgichlar haqida tushincha.

3-mavzu: Nanomateriallar (2 soat).

- 3.1. Materiallar xossalari nanomasshtabda o'zgarishi va uning sabablari.
3.2. Metall nanozarrachalar va ularning xossalari.
3.3. Fulleren, uglerod nanonaylari va grafen. Ularning fizik xususiyatlari va amaliyotda qo'llanishi.
3.4. Ikki o'lchamli nanotizimlar.

4-mavzu: Nanostrukturalarda fundamental elektron hodisalar I. (2 soat).

- 4.1. Kvant o'lcham effektlari. Kvant chegaralanishi.
4.2. Energetik holatlar zichligi.
4.3. Nanotizimlarda fononlar.

5-mavzu: Nanostrukturalarda fundamental elektron hodisalar II. (4 soat).

- 5.1. Ikki o'lchamli "elektron gaz". Energetik holatlar zichligi.
5.2. Ballistik transport.
5.3. Metall-dielektrik (oksid)-yarimo'tgazgich (MDYa yoki MOP) tranzistorlar. 5.4. Geterostrukturalar.

6-mavzu: Xollning kvant effektlari (2 soat).

- 6.1. Butun sonli Xoll effekti.
6.2. Kasr sonli Xoll effekti.
6.3. Kvazizarrachalar.

7-mavzu: Kvant tunnellanish effekti (2 soat).

- 7.1. Rezonans tunnellanish. Rezonans tunnel diodi.
7.2. Bir elektronli tranzistor. Nanoelektronika elementlari.
7.3 Sirt plazmon rezonansi (SPR). Nanofotonika elementlari

AMALIY MASHG'ULOTLAR MAZMUNI

1-amaliy mashg'ulot. Energodispersion va rentgenofluoressent spektrometrlar yordamida nanostrukturaning elementar tarkibini aniqlash (2 soat).

- Energodispersion spektrometrning tuzilishi va ishlashi.
Rentgenofluoressent spektrometrning tuzilishi va ishlashi.

2-amaliy mashg'ulot. Transmission va skanlovchi elektron mikroskoplarining tuzilishi va ishlash prinsipi, namuna tayyorlash usullari (2 soat).

3-amaliy mashg'ulot. Skanlovchi tunnel mikroskopi va atom kuch mikroskopining

tuzilishi va ishlash prinsipi (2 soat).

4-amaliy mashg'ulot. Optik va o'ta yuqori chastotali yaqin maydon skanlovchi mikroskopi orqali nanoobektlarni kuzatish. Nanostrukturalarning, jumladan foton kristallarning optik xususiyatlarini o'rganish usullari (2 soat).

5-amaliy mashg'ulot. Rentgen diffraktometrini tuzilishi va ishlash prinsipi va uning yordamida namunaning kristall tuzilishini aniqlash (2 soat).

6-amaliy mashg'ulot. Nanolitografiya usullari. Nanotexnologiyalardan foydalanib yangi tipdagi quyosh elementlarini yig'ish va ularning xususiyatlarini laboratoriya sharoitida aniqlash usullari (2 soat).

Amaliy mashg'ulotlarni tashkil etish bo'yicha ko'rsatma va tavsiyalar

Amaliy mashg'ulotlarda tinglovchilar o'quv modullari doirasidagi ijodiy topshiriqlar, keyslar, o'quv loyihalari, texnologik jarayonlar bilan bog'liq vaziyatli masalalar asosida amaliy ishlarni bajaradilar.

Amaliy mashg'ulotlar zamonaviy ta'lim uslublari va innovasion texnologiyalarga asoslangan holda o'tkaziladi. Bundan tashqari, mustaqil holda o'quv va ilmiy adabiyotlardan, elektron resurslardan, tarqatma materiallardan foydalanish tavsiya etiladi.

O'QITISH SHAKLLARI

Mazkur modul bo'yicha quyidagi o'qitish shakllaridan foydalaniladi:

- ma'ruzalar, amaliy mashg'ulotlar (ma'lumotlar va texnologiyalarni anglab olish, aqliy qiziqishni rivojlantirish, nazariy bilimlarni mustahkamlash);
- davra suhbatlari (ko'rilayotgan loyiha yechimlari bo'yicha taklif berish qobiliyatini oshirish, eshitish, idrok qilish va mantiqiy xulosalar chiqarish);
- bahs va munozaralar (loyihalar yechimi bo'yicha dalillar va asosli argumentlarni taqdim qilish, eshitish va muammolar yechimini topish qobiliyatini rivojlantirish).

1-ma`ruza. “Nanofizika asoslari” faniga kirish

REJA

- 1.1. *Nanotexnologiyalar haqida*
- 1.2. *Nanofizika fani nimalarni o`rganadi?*
- 1.3. *Nanofizika bizga nima beradi?*
- 1.4. *O`zbekistonda nanofizika vananotexnologiyalar istiqboli*
- 1.5. *Nanotexnologiyalar hamisha foydalimi?*

Tayanch iboralar: nanomasshtab, nanorobot, nanozarracha, past o`lchamli tizimlar, o`z-o`zidan yig`ilish, nanokimyoy, nanotibbiyot, nanobiologiya, agrotexnika

1.1. Nanotexnologiyalar haqida

Nanotexnologiyalar nanoo`lchamli (o`lchamlari metrning milliarddan bir ulushlariga teng) materiallar (0 o`lchamli - 0D, 1 o`lchamli - 1D, 2 o`lchamli – 2D) va ularning majmuasini (nanotizimlarni) hamda ulardan turli qurilmalar tayyorlash usullarini va vositalarini o`zichiga oladi. Nanotexnologiyalarga qiziqish sababi – bu usullar bilan yaratilgan materiallarning xossalari hajmiy materiallarnikidan keskin farq qilishi, ba`zan mutlaq yangi xossalar kelib chiqishi. Masalan, hammaga yaxshi tanish bo`lgan oltin hajmiy holda inert bo`lib, deyarli hech narsa bilan kimyoviy reaksiyaga kirishmaydi va boshqa moddalarning o`zaro reaksiyasiga ta`sirk o`rsatmaydi. Ammo diametri 7 nm dan kichikroq oltin nanozarralari juda yaxshi katalizatorga aylanadi. Yana bir misol – odatdagi sharoitda ko`mirni o`t oldirish ancha qiyin, lekin 10-100 nm li zarralardan iborat ko`mir kukuni nafaqat tez yonadi, hatto portlaydi ham. Uchinchi misol – odatdagi rangi hammaga tanish bo`lgan kumush nanozarrachalar holida silikat shishaning ichida chiroyli alvon rang beradi. Bunday misollarni ko`plab keltirish mumkin.

Insoniyat tarixida tabiatga keskin o`zgarish kiritgan ikkita inqilob bo`lgan – tosh davrida odamzot yer haydab dehqonchilik qilishga o`tdi va 18-asrning oxirida boshlangan sanoat inqilobi (mashinalardan foydalanish). Hozirgi nanotexnologiyalar hayotimizga olib kelishi mumkin bo`lgan o`zgarishlarni ko`pgina olimlar va futurologlar uchinchi inqilob bo`ladi, - deb bashorat qilmoqdalar.

Aslini olganda nanotexnologiyalardan odamlar, turli jonzotlar va o'simliklar dunyo yaratilganidan beri foydalanib kelmoqda, - desak mubolag'a bo'lmaydi. Faqat o'tgan asrning 80-yillarigacha hechkim bu iborani ishlatmas va nanotexnologiyalarni ayrim yo'nalish sifatida ajratmas edi.

Nanotexnologiyalarga daxldor bo'lgan ilmiy yo'nalishlar nanofizika, nanokimyó, nanobiologiya, nanomedicina va hokazolarga bo'linadi. Bu yo'nalishlarning har birining o'ziga xos tadqiqot usullari va qo'llanish sohalari, insoniyat foydalanadigan natijalari (hozirgi va kelajakdagi) bor. Ba'zan bu yo'nalishlar bir-biriga tutashib ketadi. Masalan, nanofizika nanoo'lchamli materiallarning fizikaviy (mexanik, elektr, magnit, optik va hokazo) xossalarini o'rgansa-da, bunday materiallar ko'pincha kimyoviy (keyingi vaqtlarda biologik ham) usullar bilan olinadi va tashqi zararli ta'sirlardan kimyoviy usullar bilan himoya qilinadi. Lozim bo'lganda bu nanomateriallarning xossalarini kerakli yo'nalishda o'zgartirish uchun fizikaviy, kimyoviy yoki biologik ta'sirlar qo'llaniladi.

Yuqorida aytib o'tganimiz ko'mirning va oltinning kimyoviy xossalari o'zgarishiga mexanik ta'sir (maydalash) sabab bo'ldi, kumushning rangi (fizikaviy, optik xossasi) o'zgarishiga esa ham fizikaviy, ham kimyoviy ta'sirlar sababchi bo'ldi.

1.2. Nanofizika fani nimalarni o'rganadi?

Yuqorida biz nanofizika nanoo'lchamli materiallarning fizikaviy (mexanik, elektr, magnit, optik va hokazo) xossalarini o'rganadi, - dedik. Endi bu haqda batafsilroq to'xtalamiz.

Quyida nanofizikaga oid bir qator tadqiqot va amaliyot yo'nalishlari keltirilgan:

1. O'ta mustahkam va o'ta yengil materiallar tayyorlash (materialshunoslik) va xossalarini o'rganish, nazorat qilish usullari;
2. Lengmyur-Blojet qatlamlari (sun'iy burun) – tayyorlash va xossalarini o'rganish, nazorat qilish usullari;
3. Tibbiyotda dorilarni kasallik o'chog'iga tez, o'zgartirmasdan yetkazish va lozim bo'lganda molekulalar darajasida jarrohlik hamda bu jarayonlarni nazorat qilish usullari (medicina, biologiya);
4. Harbiy sanoat obyektlarida va favqulodda holatlarda degazasiya va dezinfeksiya qilishga ishlatiladigan nanozarrachalar (aerozol) tayyorlash, xossalarini nazorat qilish va ishlatish usullari;
5. Zamonaviy axborot-aloqa vositalari, kompyuterlar uchun yangi fizikaviy asoslar, texnik vositalar yaratish, masalan, o'ta tez ishlaydigan kompyuterlar uchun o'ta katta sig'imli magnit saqlagichlar – triggerlar;

6. O'ta ixcham va tejamkor, tez ishlaydigan axborot-aloqa va hisoblash, texnologik jarayonlarni nazorat qilish vositalarining fizikaviy asoslari va texnik vositalarini yaratish (atom-molekulyar dizayn, integral sxemalar, datchiklar);

7. Fullerenlar va nanonaychalar (fizika) ning fizikaviy va kimyoviy xossalari, ularni tayyorlash va qo'llash usullari;

8. Nanokatalizatorlar (nanosorbentlar, solishtirma yuzasi $600 \text{ m}^2/\text{g}$ bo'lgan filtrlar (kimyo) tayyorlash va xossalarini o'rganish usullari;

9. Kvant nuqtalar asosida lazerlar va svetodiodlar (nanoelektronika) – samaradorligi yuqori yoki to'lqin uzunligi keng oraliqda bo'lgan yorug'lik manba'larining fizikaviy asoslari va tayyorlash texnologiyasi, nazorat usullari;

10. Foton kristallar (fotonika) – o'lchamlari yorug'lik to'lqini uzunligidan ko'p marta kichik 1, 2 va 3 o'lchamli davriy tizilmalar – ixcham va tez ishlaydigan optik kompyuterlar, aloqa vositalari (informasiya uzatish va qabul qilishning optik usullari) ning fizikaviy asoslari va ularni tayyorlash usullari;

11. Uranni qadoqlash vositalari (nanonaychalar - energetika) – atom elektr stansiyalarining issiqlik chiqaruvchi elementlarini tayyorlash va ishlatilganlarini xavfsiz saqlash mumkin bo'lgan shaklga keltirish vositalari va usullari;

12. Nanomexanika – nanoo'lchamli robotlar yoki manipulyatorlarning ishlashining fizikaviy asoslari, ularni tayyorlash va ishlatish usullari;

13. Nanomateriallar va nanotizimlarda massa, energiya va zaryad tashish jarayonlari (diffuziya, issiqlik o'tkazuvchanlik, elektr o'tkazuvchanlik, energiyani bir turdan boshqa turga aylantirish, masalan, fotoEYuK hamda termoEYuK hosil bo'lish jarayonlari);

14. Qishloq xo'jaligi mahsulotlarini yetishtirish, saqlash va qayta ishlashda nanomasshtabdagi fizikaviy va kimyoviy jarayonlar, ularni o'rganish usullari va vositalari.

1.3. Nanofizika bizga nima beradi?

1. O'ta mustahkam va o'tay engil, odatdagi usullar bilan yetishish mumkin bo'lmagan xossalarga ega materiallar tayyorlash (materialshunoslik). Bunda ko'pgina fizikaviy va kimyoviy jarayonlar chambarchas bog'langan. Hozir bir o'lchamli (uglerod nanonaylari) va ikki o'lchamli (grafen) nanomateriallar mavjud, ularning pishiqligi eng yaxshi po'latnikidan 4-10 baravar yuqori, zichligi esa 2-3 marta kam;

2. Lengmyur-Blojet qatlamlari (sun'iy burun, qalinligi 1 molekula) – kimyoviy va biologik (turli moddalarning, shu jumladan odamlar va hayvonlar uchun xavfli

moddalarning judakam miqdorini – hatto ayrim molekulalargacha–aniqlash imkonini beradi);

3. Qon aylanish tizimiga tez yetkaziladigan nanotuzilishli dorilar (medisina, biologiya) – dori molekulalarini tashuvchi nanozarrachalarga biriktirish, o'zgartirmasdan lozim joyga yetkazish va joyiga borganda ajratib olish vositalari hamda usullari;

4. Harbiy sanoat obyektlarida va favqulodda holatlarda degazasiya va dezinfeksiya qilishga nanozarrachalar (aerozol), qo'shimcha 2-bandni qarang;

5. O'ta tez ishlaydigan kompyuterlar uchun o'ta katta sig'imli magnit saqlagichlar – triggerlar. Ishlashi – fizikaviy, tayyorlanishi – fizikaviy va kimyoviy, ishlash tezligi 10^{12} s gacha;

6. Atom-molekulyar dizayn (integral sxemalar, datchiklar) va tayyor mahsulot xossalari aniqlash, lozim yo'nalishda o'zgartirish usullari;

7. Xossalari shu paytgacha ishlatib kelingan materiallardan tubdan farq qiluvchi fullerenlar va nanonaychalar (fizika), grafen – ishlashi fizikaviy, tayyorlanishi–fizikaviy va kimyoviy jarayonlar;

8. Turli moddalarni o'rganishda va ishlab chiqarishda kerakli, tanlangan reaksiyalarni amalga oshirishni ko'p marta tezlashtiradigan (yoki umuman bunga imkon yaratadigan) nanokatalizatorlar (nanosorbentlar, solishtirma yuzasi $600 \text{ m}^2/\text{g}$ bo'lgan filtrlar - kimyo);

9. Kvant nuqtalar asosida lazerlar va svetodiodlar (nanoelektronika) – samaradorligi yuqori yoki to'liq uzunligi keng oraliqda yorug'lik manba'lari, faqat nanotexnologiya usullari bilan tayyorlash mumkin;

10. Fotonkristallar (fotonika) – o'lchamlar iyorug'lik to'liqini uzunligidan ko'p marta kichik 1, 2 va 3 o'lchamli davriy tizilmalar – ixcham va tez ishlaydigan kompyuterlar, aloqa vositalari (informasiya uzatish va qabul qilishning optik usullari);

11. Uranni qadoqlash (nanonaychalar - energetika) – atom elektr stansiyalarining issiqlik chiqaruvchi elementlarini tayyorlash va ishlatilganlarini xavfsiz saqlash mumkin bo'lgan shaklga keltirish vositalari va usullari;

12. Nanomexanika – nanoo'lchamli robotlar yoki manipulyatorlar yaratish, ulardan foydalanish usullari, shu jumladan nanojarrohlik qurilmalari;

13. Sanoat va ro'zg'or uchun samarali, arzon energiya (asosan elektr energiyasi) manbalari va ularga nanotizimli materiallar;

14. Qishloqxo'jaligimahsulotlariniyetishtirish, saqlashvaqaytaishlashningyangi,

samaraliusullarivavositalari.

1.4. O'zbekistonda nanofizika va nanotexnologiyalar istiqboli

O'zbekistonda nanofizika va nanotexnologiyalardan foydalanishning hozirgi kundagi asosiy yo'nalishlari:

1. Qishloq xo'jaligi mahsulotlarini yetishtirish, saqlash va qayta ishlash, jumladan, a) agrotexnikada deyarli barcha o'simliklarning hosildorligini, noqulay ob-havo sharoitiga chidamliligini oshiradigan nanoo'g'itlar, yig'ilgan hosilni saqlashga tayyorlash va qayta ishlashga turlinanozarrachali vositalar; b) chorvachilik davaparrandachilik damikroiqlim yaratish, mahsuldorlikni oshirish va kasalliklarning oldini olish uchun ozuqamoddalariga qo'shimchalar; v) sun'iy oziq-ovqat mahsulotlari;

2. Nanokataliz – kimyo va neft kimyo sanoatida;

3. Nanozarrachali va nanotizimli energiyani o'zgartiruvchi (foto- va termoelektrik, fotokatalitik) va energiya tashilishini yaxshilovchi (nanosuyuqliklar) materiallar;

4. Salbiy ekologik ta'sirlarni pasaytirish vositalari (masalan, oqava suvlarni tozalash, qurigan Orol tubidagi tuzlarning, atrofidagi qumlarning ko'chishiga to'sqinlik qiladigan, undagi o'simliklarni suv bilan ta'minlashni yaxshilaydigan gidrogel materiallar).

1.5. Nanotexnologiyalar hamisha foydalimi?

Insoniyat yaratgan barcha yangiliklar kabi, nanotexnologiyalarning ham ijobiy va salbiy tomonlari mavjud. Ijobiy tomonlarini yuqorida sanab o'tdik. Endi uning salbiy jihatlariga nazar tashlaymiz. Ular odatda yangilikning turli jihatlarini yetarlicha o'rganmaslik oqibati bo'ladi.

“O'pkaga tushgan nanozarrachalar hечqanday to'sqinliksiz o'pkaning pardasi orqali jismimizga singadi va qaytib chiqmaydi. Kunlar va oylar davomida kremniy dioksidi o'pkamizda to'planib, miqdori ortib boraveradi, nafas olishimizni va yashashimizni kundan kunga qiyinlashtiraveradi. Flyuorografiyada bu narsa o'pka sili kabi namoyon bo'ladi” (Dmitriy Jerebsov, kimyo fanlari kandidati, “Nanotexnologiyalar” ilmiy-ma'rifiy markazi muhandis-tadqiqotchisi).

Qattiq nanozarrachalar tabiatda deyarli ma'lum emas, jismimizdagi hujayralarning ko'pchiligi nanoobyektlardan ancha katta, va ularning (hujayralarning) hosil bo'lishi ancha qiyin. Kelib chiqishi mumkin bo'lgan xavf shundan iboratki, bu nanozarrachalar jismimizga singib, bizning tabiiy hujayralarimiz bilan o'zaro ta'sir qilishi mumkin, buning oqibati esa noma'lum. Shuning uchun tadqiqotchilar nanotexnologiyalarni tibbiyotda juda ehtiyotkorlik bilan qo'llash zarurligini aytishmoqda, chunki *evolyusiya odatdagi yashash muhitida*

deyarli uchramaydigan xossalarga ega moddalarga qarshi himoya mexanizmlarini yaratmagan.

2-ma`ruza. Qattiq jismlar fizikasi elementlari

REJA

- 3.1. *O'lchashlarning fizikadagi o'rni. Qattiq jismlarning o'lchanadigan xossalari va o'lchash usullari*
- 3.2. *Metallarda elektr o'tkazuvchanlik – Drude va Zommerfeld nazariyalari*
- 3.3. *Videman-Frans qonuni va metallarda zaryad hamda issiqlik tashish*
- 3.4. *Metallarda elektr o'tkazuvchanlik – kvant nazariyasi*
- 3.5. *Metallarning kristall panjarasi. Blox funksiyasi. Kronig-Penni modeli*

Tayanch iboralar: elektr o'tkazuvchanlik, issiqlik o'tkazuvchanlik, erkin elektronlar, kristall panjara, Blox funksiyasi, energetik zonalar, Fermi energiyasi.

2.1. O'lchashlarning fizikadagi o'rni

Fizika mohiyati bo'yicha jismlarning yoki hodisalarning biror xossasini o'lchashga va natijalarni taqqoslashga asoslangan. Ko'rinib turibdi-ki, o'lchash asboblari va usullari, o'lchanadigan xossalarni to'g'ri tanlash bunda muhim ahamiyat kasb etadi. Nanotexnologiyalarda va ularning asosi bo'lgan nanofizikada biz asosan qattiq jismlar bilan ishlaymiz. Shunga ko'ra qattiq jismlarning o'lchanadigan asosiy fizikaviy xossalarini va ularni o'lchash usullarini eslatib o'tamiz:

- Geometrik xossalari – uzunligi, qalinligi, eni
- Massasi (zichligi, solishtirma og'irligi)
- Mexanik xossalari (Yung moduli, mustahkamlik chegarasi)
- Issiqlik xossalari (issiqlikdan kengayish koeffitsiyenti, solishtirma issiqlik sig'imi, erish temperaturasi, tuzilishining o'zgarishi – faza o'tishlari)
- Elektr xossalari (solishtirma qarshiligi va uning temperatura bo'ylab o'zgarishi, dielektrik doimiysi, Kyuri temperaturasi)
- Magnit xossalari (magnit singdiruvchanligi, qoldiq magnitlanish, koersitiv kuchi, to'yinish magnitlanganligi, Kyuri temperaturasi)
- Termoelektrik va termomagnitik xossalari (termoeyuk - Zeyebek, Peltze va Tomson koeffitsiyentlari, Nernst-Ettingsgauzen koeffitsiyenti)
- Optik xossalari (sindirish va yutish koeffitsiyentlari, ularning temperaturaga va to'liq uzunligiga bog'liqligi, qutblanish)
- Tuzilishi – atomlar qanday joylashgan (rentgen nurlari difraksiyasi)

Nanofizikada o'rganiladigan obyektlarning o'lchami juda kichikligi sabab ularning ko'pgina xossalarini o'rganish uchun odatdagi, bevosita o'lchash usullari to'g'ri kelmaydi, va boshqa, nanomasshtabga xos bo'lgan, yangi fizikaviy jarayonlarga, qonuniyatlarga asoslangan o'lchash usullar hamda vositalari yaratilishi lozim. Masalan, nanozarrachalarning o'lchamini aniqlash uchun lazer nurining sochilishi qonuniyatlari

(Mi nazariyasi), nanoqatlamlarning tarkibi va qalinligini aniqlash uchun rentgen fluoressent spektrometridan, optik ellipsometrdan, elektr o'tkazuvchanligi va dielektrik singdiruvchanligini aniqlashda infraqizil yoki optik spektrlardan foydalaniladi, va hokazo.

2.2. Metallarda elektr o'tkazuvchanlik –Drude va Zommerfeld nazariyalari

Metallarning elektr o'tkazuvchanligining birinchi nazariyasini Drude yaratgan edi. Bu nazariyaga ko'ra metallarda elektr tokini erkin elektronlar hosil qiladi. Metall atomlari kristallga birlashganda valent elektronlari umumiy lashib, material bo'ylab erkin harakat qilish imkoniga ega bo'ladi, va bu elektronlar "elektron gazi" deb ataladi.

Erkin elektronlar issiqlik ta'sirida betartib, xaotik harakatda bo'ladi, bu xaotik harakatning tezligi v harorat T ga mos:

$$\frac{m\langle v_T^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2}kT. \quad (2.1)$$

Metallga tashqi elektr maydoni E ta'sir qilganda, erkin elektronlar maydonga qarshi yo'nalishda harakatga keladi va ular tashiydigan zaryad $dq = neS\langle v \rangle dt$, o'tayotgan tok esa $I = neS\langle v \rangle$ bo'ladi, mos ravishda tok zichligi $j = ne\langle v \rangle$. Odatdagi temperaturada (300 K) $v_T \approx 10^5$ m/c, $v \approx 10^{-3}$ m/c.

Drude nazariyasida erkin elektronlar tashqi elektr maydoni ta'sirida a tezlanish oladi: $a = eE/m$ va keyingi to'qnashuv gacha ular $v = at$ tezlikka erishadi. $\tau = \langle l \rangle / v_T$ bo'lgani uchun $j = ne^2\tau E/m$, ya'ni $j = ne^2\langle l \rangle E / (mv_T)$. Demak, $\sigma = ne^2\langle l \rangle / (mv_T)$, $\mu = e\langle l \rangle / (mv_T)$.

Bu nazariya tajribaga zid, chunki $v_T \sim \sqrt{T}$, $\sigma \sim 1/\sqrt{T}$, tajribada esa $\sigma \sim 1/T$.

Bundan tashqari, elektron gazning issiqlik sig'imi tajribadagidan 100 marta katta.

Drude nazariyasining tajribaga zidligi sababi – erkin elektronlarning energiya (impuls) bo'ylab taqsimlanishi Maksvell-Bolsman statistikasiga bo'ysinadi, - degan taxmin edi:

$$f(p) = \frac{1}{(2\pi mk_B T)^{3/2}} \exp\left(-\frac{p^2}{2mk_B T}\right). \quad (2.2)$$

Bunda p – elektronning impuls, m - massasi, k_B - Bolsman doimiysi.

Zommerfeld nazariyasi Fermi-Dirak statistikasiga asoslangan bo'lib, tajribaga mos keladi:

$$f(E) = \frac{g_i}{\exp\left(\frac{E_i - E_F}{k_B T}\right) + 1}. \quad (2.3)$$

Bunda g_i – energetik sathning vazn funksiyasi (aynish karraligi), E_i – i - sathning energiyasi, E_F – Fermi energiyasi.

Fermi energiyasi E_F – absolyut nol temperaturada metallda elektronlar egallashi mumkin bo‘lgan eng yuqori energiya sathi.

Drude nazariyasining kamchiliklarini hisobga olib yaratilgan Zommerfeld nazariyasida elektron gazning issiqlik sig‘imi

$$c_V = \frac{\pi^2 k T}{2 E_F} n k \quad (2.4)$$

tajribaga mos keladi.

Natijada magnit maydonida qarshilik o‘zgarishi, elektr o‘tkazuvchanlik, termoelektrik va termomagnitik hodisalarni, Videman-Frans qonuni $\kappa/\sigma = L_0 T$ ni tushuntirildi. Bunda κ – metallning issiqlik o‘tkazuvchanligi, $L_0 = 3(k_B/e)^2 \approx 2,22 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$ – Lorens doimiysi, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ – Bolsman doimiysi.

Ammo Zommerfeld nazariyasi nimaga ko‘pgina metallarda Xoll koeffitsiyentining ishorasi musbatligini tushuntira olmadi.

2.3. Videman-Frans qonuni va metallarda zaryad hamda issiqlik tashish

Tajriba natijasi bo‘lgan Videman-Frans qonuni $\kappa/\sigma = L_0 T$ metallarning elektr o‘tkazuvchanligi σ ularning issiqlik o‘tkazuvchanligi κ bilan chambarchas bog‘langanligini ko‘rsatadi. Elektr o‘tkazuvchanligi erkin elektronlar (“elektron gaz”) ning tashqi elektr maydonida bir yo‘nalishda harakati bilan bog‘liq ekanligi Drude nazariyasida asoslangan edi. Demak, Videman-Frans qonuniga muvofiq metallarda issiqlik o‘tkazuvchanligi ham elektronlarning harakati bilan bog‘liq, ya’ni issiqlik o‘tkazish jarayonida elektronlarning energiya tashishi asosiy omil bo‘ladi.

Videman-Frans qonuni elektronlarning relaksatsiya vaqti yondoshuviga (elastik to‘qnashuvlar) asoslangan bo‘lib, elastik bo‘lmagan to‘qnashuvlar metallarning elektr o‘tkazuvchanligiga ta’sir ko‘rsatmasdan, issiqlik

. Bu nazariyaning asosiy cheklanishi – kristall panjaraning kuch maydonida (potensialda) faqat birgina elektronning harakati o‘rganiladi, chunki ko‘pzarrachali tizimlarning xossalari muammosini hatto klassik fizika chegarasida ham hal qilish imkoni yo‘q.

2.4. Metallarning kristall panjarasi. Blox funksiyasi. Kronig-Penni modeli

Kristall panjarada atomlar fazoda qat'iy tartibda joylashgan bo'lib, bu tartibning takrorlanish davri uch yo'nalishda a , b va c (o'tkazuvchanligini kamaytirishi mumkin. Bundan tashqari, Videman-Frans qonuniga bo'ysinmaydigan materiallar ham topildi – vanadiy dioksidi odatdagi sharoitda shaffof dielektrik bo'lib, harorat 67°S dan oshganda metall holatga o'tadi (elektr tokini yaxshi o'tkazadi), lekin issiqlik o'tkazuvchanligi bo'yicha dielektriklarga yaqin.

2.5. Metallarda elektr o'tkazuvchanlik – kvant nazariyasi

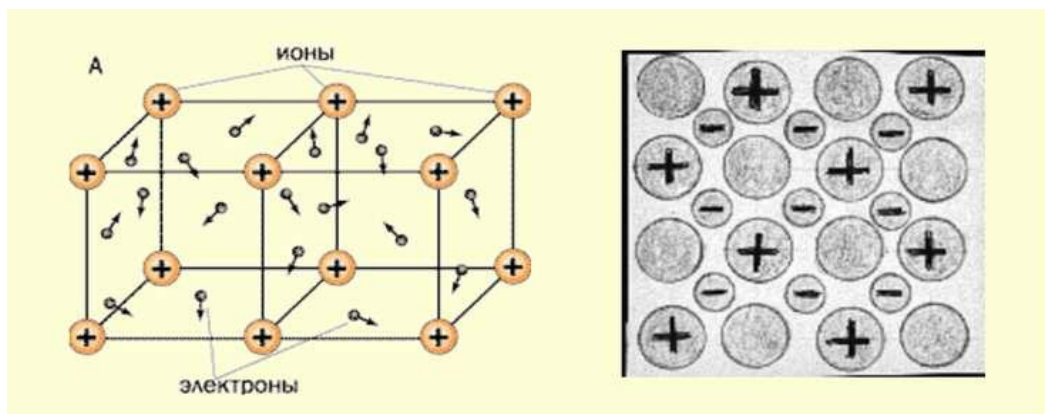
Drude va Zommerfeld nazariyalarining kamchiliklari metallarda elektr o'tkazuvchanligining keyinchalik yaratilgan kvant nazariyasida tuzatildi. Bu nazariyada kristall panjara mavjudligi va elektronlar metall ichida davriy potensial ta'sirida harakatlanishi hamda panjara nuqsonlarida sochilishi hisobga olinib, energetik zonalar, Fermi energiyasi va Fermi sathlari tushunchalari kiritildi. Natijada metallarning deyarli barcha asosiy xossalarini, shu jumladan, musbat zaryad tashuvchilar paydo bo'lishini (Xoll koeffitsiyentining ishorasi musbatligini) tushuntirish imkoni yaratildi.

Metallar elektr o'tkazuvchanligining kvant nazariyasida kristall panjarada atomlar joylashuvining davriyligi, simmetriyasi va ulardan kelib chiqadigan elementar yacheyka tushunchalari muhim. Oqibatda namunadagi barcha atomlar (taxminan 10^{23} sm^{-3}) ga tegishli harakat tenglamalarini yoki Shredinger tenglamalarini yechish (hal qilib bo'lmaydigan muammo!) o'rniga birnecha atomlar hosil qilgan kuch maydonida elektronlarning harakatini ta'riflash mumkin bo'ldi. \vec{k} – трансляция вектори \vec{a} :

Атомларнинг жойлашувидаги даврийлик улар ҳосил қилган ва электронларнинг ҳаракатини бошқарувчи потенциал $U(\mathbf{r})$ га ҳам хос бўлиб, Блох теоремаси билан ифодаланади:

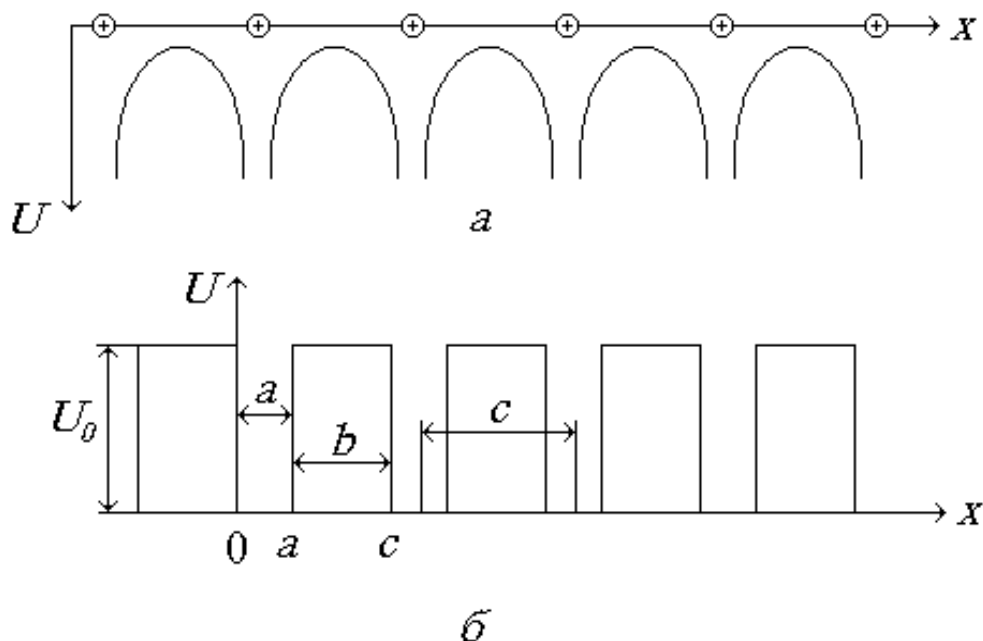
$$U(\mathbf{r}) = U(\mathbf{r} + \mathbf{a}). \iff U(\mathbf{r}) = U_0(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}}. \quad (2.6)$$

Bunda \mathbf{r} – elementar yacheyka ichida elektron joylashgan nuqtaning radius-vektori, \mathbf{k} – teskari panjara vektori. (2.6)-shartga mos funksiya Blox funksiyasi deyiladi.



2.1-rasm. Chapda - kristall panjarada atomlarning joylashuvi va elektronlarning xaotik harakati. O'ngda – musbat zaryadli ionlar va manfiy zaryadli elektronlarning o'zaro joylashuvi natijasida zaryad neytralligi ta'minlanishi

Natijada kristall panjaradagi atomlar hosil qilgan potensial $U(\mathbf{r})$ grafigi aslida 2.2a-rasmda ko'rsatilganday bo'ladi.



2.2-rasm. Atom potentsiallarining umumlashtirilgan taqsimlanishi (a) va Kronig-Penni modelida ishlatilgan to'g'ri to'rtburchak potensial (b)

Ammo bunday potensial maydonda elektronlar holati uchun Shredinger tenglamasini yechish iloji yo'qligidan uni soddalashtiriladi. Natijada 2.2b –rasmda ko'rsatilgan soddalashtirilgan potensial ta'sirida harakatlanayotgan elektron uchun stasionar (vaqtga bog'liq bo'lmagan) Shredinger tenglamasi potensial to'siqdan chapda, to'siq ichida va to'siqdan o'ngda quyidagicha yoziladi:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi(x) - \lambda^2 \psi(x) &= 0, & -b \leq x \leq 0; \\ \nabla^2 \psi(x) - \chi^2 \psi(x) &= 0, & 0 \leq x \leq a. \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\lambda^2 = 2m(U_0 - E) / \hbar^2, \quad \chi^2 = 2mE / \hbar^2.$$

Bu tenglamalarning yechimi ko'rsatilgan uchala hudud uchun

$$\left. \begin{aligned} \psi_1(x) &= C e^{\lambda x} + D e^{-\lambda x}, & -b \leq x \leq 0 \\ \psi_2(x) &= A e^{\chi x} + B e^{-\chi x}, & 0 \leq x \leq a \\ \psi_3(x) &= C_1 e^{\lambda x} + D_1 e^{-\lambda x} = e^{i\varphi} [C e^{\lambda(x-a)} + D e^{-\lambda(x-a)}], & a \leq x \leq a+b \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

ko'rinishida bo'ladi.

Chegara shartlari

$$\begin{aligned}\psi_1(0) &= \psi_2(0), & \psi_2(a) &= \psi_3(a), \\ \psi_1'(0) &= \psi_2'(0), & \psi_2'(a) &= \psi_3'(a),\end{aligned}\quad (2.9)$$

uchun (2.8) yechimning koeffitsiyentlari aniqlanadigan sekulyar tenglamalar tizimidan

$$\begin{aligned}A + B - C - D &= 0, \\ i\chi A - i\chi B - \lambda C + \lambda D &= 0, \\ e^{i\chi a} A + e^{-i\chi a} B - e^{i\varphi - \lambda b} C - e^{i\varphi + \lambda b} D &= 0, \\ i\chi e^{i\chi a} A - i\chi e^{-i\chi a} B - \lambda e^{i\varphi - \lambda b} C + \lambda e^{i\varphi + \lambda b} D &= 0.\end{aligned}\quad (2.10)$$

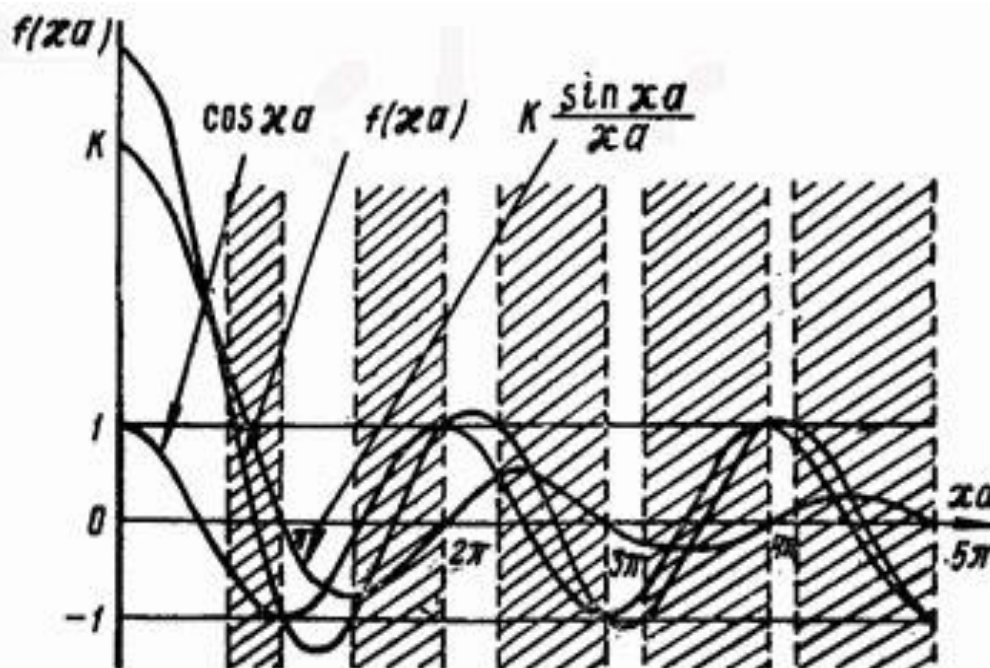
topiladigan λ va χ o'zaro hamda φ va energiya bog'lanadi:

$$\frac{\lambda^2 - \chi^2}{2\lambda\chi} \sin \chi a \operatorname{sh} \lambda b + \cos \chi a \operatorname{ch} \lambda b = \cos \varphi.\quad (2.11)$$

Kronig va Penni bu tenglamani grafik usulda yechib, elektronlarning energiyasi uchun ruxsat etilgan va taqiqlangan qiymatlar (o'tkazuvchanlik hamda valent zonalari va taqiqlangan zonalar) mavjudligini aniqlashdi (2.3-rasm). Bunda

$$K = mbaU_0 / h^2,$$

$$k = \varphi / a$$



2.3-rasm. Kronig-Penni modelida ruxsat etilgan va taqiqlangan energetik zonalar

Mana shu soddalashtirilgan model asosida metallar, dielektriklar va yarimo'tkazgichlar qanday farq qilishi ma'lum bo'ldi (2.4-rasm):

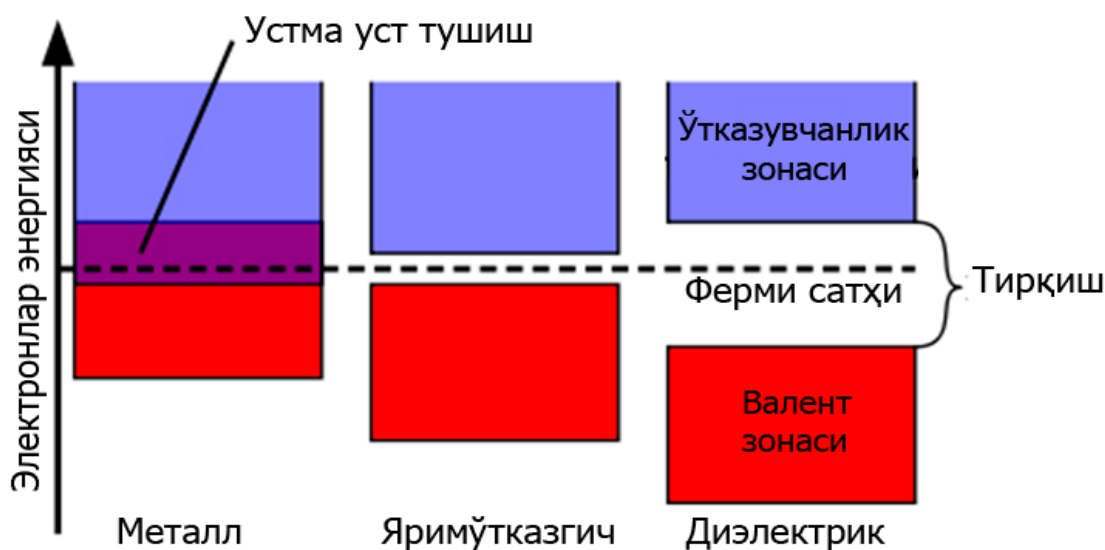
metallarda taqiqlangan energetik zonalar yo'q, absolyut nol temperaturada elektronlar band qilgan oxirgi energetik zona (valent zonasi) bilan undan keyingi bo'sh

zona (o'tkazuvchanlik zonasi) qo'shilib ketadi va harorat oshganda elektronlar valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga bimalol o'ta oladi va, demak, zaryad tashishda qatnasha oladi (namuna orqali elektr toki o'tad);

- dielektrlarda valent zonasi bilan o'tkazuvchanlik zonasi o'rtasida taqiqlanan zona bor, va elektronlar valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishlari uchun ularga kattagina energiya berish (masalan, kuchli qizitish) lozim. Odatda taqiqlangan zonasining kengligi 3 eV dan katta materiallar dielektrlar deb hisoblanadi va ularda xona temperaturasida elektr o'tkazuvchanlik e'tiborga olmaslik darajasida bo'ladi.

- yarimo'tkazgichlar taqiqlangan zonasining kengligi odatda 2 eV dan kam bo'lib, xona temperaturasida sezilarli elektr o'tkazuvchanligi mavjud.

Ammo keyingi yillarda taqiqlangan zonasining kengligi 3 eV dan kattaroq moddalarni ham yarimo'tkazgichlar qatoriga qo'shib, ular asosida diodlar, tranzistorlar tayyorlay boshlashdi. Bunday diod va tranzistorlar yuqori haroratda, katta toklarda va yuqori kuchlanish ostida ishlashga qodirlik bilan tadqiqotchilarni hamda sanoat vakillarini jalb etmoqda.

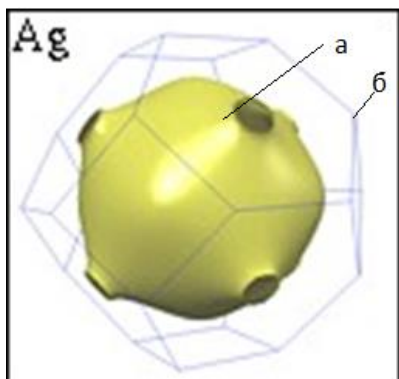


2.4-rasm. Metal, yarimo'tkazgich va dielektrlarda energetik zonalar

Metallarda elektronlarning energetik holatini va harakati imkoniyatlarini tasvirlash uchun Fermi energiyasi, Fermi sathi, Fermi to'liqin uzunligi tushunchalari kiritiladi. Fermi energiyasi E_F bilan biz yuqorida (2.3) taqsimlanish funksiyasida tanishgan edik. Fermi sathi impuls (Fermi to'liqin vektori) fazosida Fermi energiyasi E_F ga mos izoeneretik sath bo'lib, uni hatto metallarning pasporti deb ham atashadi (2.5-rasm), chunki bu sathning shakli elektronlarning energetik holati va harakatini to'la belgilaydi. Fermi energiyasiga (Fermi sathiga) mos keladigan elektronning to'liqin uzunligi

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{2\pi^2 \hbar^2}{m^* E_F}}$$

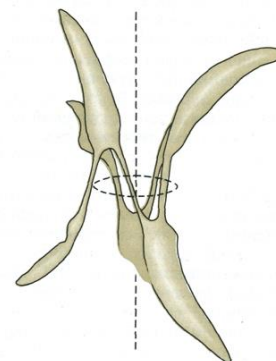
Fermi to'liqin uzunligi deb ataladi. Bunda $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 6,582 \cdot 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s}$ – Plank doimiysi, $m^* = \hbar^2 [d^2k/dE^2]$ - elektronning effektiv massasi.



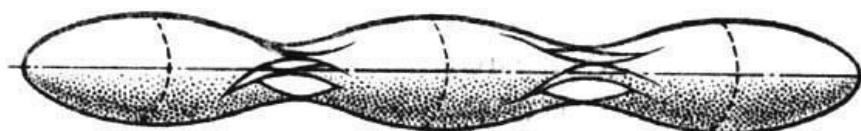
Мис, кумуш ва олтиннинг Ферми сатҳи



Бериллийнинг Ферми сатҳи



Маргумушнинг Ферми сатҳи



Графитнинг Ферми сатҳи

3-ma`ruza. Nanomateriallar. Fulleren, uglerod nanonaylari va grafen. Ularning fizik xususiyatlari va amaliyotda qo`llanishi

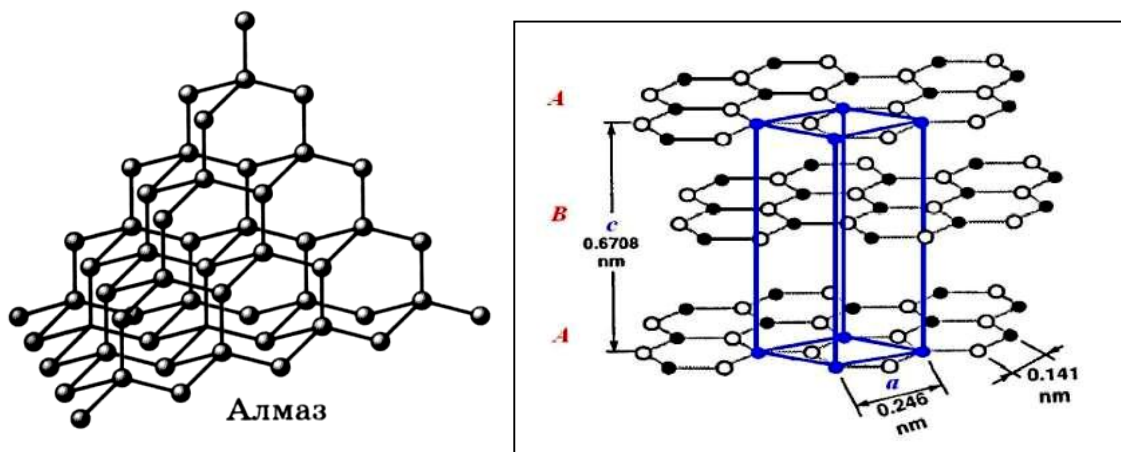
REJA

- 3.1. Fulleren nima va uning qo`llanilishi
- 3.2. Fullerenlarning qo`llanilishi
- 3.3. Uglerod nanonaylari va qo`llanilishi
- 3.4. Grafen

Tayanch iboralar: fulleren, uglerod, grafen, nanonaylar, fullerit, alotropik shakl, ugleplastik, grafen.

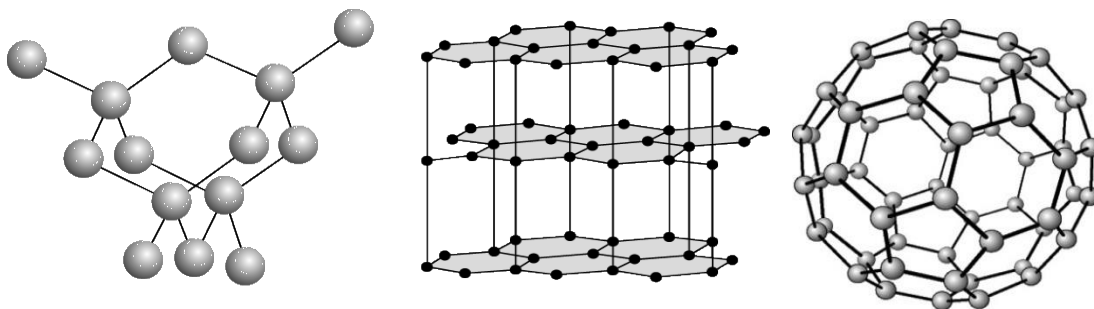
3.1. Fulleren nima va uning qo`llanilishi

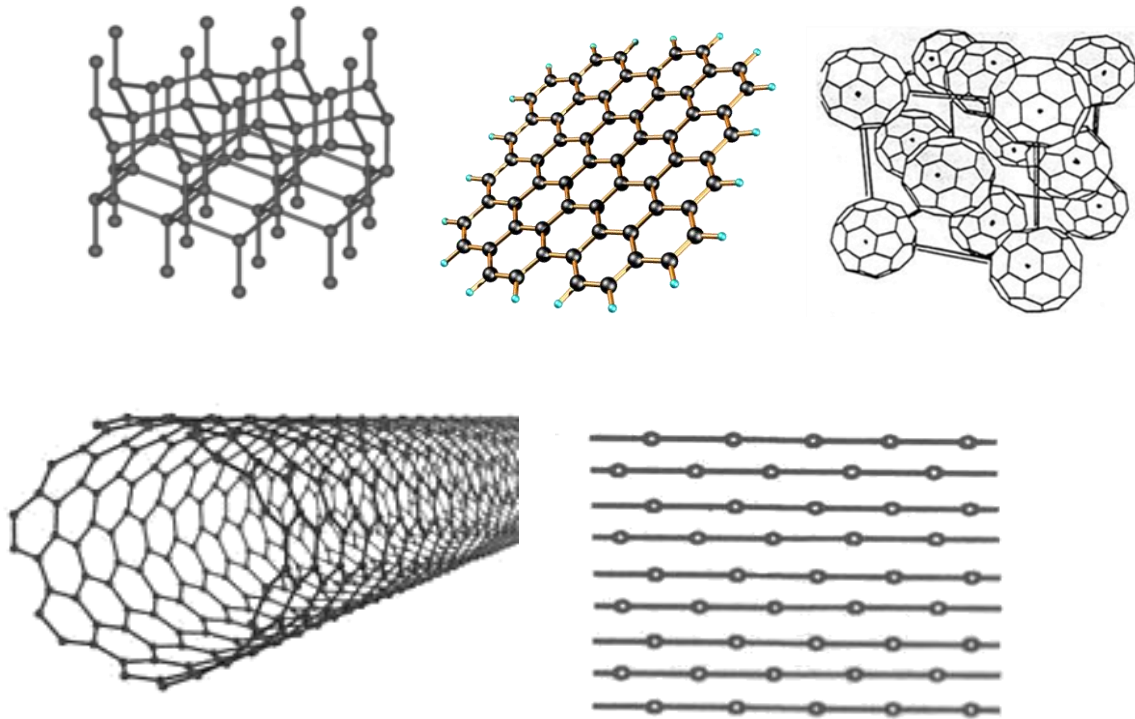
Fulleren haqida bilishimiz uchun, oldin ayrim narsalarni qayta eslab o`lishimiz va ko`z oldimizga keltirishimiz dardkor. Barchamizga ma`lumki uglerodning uchta allotropic ko`rinishi mavjuddir. Ya`ni: олмос, графит, кюя. 1-rasmda uglerodning ayrim tasvirlarini ko`rishimiz mumkin.



3.1-rasm.Uglerodning allotropic tasvirlari.

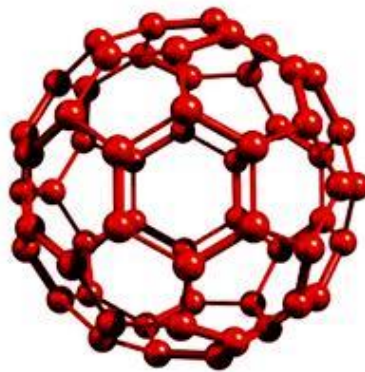
Bundan tashqari uglerodning allotropic shakllarini ham turli ko`rinishlari mavjud. Bu narsalar ma`lum bo`lsada, yana bir bor ko`z oldimizga keltirib olishimiz kerak.





3.2-rasm. Uglerodning alotropik shakllari.

Endi fulleren nima, degan savolimizga javoblar izlaymiz. Fulleren 1985 yilda kashf qilingan bo'lib, formulasi C_n ko'rinishida yoziladi. Strukturaviy tuzilishi C_{60} da eng kichkina va juda chiroyli ko'rinishga ega bo'ladi (3-rasm). Yana ajoyib xususiyati shundaki xona haroratida fulleren simmetriya o'qi atrofida 10^{12} aylanish/c tezlik bilan aylanadi.



3.3-rasm. C_{60} fullerenning strukturaviy ko'rinishi.

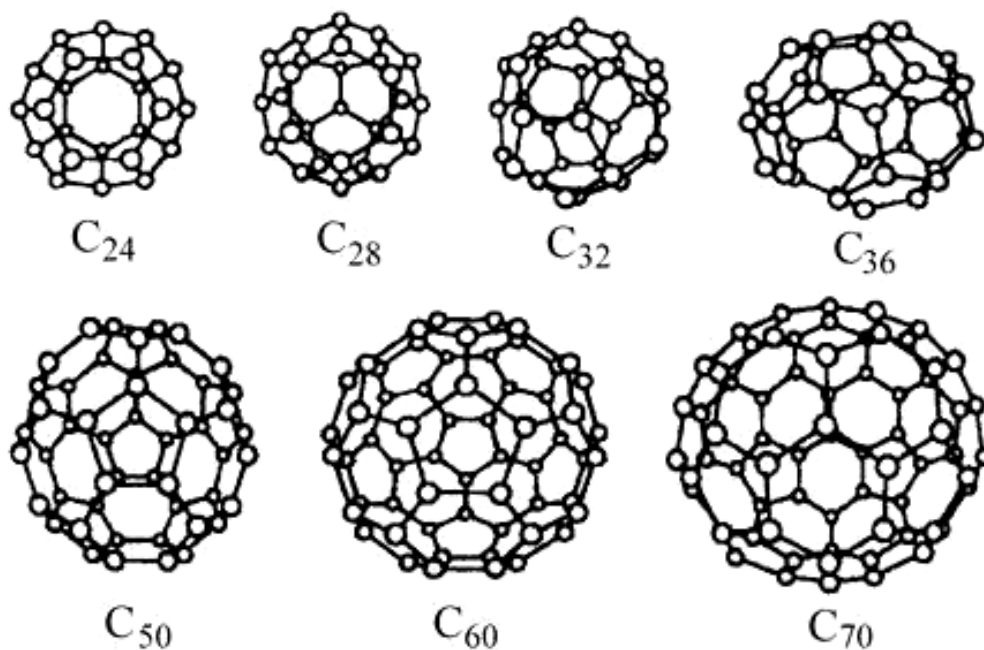
C_{60} fullerenda 5-karrali simmetriya elementlari bor. Buni pentagon ham deb, atashadi. Bunday simmetriya noorganik kristallar uchun ta'qiqlangan bo'lib, biz bu fullerenni organik kristall deyishimizga to'g'ri keladi. C_{60} fullerenning har xil holatlardagi, ya'ni yagona molekula, qattiq va eritma holatlaridagi xossalariga bag'ishlangan ko'plab masalalar bor. Harorat 600K dan past bo'lgan holatlarda C_{60}

fullereni molekulyar kristallar hosil qiladi.

Gaz fazasidan yuqori tozalikdagi (99,98% ga yaqin) kristallar o'stirish mumkin. Qattiq holatdagi fullerenlar *fulleritlar* deb ataladi.

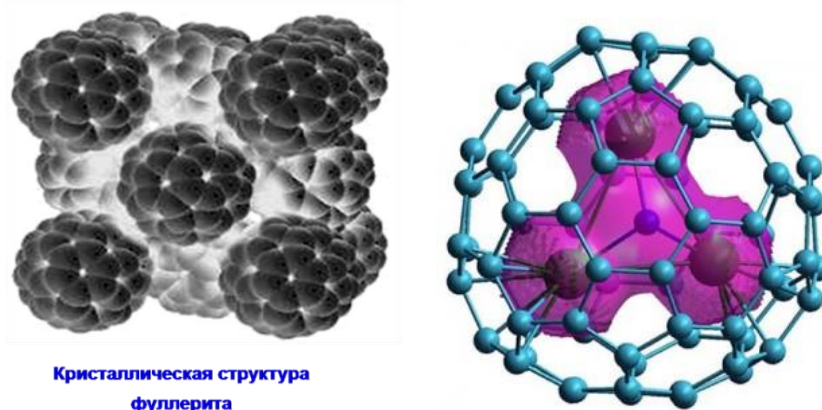
Fullerenning o'ziga xos bo'lgan muhim xususiyatari.

- fullerenning ichiga turli elementlarning atomlarini va hattoki butun molekulalarini ham joylashimiz mumkin
- yozuv zishligi $4 \cdot 10^{12}$ bit/sm² gacha bo'lgan magnit xotiraga ega
- mashinalarning ishqalanuvchi qismlari uchun moy



3.4-rasm.Fullerenlarning turlari.

Toza fullerit yorug'lik ta'sirida parchalanib ketadi, shuning uchun uni faqat qorong'uda saqlash mumkin. Fulleritni ishqoriy metallar bilan legirlash orqali o'tkazuvchanlik va hatto o'ta o'tkazuvchanlikni hosil qilish mumkin.



3.5-rasm. Fulleritning kristal strukturasi.

3.6-rasm. Fullerenning ichiga joylashtirilgan molekula

3.2. Fullerenlarning hayotda qo'llanilishi

30-yildan ortiqroq vaqt ichida o'tkazilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdi-ki, fullerenlarning fan va texnikaning turli sohalarida, shu jumladan tibbiyotda keng qo'llashga bo'lgan umid puchga chiqqan edi. Buning isbotini maqola va kitoblarning nomlaridan ham anglashimiz mumkin: (Наноформы углерода для фотовольтаиков: миф или реальность [1]., Мифы нанотехнологий [2]., 1. Martin N. Carbon nanoforms for photovoltaics: myth or reality? *Adv Energy Mater.* 2017;7:1601102., <https://doi.org/10.1002/aenm.201601102>., 2. http://www.debaty.org-/article/tehnology_ukr/analitik_teh/380.html.)

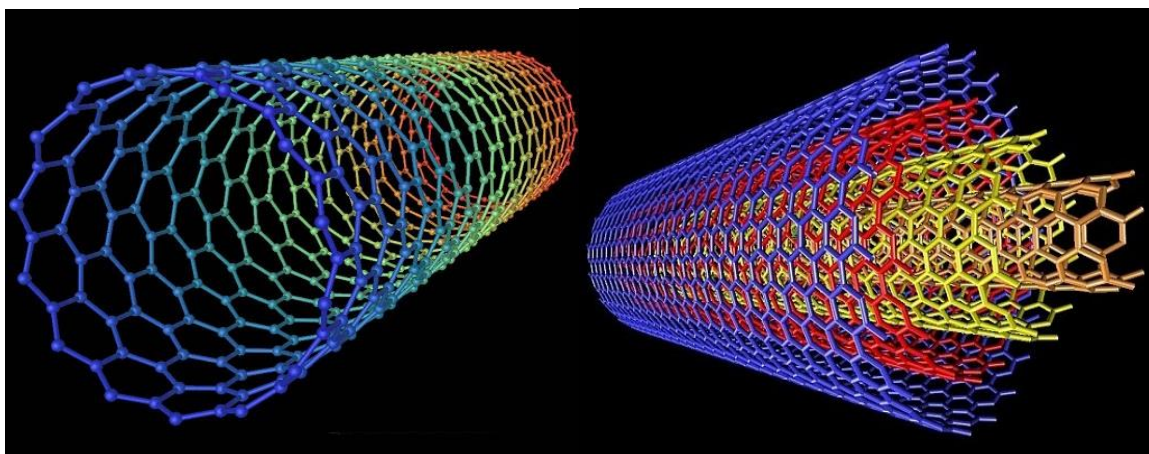
Kosmetika sohasida fullerenlarning qo'llanilishi. Inson terisining bir necha xil himoya vositalari mavjud va yillar davomida foydalanib kelinmoqda. Ammo bu vositalarni qo'llab-quvvatlash uchun mahalliy yordamchi vositalar (masalan, antioksidantlar) kerak. Bundan tashqari, ba'zi antioksidantlar mahalliy (terining ayrim qismlari orqali) qo'llanganda yallig'lanishga qarshi va antikantserogen ta'sir ko'rsatadi. Terining eskirishi oksidlanish kuchayishi oqibati bo'lib, ko'pgina tadqiqotchilar fullerenlar asosida yoshartiruvchi qorishmalar (rejuvenation products) tayyorlash mumkin, - deb hisoblaydi, chunki fullerenlarning antioksidant xossasi yuqori hisoblanadi. Aynan shu antioksidant xossasi fullerenlarni terining oftobdan kuyishiga qarshi kremlar tayyorlash imkonini beradi.

Tibbiyot sohasida fullerenlarning qo'llanilishi. Allergiyaga qarshi vosita va VICH-infektsiyaga qarshi vosita sifatida keng qo'llaniladi.

Texnika sohasida qo'llanilishi. Fullerenlar akkumulyatorlarda va elektr batareyalarida qo'shimcha sifatida ishlatiladi. Hamda yuqori bosim ostida sun'iy olmos olishda qo'shimcha sifatida foydalaniladi va olmos chiqishini deyarli 30 % ga oshiradi. Polimer quyosh batareyalarida, yong'indan himoya qiluvchi bo'yoqlarda ham ishlatiladi. Fullerenlarning qutblanmaydigan suyuqlikda eritmasi optik zatvorlar sifatida ham foydalaniladi va hokazo.

3.3. Uglerod nanonaylariva qo'llanilishi

Uglerodli nanonaylarning diametri 10 nm (15mkm) va uzunligi 1 mkm (bir necha sm) gacha bo'ladi. Diametrlari har xil bo'lganligi sababli, nanonaylarni bir-biriga kiygizish mumkin bo'ladi (8-rasm).



3.7-rasm. Uglyerodli nanonay

8-rasm. Diametrlari har xil bo'lgan nanonaylarni bir-biriga kiygizilgan holati.

Uglyerod nanonaylarining xossalari. Mexanik jihatidan uglyerodli nanonaylar o'ta pishiq vaegiluvchan (kauchukka nisbatan 1000 marta) bo'ladi. Elektr o'tkazuvchanligi diametriga bog'liq bo'lib, yarimo'tkazgichdan metallgacha o'zgaradi. Metall o'tkazuvchanlikka ega nanonaylar elektr tokini misga nisbatan deyarli 1000 marta yaxshi o'tkazadi. Bunda katta tok ta'sirida mis erib, qurilma ishdan chiqadi, nanonayda esa xuddi shunday tok ta'sirida hech qanday o'zgarish bo'lmaydi, chunki nanonaylarning issiqlik o'tkazuvchanligi juda yuqori bo'lib, hatto-ki olmosdan 2 baravar kattadir. Past haroratlardan to 2200°C gacha nanonaylar pishiqligini saqlab qoladi.

Uglyerod nanonaylarining xossalari.

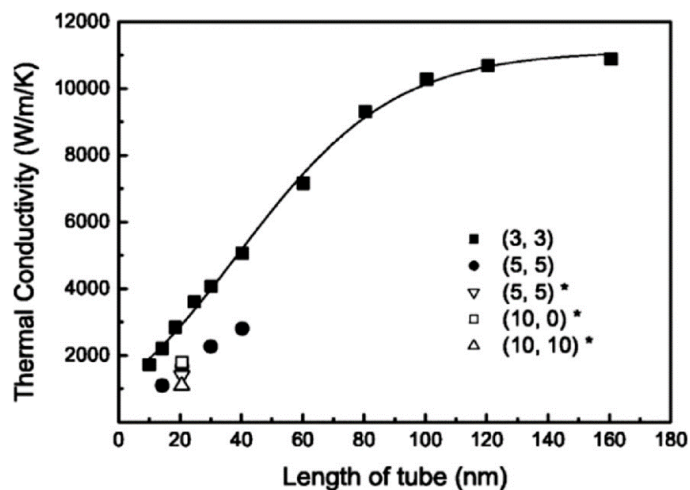
Issiqlik o'tkazuvchanligi
($Vt\ m^{-1}K^{-1}$):

Kumushda - 430

Misda - 401

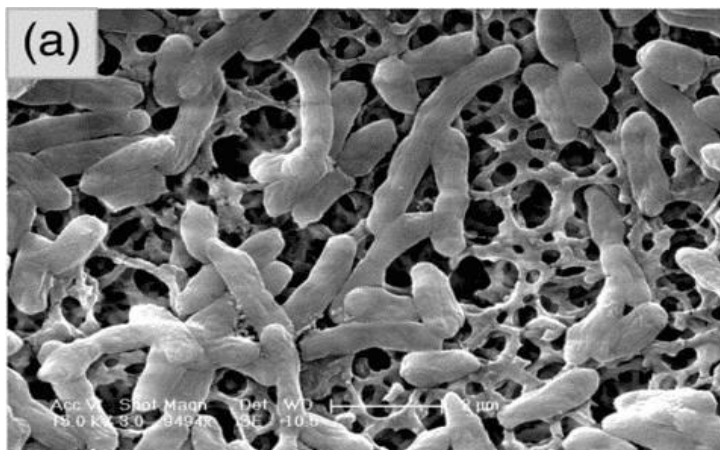
Olmozda - 900-2300 gacha.

3.9-rasm. Nanonayning issiqlik o'tkazuvchanligi uzunligiga bog'liq



Bir devorli nanonaylar. Bir devorli nanonaylar litiy-ion akkumulyatorlarda, ugleplastik materiallarda, avtomobil sanoatida ishlatiladi. Kislota-qo'rg'oshin akkumulyatorlarda bir devorli nanonaylar qo'shilishi qayta zaryadlashlar sonini ancha oshiradi. Bir devorli nanonaylarning chidamlilik koeffitsienti 50 GPa, po'latda esa 1 GP gateng [7].

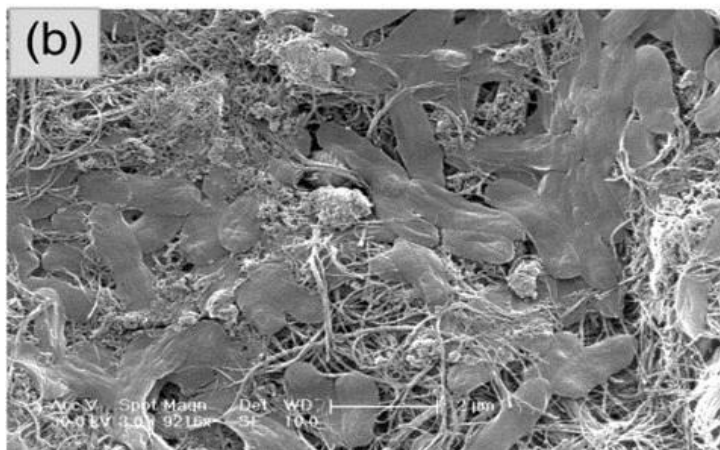
Nanonaylarni zaharli deb ham hisoblashadi. Bu qay darajada to'g'ri? Rostdan ham zaharlimi? Ha, ular zaharli bo'lib, tirik organizmlarga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Demak, tirik xujayralarga salbiy ta'siridan foydalangan holda uning bu xususiyatidan tibbiyotda (davolashda) va boshqa sohalarda foydalanishimiz mumkin. Nanonaylarning foydali va zararli jihatlari obdon o'rganilishi lozim.



3.10-rasm. Ichak tayoqchasining xujayralariga nanonaylarning ta'siri:

(a) nanonaylar ta'siridan oldin;

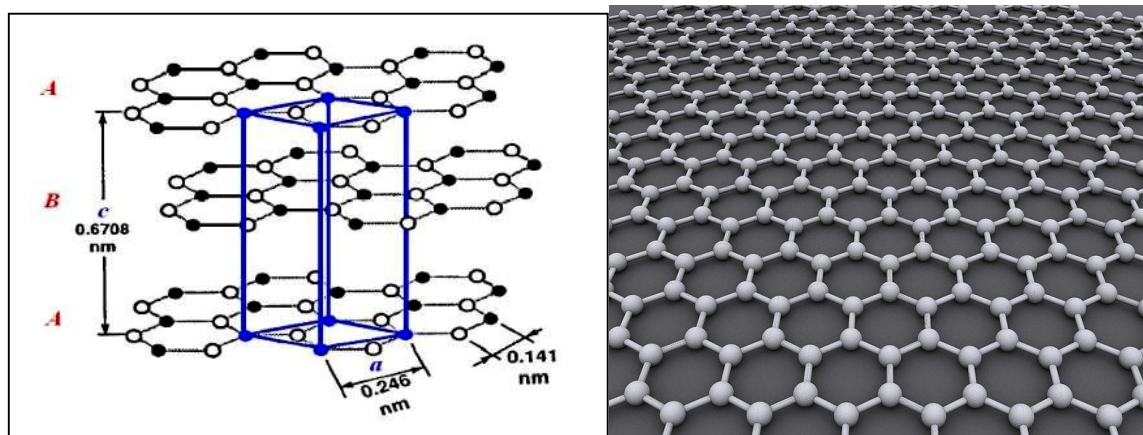
(b) nanonaylar ta'siridan keyin.



RFA akademigi Mixail Predtechenskiy sanoat miqyosida yaratgan bir devorli uglerod nanonaylarini tayyorlash texnologiyasi OCSiAl o'ta yuqori sifatli nanonaylar ishlab chiqarib, ularni jahon bozorida shunday narxlarda taklif qiladi-ki, natijada nanonaylarning sanoatda qo'llanilishi birinchi marta iqtisodiy jihatdan oqlangani isbotlagan bo'ladi[8],[9].2002 yilda nanonaylarning jahon bozori 1 mlrd. dollardan optiq edi. 2018 yilda Rossiyaning Novosibirsk shahrida uglerod nanonaylari ishlab chiqaruvchi sanoat qurilmasi ishga tushirildi. Yozishlaricha, uning mahsuloti yiliga 1 mlrd. dollarga borar ekan. Ugleplastiklar – nanonaylar bilan armirovka qilingan (mustahkamlangan) plastic moddalar bo'lib, qimmatbaho sport anjomlari, avtomobil va mototexnikada, aviakosmik sohada (samolyotlarning va raketalarning qismlari, masalan, fyuzelyaji va qanotlari), harbiy sanoatda ishlatiladi.

3.4. Grafen

Grafen - bu uglerodning ikki o'lchovli allotropik modifikatsiyasi bo'lib, qalinligi bir atomli uglerod atomlari qatlamidan hosil bo'ladi. Uglerod atomlari sp^2 gibridlanishda bo'lib, s- va p-bog'lar orqali olti burchakli ikki o'lchovli kristall panjaraga ulanadi. Uni ommaviy kristaldan ajratilgan qatlamli grafitning bir tekisligi sifatida ko'rsatish mumkin. Barcha ma'lum bo'lgan materiallar (bir xil qalinlik uchun) orasida eng yuqori bo'lgan zaryad tashuvchilarning yuqori harakatchanligi uni turli xil ilovalarda, xususan, nanoelektronika uchun kelajakda asos sifatida foydalanish uchun istiqbolli materialga aylantiradi.



3.11-rasm. Grafitdagi grafen qatlamlari va grafenning tuzilishi

Grafenlarning xususiyatlari:

- rekord darajada yuqori issiqlik o'tkazuvchanlik
- eng yaxshi po'latga nisbatan yuzlab marta yuqori mexanik xossalar

va egiluvchanlik

- hech narsa bilan taqqoslab bo'lmaydigan elektr o'tkazuvchanlik
- yuqori (3000°S dan baland) erish temperaturasi
- boshqa moddalar (gazlar) o'ta olmasligi va shaffofligi
- integral mikrosxemalardagi kremniyni almashtirish

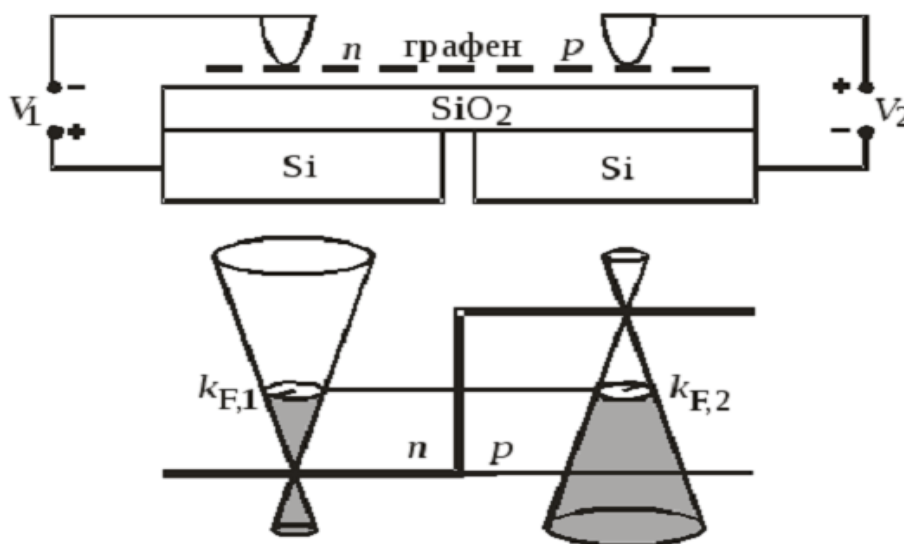
Grafenlar yuqoridagi ajoyib xususiyatlarga ega bo'lganligidan, ko'plab sohalarda qo'llanilib kelinmoqda. Ya'ni integral mikrosxema va mikrochiplarda, alohida gaz molekulasi sifatida detektorlarda, grafenli nanolenta sifatida, ionistorlarda (superkondensatorlar), g'ovakli grafenli ionli membranalarda, gaz o'tkazmaydigan qoplamalarda, sensorli va JK ekranlarida. (13-rasm)

Ilmiy laboratoriyalarda grafen olishning hozirda mavjud usullaridan biri yuqori yo'naltirilgan pirolitik grafitdan grafit qatlamlarini mexanik bo'linish yoki tozalashga

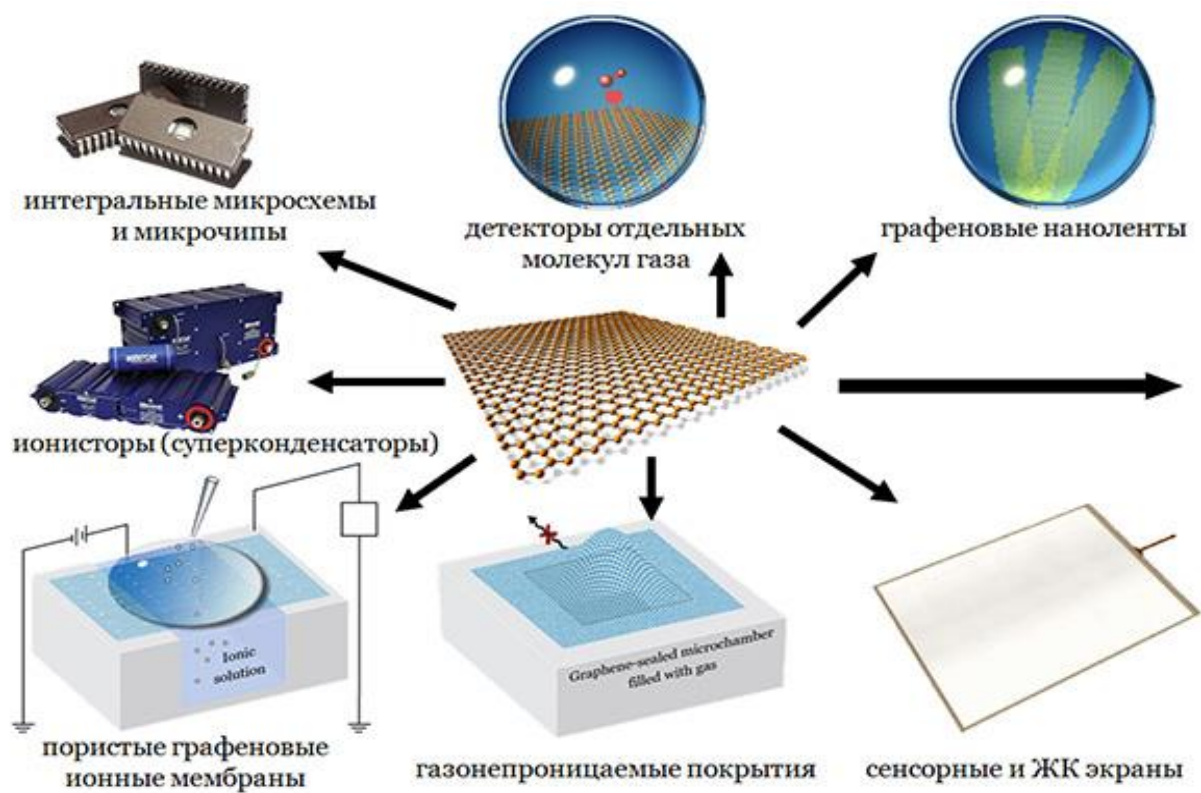
asoslangan. Bu yuqori tashuvchining harakatchanligi bilan eng yuqori sifatli namunalarni olish imkonini beradi. Ushbu usul keng ko'lamli ishlab chiqarishdan foydalanishni o'z ichiga olmaydi, chunki bu qo'lda bajariladigan protsedura. Boshqa taniqli usullar - kremniy karbid substratining termal parchalanish usuli va kimyoviy bug'larni cho'ktirish - sanoat ishlab chiqarishiga ancha yaqin. 2010-yildan buyon oxirgi usul yordamida yetishtirilgan metr o'lchamdagi grafen varaqlari mavjud.

Tashuvchilarning energiya spektrining o'ziga xos xususiyatlaridan kelib chiqqan holda, grafen o'ziga xos, boshqa ikki o'lchovli tizimlardan farqli o'laroq, elektrofizik xususiyatlarni namoyish etadi. Grafen olingan birinchi elementar ikki o'lchovli kristal edi, ammo keyinchalik silis, fosforen, germanen kabi boshqa materiallar olingan.

Andrey Geym va Konstantin Novoselov 2010 yilgi fizika bo'yicha "ikki o'lchovli material - grafen bilan ilg'or tajribalar" uchun Nobel mukofotiga sazovor bo'lishdi. 2013 yilda Mixail Katsnelson grafen sohasida ilmiy faoliyat yuritadigan asosiy kontseptsiya va tushunchalarni ishlab chiqqani uchun Spinoza mukofoti bilan taqdirlangan.



3.12-rasm. Grafen transistor va uning zona tuzilishi



3.13-rasm. Grafenlarning turli sohalarda qo'llanilishi.

4-ma'ruza. Nanostrukturalarda fundamental elektron hodisalar (I)

Reja

4.1. Kvant o'lcham effektlari.

4.2. Kvant chegaralanishi.

4.3. Energetik holatlar zichligi.

4.4. Nanozarralar va ularning fizik xususiyatlari

Tayanch iboralar: Kvant o'lcham, de Broyl to'lqin uzunligi, fazoviy kvantlanish, energetik sathlar, kvant o'ra, nanoip, kvant nuqta, nanoobekt, nanozarra

4.1. Kvant o'lcham effektlari

Elektron tuzulmalarda kvant o'lchamli effektlar l_k uzunlik rolini aniq kvant kattalik bo'lgan elektronlarning de Broyl to'lqin uzunligi λ oynaganida, ya'ni tuzulmaning o'lchami hech bo'lmaganida birorta yo'nalish bo'yicha λ taribida bo'lganida kuzatiladi. Kvant o'lchamli effektlar elektronlarning to'lqin tabiati bilan bog'langan.

Nanoo'lchamli sohalarda elektronlarning o'zini tutishi uning bunday muhit chegaralaridan qaytishi, elektron to'lqinlarining interferensiyasi, to'lqinlarning potentsiyal to'siqlardan o'tishlari bilan aniqlanadi. Bu hodisalar bilan nanotuzilmalardagi kvant o'lchamli effektlar, masalan, o'z ko'chishlarida fazoviy cheklanishlarga ega bo'lgan elektronlar energiyasining kvantlanishi, elektronlarning nanometrli dielektrik qatlamlar orqali o'tishi, nanosimlar qarshiligining kvantlanishi va h.k.lar tushuntiriladi.

Kristalllardagi erkin elektronlarni qarab chiqamiz. Kristall boylab nafaqat erkin ko'cha oladigan, balki tashqi ta'sirlar ostida o'z energiyasini o'zgartira oladigan elektronlar erkin hisoblanadi.

Metallarda unchalik katta bo'lmagan haroratlarda E_F Fermi sathi yaqinidagi elektronlarnigina erkin deb hisoblash mumkin. Shuning uchun erkin elektronlar uchun

$$E_{kin} \approx E_F \approx 5 \text{ eV} = 8 \cdot 10^{-19} \text{ J}, \quad (2)$$

bo'ladi.

Metallarda $m^* \approx m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, bu erda m_0 - erkin elektron massasi. E_{kin} va m_0 larning qiymatlarini λ ning formulasiga qoyib kristall panjara doimiysi kattaligi tartibidagi $\lambda \approx 0,55 \text{ nm}$ qiymatga ega bo'lamiz.

Yarimo'tkazgichlarda xona haroratida $E_{kin} \approx kT = 0,026 \text{ eV}$ ga teng bo'ladi. Elektronning effektiv massasi turli yarimo'tkazgich materiallarda keng oraliqda o'zgaradi. Masalan, kremniy uchun $m^* = 0,92m_0$ ga GaAs uchun $m^* = 0,068m_0$ ga, yarimmetal vismut uchun esa $m^* = 0,01m_0$ ga teng va shu tufayli bu materiallar uchun

mos ravishda $\lambda = 8; 30; 80$ nm bo'ladi.

Yarimo'tkazgichlarda de Broyl to'lqin uzunligi matallarga qaraganda sezilarli katta bo'lgani uchun kvant o'lchamli effektlarni yarimo'tkazgichlarda amalga oshirish texnologik nuqtai nazardan ancha oson bo'ladi. Shuning uchun bu effektlarni tadqiq qilish va elektronikada ishlatish uchun nanotuzilmalarni shakl-lantirish asosan yarimo'tkazgichlarda amalga oshiriladi.

Shuni takidlash lozimki, kvant o'lchamli effektlarni, elektronlarning o'rtacha erkin yugurish yo'li qaralayotgan soha o'lchamidan ortiq bo'lganida, sohaning chegaralari yuqori darajadagi mukammallikka ega bo'lib, de Broyl to'lqinlarini undan ko'zgu qaytadi degan shartlarda kuzatish mumkin.

Gazlarning molekulyar-kinetik nazariyasida molekularlarning erkin harakat masofasi l : gaz solingan idishning o'lchamlari $L \gg l$ bo'ladi. Aks holda gaz qonunlari ishlamay qoladi. Elektronlar uchun ikkita xos masofa bor: erkin harakat masofasi l va De-Broyl to'lqin uzunligi λ .

Qaysi biri oldinroq buziladi?

Odatda metallarda elektronlarning erkin harakat masofasi $l \approx 10^{-5} - 10^{-2}$ sm, de-Broyl to'lqin uzunligi esa $\lambda \approx 10^{-6} - 10^{-7}$ sm. Demak, birinchi navbatda namuna yuzasining ta'siri seziladi.

4.2. Kvant chegaralanishi

Fazoviy kvantlanish qonuniyatlari:

Erkin elektronlar uchun Shredinger tenglamasi

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + E\psi = 0.$$

Yechimi $\psi(x) = C e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}}$, $\mathbf{k} = \mathbf{p} / \hbar$ -to'lqin vektori, elektronlarning energiyasi

$$E = p^2 / 2m = \hbar^2 k^2 / (2m).$$

No'rmaga keltirilganda $\psi(x) = L^{3/2} e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}}$ L -namunaning o'lchami (kub shaklida deb hisoblaymiz).

Qachon kvant effektlari sezilarli bo'ladi?

1. Qo'shni diskret energetik sathlar orasidagi masofa $E_n - E_{n-1}$ issiqlik energiyasi kT dan katta bo'lishi kerak: $E_n - E_{n-1} > kT$.

2. Qo'shni diskret energetik sathlar orasidagi masofa $E_n - E_{n-1}$ Fermi

energiyasi E_F dan katta bo'lishi kerak: $E_n - E_{n-1} > E_F$

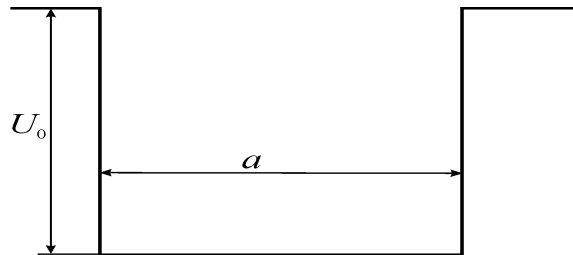
3. Elektronlarning sochilishi hisobiga energetik sathlarning kengayishi ular orasidagi masofadan oshmasligi kerak:

$$E_n - E_{n-1} \approx \frac{h}{\tau} = \frac{he}{m^* \mu} \Delta E \sim \frac{h^2}{m^* a^2}, \quad \tau = \frac{l}{v} \sim l \frac{am^*}{h}$$

ekanligini hisobga olsak, oldingi shart $a \ll l$ ko'rinishga keladi.

Kvant o'ra – bu ikki o'lchamli (2D) ob'ektdir. Bu kristallning juda yupqa qatlami bo'lib, uning qalinligi d da Broyl to'lqin uzunligi bilan solishtiradigan darajada bo'ladi, ya'ni $d \propto \lambda$. Bunday qatlamdagi elektronlar tizimi ikki o'lchamli elektronlar gazi (yoki 2D- gaz) deb ataladi.

Kvant o'ra qonuniyatlari:



4.1-rasm. Kvant o'raning parametrlari

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) + \frac{m^* \omega_0^2 x^2}{2} \psi(x) = E \psi(x)$$

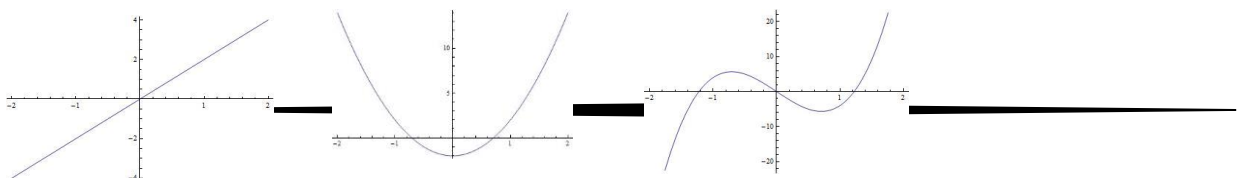
$$E_n = \hbar \omega_0 \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

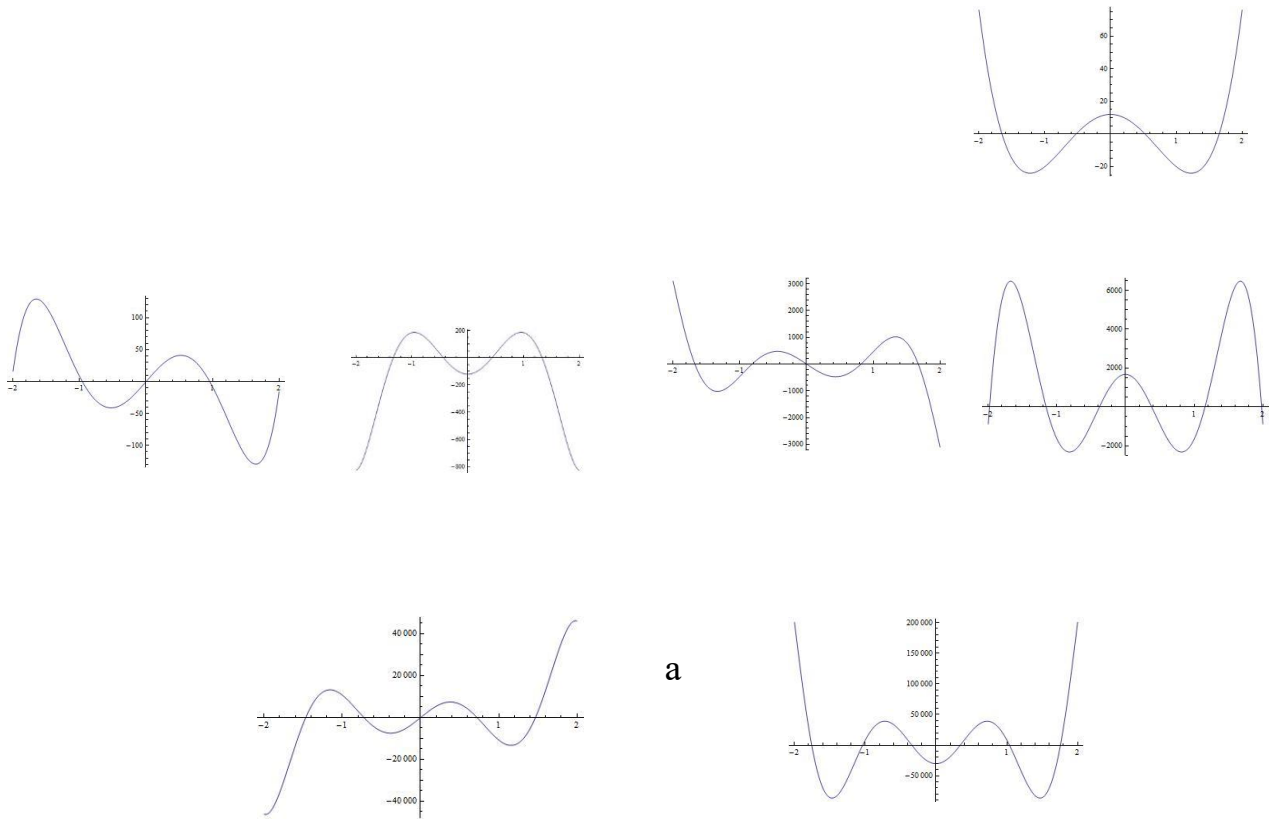
$$\psi_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} \left(\frac{m^* \omega_0}{\pi \hbar} \right)^{1/4} \exp\left(-\frac{m^* \omega_0 x^2}{2\hbar} \right) H_n \left(\sqrt{\frac{m^* \omega_0}{\hbar}} x \right)$$

$$U(x) = Kx^2 / 2, \quad \omega_0 = \sqrt{K / m}.$$

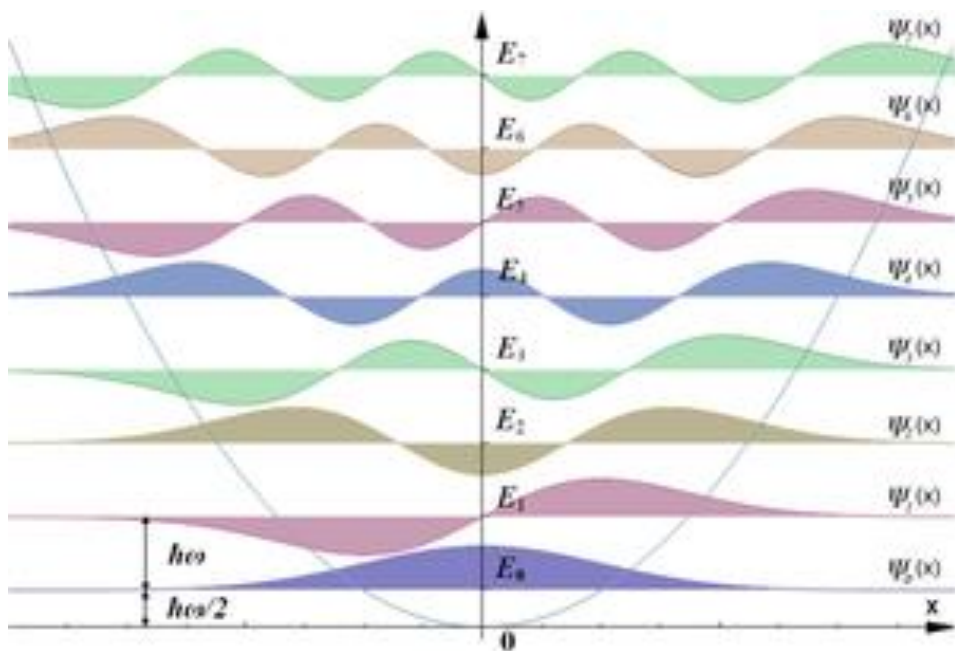
$H_n(x)$ - Ermit tenglamasining yechimi:

$$H_n''(x) - 2xH_n'(x) + 2nH_n(x) = 0.$$





4.2-rasm. Ermit funksiyasi $H_n(x)$ ning grafiklari ($n = 1-10$, $[m^*\omega_0/\hbar]^{1/2}$ ga normirovka)



4.3-rasm. Birinchi sakkiz holatning koordinata ko'rinishidagi to'lqin funksiyalari, $n = 0 \dots 7$. x koordinatasi gorizontal, qiymat vertikal ravishda chiziladi to'lqin funksiyasi $\psi_n(x)$. Grafiklar standartlashtirilmagan

Fazoviy kvantlanish qonuniyatlari

To'lqin funksiyasining davriyligi tufayli uning argumenti x ni $x + L$ ga almashtirsak hech narsa o'zgar olmaydi (Born-Karmanning chegara shartlari). Demak, to'lqin vektorining komponentlari kvantlangan:

$$k_x = \frac{2\pi}{L} n_1, \quad k_y = \frac{2\pi}{L} n_2, \quad k_z = \frac{2\pi}{L} n_3.$$

Shunga mos ravishda to'lqin funksiyasi

$$\psi(x, y, z) = L^{3/2} \exp \left[i \frac{2\pi}{L^{3/2}} (n_1 x + n_2 y + n_3 z) \right].$$

Elektronlarning energiyasi ham kvantlangan:

$$\psi(x, y, z) = L^{3/2} \exp \left[i \frac{2\pi}{L^{3/2}} (n_1 x + n_2 y + n_3 z) \right].$$

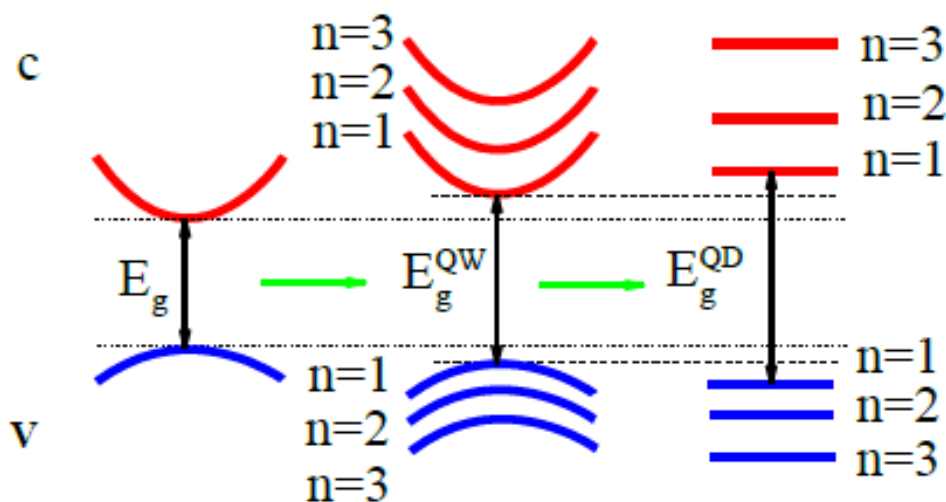
4.3. Energetik holatlar zichligi.

Namuna o'lchamlarini kamaytirganimizda berilgan to'lqin vektoriga mos kvant sonlari n kamayadi, qo'shni energiya sathlari orasidagi masofa $E_n - E_{n-1}$ osha boradi.

Ammo

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2,$$

va k_z ning cheklanishi k_x va k_y ning mumkin bo'lgan qiymatlarini o'zgartiradi.



Hajmdor namuna Kvant o'rasi va nanoip Kvant nuqtasi

4.4-rasm. Nanoobektlarda elektronlar energetik spektrining o'zgarishi

Qalinligi a bo'lgan metal plastinkada elektronlarning holati haqidagi masalaning yechimi biroz murakkabroq, lekin pirovardda chegara shartlari $\psi(0) = 0$ va $\psi(a) = 0$ bilan quyidagi algebraik tenglamaga kelamiz:

$$\arcsin \left\{ kh / (2m_z^* U_0)^{1/2} \right\} = (n\pi - ka) / 2.$$

Bu tenglamada ham elektronlarning to'liqin vektori va energiyasi kvantlanganligini ko'ramiz:

$$k_n = p_n / \hbar = n\pi / a,$$

$$E_n = \hbar^2 k_n^2 / 2m^* = \hbar^2 n^2 \pi^2 / (2m^* a) \quad (n = 1, 2, 3 \dots).$$

$E > U_0$ bo'lsa elektronlarning potensial o'radagi harakati (5-slayd) infinit (cheklanmagan, elektron har qancha uzoqqaketishimurkin) bo'ladi. Agarda $E < U_0$ bo'lsa, elektronning to'liqin funksiyasi $x < 0$ da ham, $x > a$ da ham eksponensial kamayadi, ya'ni elektron $0 \leq x \leq a$ oralig'ida bog'langan.

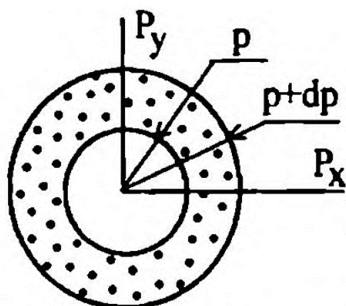
Izoenergetik (o'zgarmas energiya) sathlari E , p_x va p_y koordinatalarida aylanma paraboloid ko'rinishida bo'ladi:

$$E = \frac{p_x^2}{2m_x^*} + \frac{p_y^2}{2m_y^*} + \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m_z^* a^2}.$$

Fermi sathi n_{\max} ning mumkin bo'lgan maksimal qiymatlarini cheklaydi:

$$n_{\max} \leq \left(2m_z^* a^2 E_F / (\pi^2 \hbar^2) \right)^{1/2} \leq n_{\max} + 1.$$

Ikki o'lchamli elektron gazning bir zonachadagi zichligi (birlik hajmga va birlik energiya oralig'iga to'g'ri keladigan holatlar soni) energiyaga bog'liq emas.



$$N_j(E) = S m_z^* / (\pi \hbar)$$

4.5-rasm. Holatlar zichligini hisoblashga doir

Bunda S – namunaning yuzasi. Agar bir necha zonachalar to'lgan bo'lsa, hammasi uchun yig'indini hisoblash kerak.

Endi metall plastinkaning fazoviy kvantlanish tufayli energetik zonalar tuzilish o'zgaradigan minimal qalinligini chamalaymiz. Yaxshi o'rganilgan vismut elementi chalametall bo'lib, valent va o'tkazuvchanlik zonalarini $E_n = 30$ meV ga ustma ust. O'lchamli kvantlanganda elektronlarning energiyasi

$$E_e = \hbar^2 \pi^2 / (2m_{ze}^* d^2)$$

bo'lgan birinchi zonachasi (o'tkazuvchanlik zonasi) yuqoriga siljiydi, kovaklarning energiyasi

$$E_h = \hbar^2 \pi^2 / (2m_{zh}^* d^2)$$

bo'lgan birinchi zonachasi (valent zonasi) esa pastga siljiydi. Oqibat vismut plastinkasining qalinligi kritik qiymat

$$d = \hbar \pi [(E_n/2)(1/m_{ze}^* + 1/m_{zh}^*)]^{1/2}$$

ga yetganda bu zonachalar orasida energetik tirqish (taqiqlangan zona) hosil bo'ladi.

Vismut uchun ($m_{zh}^* = 0,1m_0$, $m_{ze}^* = 0,01 m_0$, $E_n = 30$ meV) yarimo'tkazgichga aylanishning kritik o'lchami $d = 35$ nm bo'lib chiqdi.

4.4. Nanozarralar va ularning fizik xususiyatlari

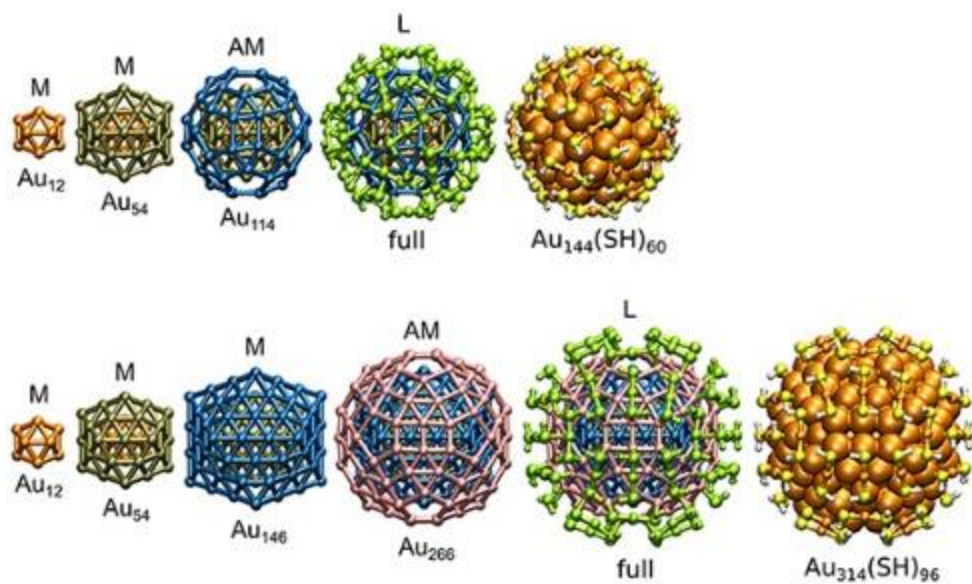
Nanozarrachalarni atomlar, ionlar yoki molekulalardan tashkil topgan va hajmi 100nm dan kam bo'lgan ob'ektlar deb atash odatiy holdir.

Nanozarrachalarning fizik-kimyoviy xossalari ularning o'lchamiga bog'liqligi *o'lchovli effekt* deyiladi . Bu nanokimyodagi eng muhim effektlardan biridir. U allaqachon klassik fan, ya'ni kimyoviy termodinamika nuqtai nazaridan nazariy tushuntirishni topgan. Shunday qilib, erish haroratining o'lchamga bog'liqligi nanozarrachalar ichidagi atomlar qo'shimcha sirt bosimini boshdan kechirishi, ularning Gibbs energiyasini o'zgartirishi bilan izohlanadi. Gibbs energiyasining bosim va haroratga bog'liqligini tahlil qilib, erish harorati va nanozarrachalar radiusi bilan bog'liq tenglamani osongina olish mumkin - bu Gibbs-Tomson tenglamasi deb ataladi:

$$T_{\text{erish}}(r) = T_{\text{erish}}(\infty) \left(1 - \frac{2\sigma_{\text{TB-K}}}{\Delta H_{\text{erish}} \rho_{\text{TB}} r} \right),$$

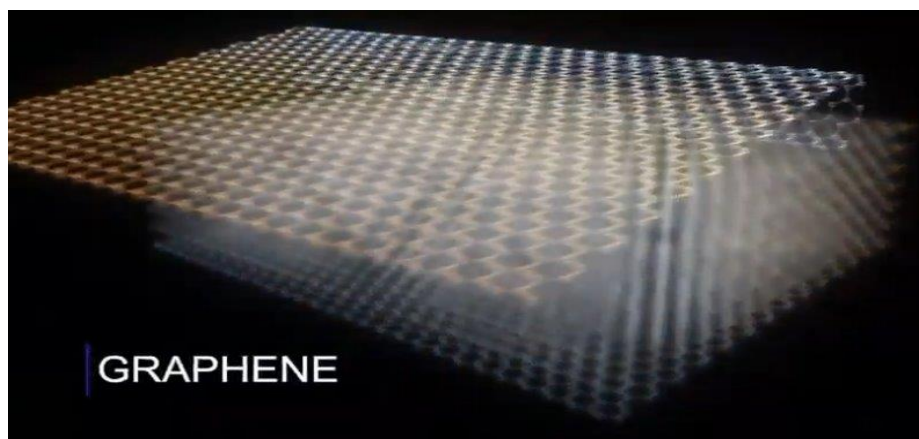
Nanoo'lchamli obektlarni o'lchamlari boyicha quyidagicha bo'linadi:

uch o'lchovli (3D) tuzilmalar- ular nanoklasterlar (*klaster*- to'da);



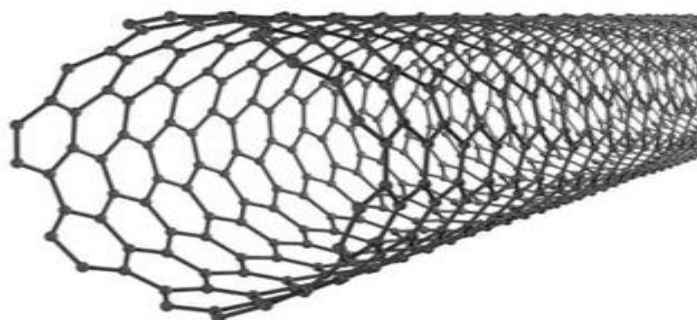
4.6-rasm

2) tekis ikki o'lchovli (2D) ob'ektlar - nanoqatlamlar;



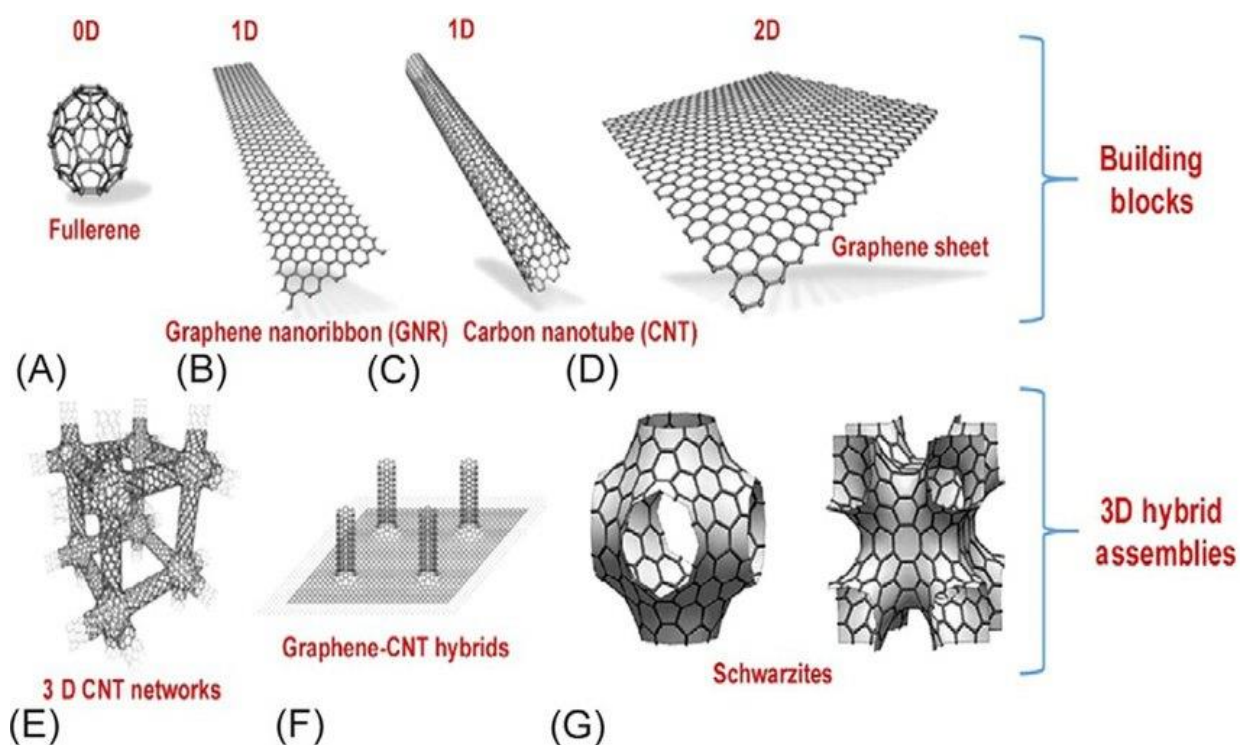
4.7-rasm

3) chiziqli yoki bir o'lchovli (1D) tuzilmalar - nanoiplar yoki nantolalar (*nano simlar*);



4.8-rasm

4) nol o'lchamli (0D) ob'ektlar - nanodotlar yoki kvant nuqtalari deb ataladi.



4.9-rasm. Uglerod nanomateriallar

Nanozarrada anizotropiya nanozarrachalar xossalari juda ko'p o'zgarishlarga olib keladi. Oltin, kumush va platinaning sharsimon bo'lmagan nanopartikullari ajoyib optik xususiyatlariga ko'ra turli xil dasturlarni topmoqda va tadqiqot sohasida katta qiziqish uyg'otmoqda. Nanoprizmalarning sferik bo'lmagan geometriyalari yuqori samarali tasavvurlar va kolloid eritmalarining chuqurroq ranglarini keltirib chiqaradi. Zarralar geometriyasini sozlash orqali rezonans to'lqin uzunliklarini siljitish imkoniyati ushbu nanozarralarni molekulyar yorliqlash sohasida, biomolekulyar tahlillar, iz metallarini aniqlash va nanotexnik qo'llanmalar uchun ishlatish uchun juda qiziq. Anizotropik nanopartikullar har bir qo'zg'aluvchan o'qi uchun alohida rezonans rejimini ko'rsatib, o'ziga xos yutilish xatti-harakatlarini va polarizatsiyalangan nur ostida stoxastik zarrachalar yo'nalishini namoyish etadi. Ushbu xususiyatni har kuni ushbu nanozarralarni yuqori rentabellikga tayyorlash uchun sintez qilish sohasida yangi ishlanmalar olib borilayotganligi bilan izohlash mumkin.



4.10-rasm. Har xil o'lchamdagi (2 dan 5 nm gacha, chapdan o'ngga) kolloid CdTe zarralari suspenziyalarining floresansi. Barcha lampalar yuqoridan bir xil to'lqin uzunligidagi ko'k nur bilan yoritilgan.

5. Nanostrukturalarda fundamental elektron hodisalar II.

Ikki o'lchovli "elektron gaz". Energetik holatlar zichligi. Ballistik transport. Metall, dielektrik (oksid), yarimo'tkazgich (MDYa yoki MOP) tranzistorlar. Geterostrukturalar

REJA

- 5.1. Ikki o'lchovli "electron gaz"
- 5.2. Energetik holatlar zichligi
- 5.3. Ballistik transport
- 5.4. Metall tranzistorlar
- 5.5. Dielektrik (oksid) tranzistorlar
- 5.6. Yarimo'tkazgich (MDYa yoki MOP) tranzistorlar
- 5.7. Geterostrukturalar

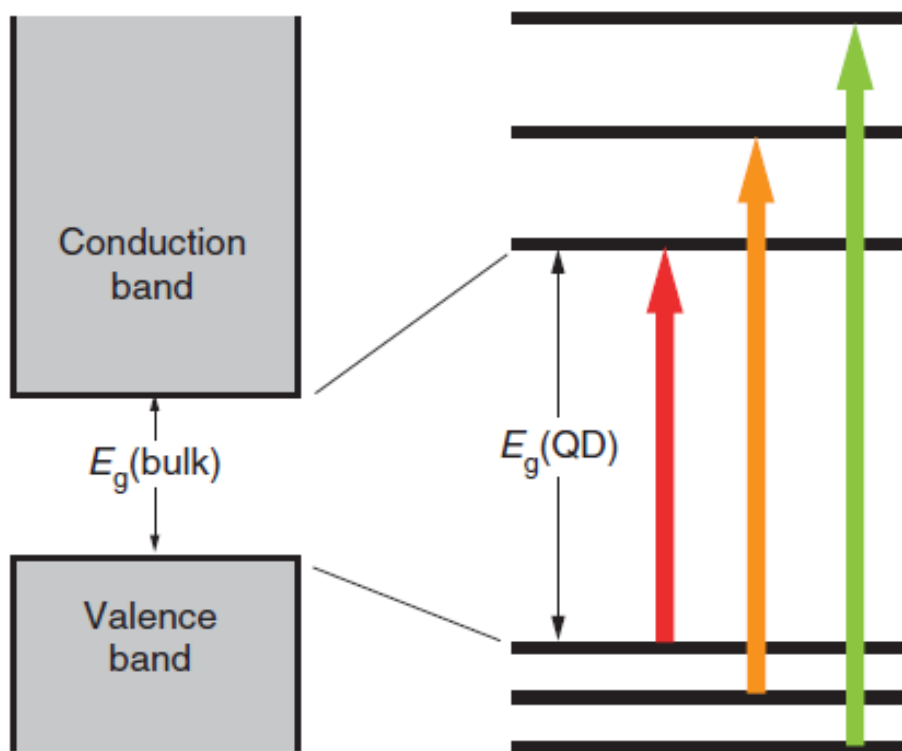
Tayanch iboralar: *geterostruktura, ikki o'lchovli "electron gaz", energetik holatlar zichligi, ballistik transport, metall tranzistorlar, dielektrik (oksid) tranzistorlar, yarimo'tkazgich (MDYa yoki MOP) tranzistorlar*

5.1. Ikki o'lchovli "elektron gaz"

Nano dunyosidagi eng mashhur atama bu kvant cheklashdir. Bunday cheklashlarda IV, III – V, II – VI guruh yarimo'tkazgichlarda bunaqa cheklashlar o'lchami 1 – 25 nm atrofida bo'ladi. Bunaqa "geomatrik" cheklashlar natijasida elektron harakati chegaralanadi va energiya spektridagi o'zgarishlar orqali material xususiyatlari o'zgaradi. Ushbu hodisa kvant – o'lcham effekti deb ham ataladi. Ushbu kvant effekti yarimo'tkazgichdagi zarracha harakatlanish chegarasi o'lchamlari Bor eksiton radiusiga yaqin yoki undan kichik bo'lganda seziladi. Umuman olganda, zarrachaning Bor eksiton radiusi quyidagicha aniqlanadi:

$$a_B = \varepsilon \frac{m}{m^*} a_0 \quad (5.1)$$

bu erda ε - materialning dielektrik singdiruvchanligi, m^* - bu zarrachaning massasi, m - erkin elektronning massasi, va a - vodorod atomining Bohr radiusi. Zarrachalar hajmi Bohr eksiton radiusiga yaqinlashganda, kvant chegaralash effekti eksitonik o'tish energiyasining ortishiga va assimilyatsiya va lyuminesans diapazonidagi bo'shliq energiyasining ko'k siljishiga olib keladi. Bundan tashqari, kvant chegaralash effekti materialning doimiy energiya tarmoqlarida atomnikiga o'xshash diskret energiya sathini yuzaga keltiradi.



5.1 - rasm

5.1-rasmda ko'rsatilgandek, yarimo'tkazgichning doimiy yutilish spektridan farqli o'laroq, energiya holatlari diskret yutilish spektriga olib keladi. Kvant chegaralashlardan biri bu bir yoki bir nechta yo'nalishlardan chegaralangan potensial o'ralardir. Kvant chegaralashlar chegaralash yo'nalishi bo'yicha 3 turga bo'linadi: kvant o'rasi, kvant simi va kvant nuqtalari. Ular quyidagi jadvalda keltirilgan:

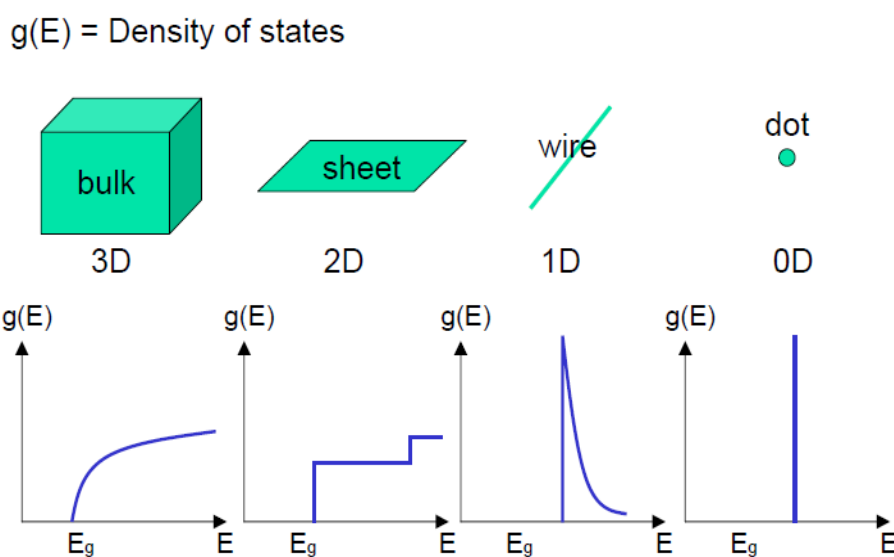
Struktura	Kvant tutilish	Erkin o'chamlar soni
Hajmiy	0	3
Kvant devoir/o'tapanjaralar	1	2
Kvant iplar/simlar	2	1
Kvant nuqta/nanokrystallar	3	0

Kvant nuqtalarda zaryad tashuvchilar uch o'lchov bo'yicha cheklangan bo'lib, ularda elektronlar diskret atomga o'xshash energiya spektrini namoyish etadi. Kvant simlari tizimning ikki o'lchamlari cheklanganida hosil bo'ladi. Kvant qudug'ida zaryad tashuvchilar (elektronlar va teshiklar) tekislikda harakat qilishadi va ikki o'lchovli holatda erkin harakatlanishadi. Shuningdek, kvant sonlari diskret qiymatlarda o'zgaradi.

Hajmdor yarimo'tkazgichlar bilan taqqoslaganda, kvant qudug'i o'tkazuvchanlik va valentl zonalari chetiga yaqinroq elektron holatlarining zichligiga ega va shuning uchun tashuvchilarning yuqori konsentratsiyasi polosali emissiyaga hissa qo'shishi mumkin. O'lchov soni qancha cheklangan bo'lsa, energiya miqdorini shunchalik aniqroq aniqlash mumkin. 2D, 1D va 0D yarimo'tkazgichli strukturadagi electron holatlarning zichligi 5.2-rasmda keltirilgan.

0D tuzilmalari juda aniq belgilangan va miqdoriy energiya sathlariga ega. Nanostrukturaning geometrik chegaralash effektini "effektiv massa" yaqinlashuvi modeli yordamida aniqlash mumkin.

Ushbu usul to'siqlarning cheksiz potentsial chegarasiga ega ekanligini hisobga olib, Schredinger tenglamasini yechib, nanostrukturaning cheklangan energiya darajasini taxmin qilishi mumkin. Shredinger tenglamasining kvant nuqta yoki nanokristalda, kvant simida va kvant qudug'ida joylashgan elektronlar uchun "effektiv massa" metodi yechimlari quyidagilar:



5.2 - rasm

Kvant nuqta yoki nanokristal

$$E_{n,m,l} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^*} \left(\frac{n^2}{L_z^2} + \frac{m^2}{L_y^2} + \frac{l^2}{L_x^2} \right), \psi = \phi(z)\phi(y)\phi(x)$$

Kvant simi

$$E_{n,m}(k_x) = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^*} \left(\frac{n^2}{L_z^2} + \frac{m^2}{L_y^2} \right) + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}, \psi = \phi(z) \phi(y) \exp(ik_x x)$$

Kvant o'rasi

$$E_n(k_x, k_y) = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* L_z^2} + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2), \psi = \phi(z) \exp(ik_x x + ik_y y).$$

2D - elektron gaz (kvant qudug'i)

Past o'lchamli strukturada, elektronning erkin harakati kamida bitta yo'nalishda cheklangan. Masalan, x o'qi bo'ylab elektron joylashgan cheksiz chuqur potentsial quduq bor deylik. Agar quduq kengligi d bo'lsa, u holda $0 < x < d$ oraliqda elektron nol potentsial energiyaga ega. Cheklangan potentsial to'siq quduqdan tashqarida elektronni topishga imkon bermaydi. Vertikal devorlar bilan chuqur bir o'lchovli potentsial quduqda elektronning harakati to'g'risidagi kvant muammosidan kelib chiqib, elektronning holati garmonik to'lqin funksiyasi bilan tavsiflanadi:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{d}} \sin \frac{n\pi}{d} x, \quad (5.2)$$

(1)

(Garmonik to'lqin funksiyasi).

Bu yerda $n = 1, 2, 3, \dots$

Aslida, quduq devorlari o'rtasida to'lqin uzunligi $\lambda_n = 2d/n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) munosabati bilan aniqlangan elektron to'lqinlar joylashgan. To'lqin vektorining ruxsat etilgan qiymatlari diskret bo'lib, $k_n = 2\pi/\lambda_n = n\pi/d$ ga teng. Natijada, quduq ichidagi elektronning ruxsat etilgan energiya holatining energiyalari ham diskret holga keladi. Energiya spektri quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* d^2}. \quad (5.3)$$

n - kvant holatini bildiruvchi butun kvant sonidir. Shunday qilib, cheklangan fazoga joylashtirilgan elektron faqat diskret energiya sathini egallashi mumkin.

Eng past holat ($n = 1$) energiyasi

$$E_1 = \frac{h^2 \pi^2}{2m^* d^2} \quad (5.4)$$

har doim noldan katta. Nolga teng bo'lmagan minimal energiya kvant-mexanik tizimni potentsial quduqning pastki qismida joylashgan zarraning energiyasi bilan nolga teng bo'lgan klassik tizimdan ajratib turadi. Bundan tashqari, elektron uchun ruxsat etilgan energiya qiymatlari n^2 ga teng va mutanosib bo'ladi (qarang (2)).

Keling, kvant o'rasiga qaytaylik. Yuqorida biz bunday tuzilmalardagi zaryad tashuvchilar xy tekislikda harakatlanishi mumkinligini va ularning z o'qi bo'ylab harakatlanishi qatlam qalinligi dz bilan cheklanganligini ta'kidladik. Ularning energiyasi z yo'nalishi bo'yicha kvant cheklash effekti bilan aniqlanadigan kvantlangan qiymatlarning yig'indisidir (2):

$$E_n = \frac{h^2 \pi^2 n^2}{2m^* d^2} + \frac{h^2 k_x^2}{2m^*} + \frac{h^2 k_y^2}{2m^*}. \quad (5.5)$$

Shunday qilib, elektronning kvant qudug'idagi energiya spektri uzluksizdir.

k -fazoda kvant qudug'ining (diagramma) energiya sxemasi parabolik zonalar turkumi bo'lib, ular bir-birining ustiga pastki chiziqlar hosil qiladi (5.1-rasm).

Kvant qudug'idagi holatlar zichligining energiyaga bog'liqligi bosqichma-bosqich shaklga ega va quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$n_{2D}(E) = \Theta(E - E_i), \quad i = 1, 2, \dots, \quad (5.6)$$

bu erda $\Theta(E - E_i)$ qadam funktsiyasi.

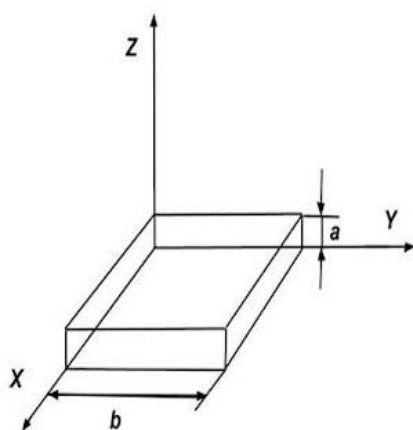
Kvant quduqlaridagi (qatlamli) elektronlar odatda ikki o'lchovli elektron gaz (2DEG) deb ataladi.

d qalinlikka ega kvant qatlami

Kvant plyonkalar ikki o'lchovli (2D) tuzilmalar bo'lib, unda kvant ushlab turish faqat bitta yo'nalishda - qatlam qalinligi bo'ylab harakatlanadi. Kvant qatlamidagi zaryad tashuvchilarning to'lqin funktsiyalari qatlamdagierkin zarraning to'lqin funktsiyalariga o'xshash va qatlam tekisligiga perpendikulyar o'q bo'ylab turg'un to'lqinlar shaklida bo'ladi.

Kvant qatlamida energiya sathlari

Zaryad tashuvchilarning energiyasi z o'qi yo'nalishi bo'yicha kvant tutish ta'siri bilan aniqlangan diskret qiymatlardan va Ox va Oy yo'nalishidagi energiya komponentlarining doimiy qiymatlaridan iborat.



5.3-rasm. Yassi namunaning magnit maydonida joylashishi

2d-strukturalar kuchli magnit maydonida

Biz bilamizki magnit maydonga kiritilgan elektronga Lorents kuchi ta'sir qiladi. 2D tuzilishni ikki o'lchovli electron gaz deb qarash mumkin. Magnit maydonida Lorents kuchi ta'sir qilganda electron aylanma trayektoriya boylab harakatlanadi. Bunday harakat siklotron harakati deb ham ataladi. Zarraning harakat trayektoriyasi siklotron orbita deb ataladi. Klassik harakat tenglamalaridan quyidagilarni aniqlash mumkin.

$$mv^2 / r = \frac{e}{c} vB \Rightarrow r = \frac{cmv}{qB}. \quad (5.7)$$

Bu yerda, m -elektronning massasi, v -elektronning tezligi, r -orbita radiusi, e - elementar zaryad, c - yorug'lik tezligi, B - tashqi magnit maydoni induksiyasi.

Bu ifodadan orbita boylab harakatlanish chastotasini aniqlash mumkin:

$$\omega_c = \frac{v}{r} = \frac{qB}{mc}. \quad (5.8)$$

Siklotron orbitasi boylab harakat finit (trayektoriya yopiq) harakat. Maydon juda katta bo'lganda kvant nazariyasi ishlay boshlaydi. Natijada siklotron orbitalari kvantlanadi:

$$\oint \mathbf{p}^r dl = nh \quad (5.9)$$

Magnit maydonda electron impulsi bizga ma'lum:

$$\mathbf{p}^r \Leftrightarrow \mathbf{p} - \frac{e}{c} \mathbf{A} \quad (5.10)$$

Bu yerda \mathbf{A} -magnit potensial (xuddi elektr potensialga o'xshagan). (5.10) ni inobatga olib (5.9)-integralni hisoblasak quyidagi ko'rinishda ifoda hosil bo'ladi.

$$nh = 2\pi r p - \frac{e}{c} B \pi r^2 = 2\pi m \omega_c r^2 - \pi m \omega_c r^2 = \pi m \omega_c r^2 \quad (5.11)$$

(5.11)-ifodani (5.8)-ifodaga olib borib qoyamiz va kvantlangan orbita radiuslarini aniqlaymiz:

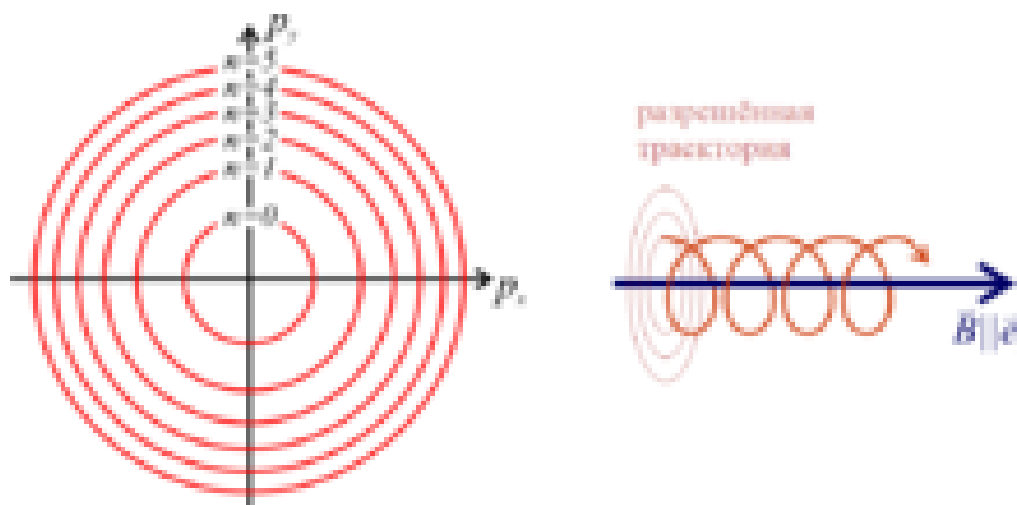
$$r_n = \sqrt{\frac{nh}{\pi m \omega_c}} = \sqrt{2n \frac{ch}{eB}} \quad (5.12)$$

Har bitta orbitaga to'g'ri kelgan energiya esa

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{m \omega_c r_n^2}{2} = n h \omega_c \quad (5.13)$$

Bu yerda faqat $n=0$ holatni tushuntirib bo'lmaydi, ya'ni bunda zarra energiyasi nolga teng. Xuddi shu masala Landau tomonidan Shredenger tenglamasini yechib to'liq hal qilingan.

Landau sathlari deb zaryadlangan zarralarning magnit maydondagi harakti natijasida hosil bo'lgan energiya sathlariga aytiladi (5.4-rasm). Ya'ni magnit maydonda harakatlanayotgan zaryadli zarra ixtiyoriy radius boylab harakatlanmay aniq diskret radiuslar boylab harakatlanadi



5.4-rasm. Electronlarning magnit maydonidagi orbitalari

1930-yil L.D. Landau tomonidan zaryadlangan zarraning magnit maydonidagi harakati uchun Shredinger tenglamasini yechib diskret sathlarni aniqlagan. Bu diskret sathlar Landau sathlari deb ataladi. Bu masalani garmonik potentsialda elektronning to'liq funksiyasi uchun ishlagan. Landau sathlari magnit maydonidagi barcha kinetic hodisalar uchun muhim rol oynaydi. Landau sathlarini elektronlar uchun ko'rib chiqamiz:

Ikki o'lchovli (2D) Xoll strukturasida harakat faqat bitta o'q boylab kvantlangan

(masalan, z o'qi bo'yicha). Bu holda electron spektri ekvidistant sathlardan (oralaridagi masofa $\hbar\omega_c$ ga teng, bu yerda ω_c magnit maydonning z o'qi yo'nalishidagi komponentalaridan aniqlanadi) iborat bo'ladi. Elektron energiyasi esa quyidagiga teng:

$$E(n, m) = E_m + \hbar\omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (5.14)$$

Bu yerda E_m - elektronning z o'qi boylab harakatiga bog'liq bo'lgan energiya. Bizning holda z o'qi boylab harakat energiyasi yo'q ($E_m = 0$) bo'lgani uchun (5.14)-ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

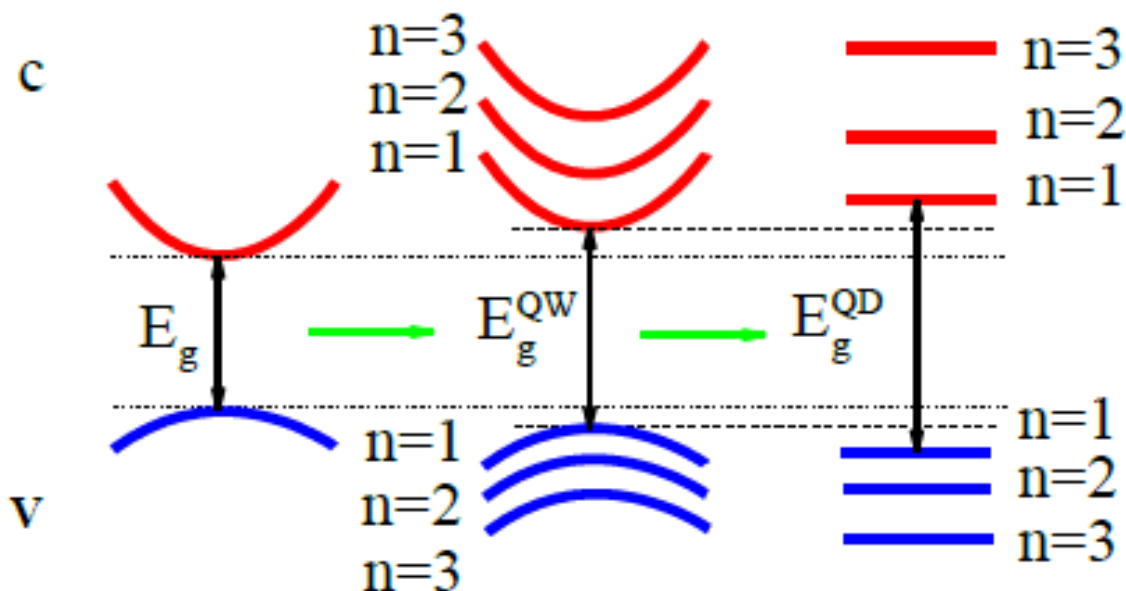
$$E(n) = \hbar\omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (5.15)$$

5.2. Energetik holatlar zichligi

Namuna o'lchamlarini kamaytirganimizda berilgan to'lqin vektoriga mos kvant sonlari n kamayadi, qo'shni energiya sathlari orasidagi masofa $E_n - E_{n-1}$ osha boradi.

Ammo $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$, va k_z ning cheklanishi k_x va k_y ning mumkin bo'lgan qiymatlarini o'zgartiradi.

Nanoobektlarda elektronlar energetik spektrining o'zgarishi



Hajmdor namuna Kvant o'rasi va nanoip Kvant nuqtasi

5.5-rasm. Nanoob'ektlarda energetik sathlar va energetik holatlar zichligi

Qalinligi a bo'lgan metal plastinkada elektronlarning holati haqidagi masalaning yechimi biroz murakkabroq, lekin pirovardda chegara shartlari $\psi(0) = 0$ va $\psi(a) = 0$ bilan quyidagi algebraik tenglamaga kelamiz:

$$\arcsin \left\{ kh / (2m_z^* U_0)^{1/2} \right\} = (n\pi - ka) / 2.$$

Bu tenglamada ham elektronlarning to'liq vektori va energiyasi kvantlanganligini ko'ramiz:

$$k_n = p_n / \hbar = n\pi / a,$$

$$E_n = \hbar^2 k_n^2 / 2m^* = \hbar^2 n^2 \pi^2 / (2m^* a) \quad (n = 1, 2, 3 \dots).$$

$E > U_0$ bo'lsa elektronlarning potensial o'radagi harakati (5-slayd) infinit (cheklanmagan, elektron har qancha uzoqqa ketishi mumkin) bo'ladi. Agarda $E < U_0$ bo'lsa, elektronning to'liq funksiyasi $x < 0$ da ham, $x > a$ da ham eksponensial kamayadi, ya'ni elektron $0 \leq x \leq a$ oralig'ida bog'langan.

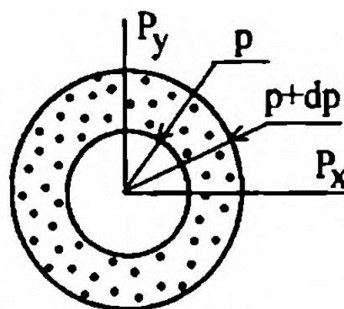
p_x va p_y koordinatalarida izoenergetik (o'zgarmas energiya) sathlari E aylanma paraboloid ko'rinishida bo'ladi:

$$E = \frac{p_x^2}{2m_x^*} + \frac{p_y^2}{2m_y^*} + \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m_z^* a^2}.$$

Fermi sathi n_{\max} ning mumkin bo'lgan maksimal qiymatlarini cheklaydi:

$$n_{\max} \leq \left(2m_z^* a^2 E_F / (\pi^2 \hbar^2) \right)^{1/2} \leq n_{\max} + 1.$$

Ikki o'lchamli elektron gazning bir zonachadagi zichligi (birlik hajmga va birlik energiya oralig'iga to'g'ri keladigan holatlar soni) energiyaga bog'liq emas.



5.6-rasm. Izoenergetik sathlar va holatlar zichligi

$$N_j(E) = S m_z^* / (\pi \hbar)$$

Bunda S – namunaning yuzasi. Agar bir necha zonachalar to'lgan bo'lsa, hammasi

uchu yig'indini hisoblash kerak.

Endi metall plastinkaning fazoviy kvantlanish tufayli energetik zonalar tuzilish o'zgaradigan minimal qalinligini chamalaymiz. Yaxshi o'rganilgan vismut elementi chalametall bo'lib, valent va o'tkazuvchanlik zonalari $E_n = 30$ meV ga ustma ust. O'lchamli kvantlanganda elektronlarning energiyasi

$$E_e = \hbar^2 \pi^2 / (2m_{ze}^* d^2)$$

bo'lgan birinchi zonachasi (o'tkazuvchanlik zonasi) yuqoriga siljiydi, kovaklarning energiyasi

$$E_h = \hbar^2 \pi^2 / (2m_{zh}^* d^2)$$

bo'lgan birinchi zonachasi (valent zonasi) esa pastga siljiydi. Oqibat vismut plastinkasining qalinligi kritik qiymat

$$d = \hbar \pi [(E_n/2)(1/m_{ze}^* + 1/m_{zh}^*)]^{1/2}$$

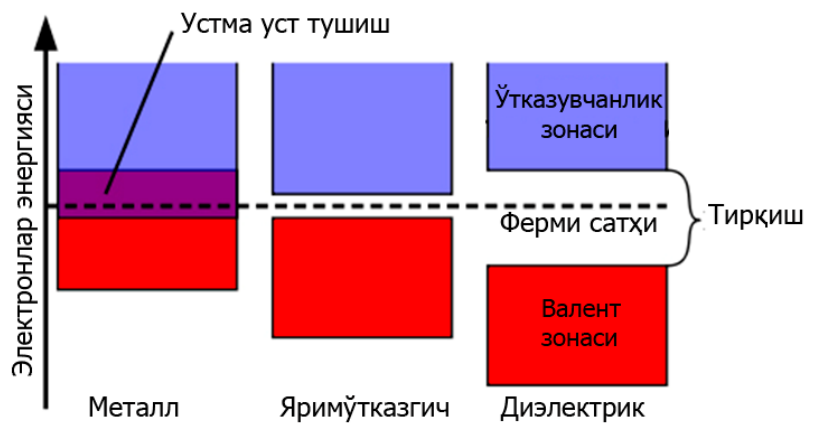
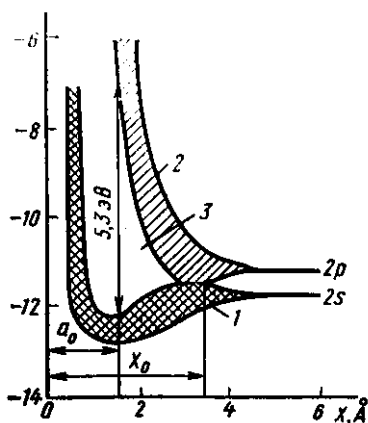
ga yetganda bu zonachalar orasida energetik tirqish (taqiqlangan zona) hosil bo'ladi.

Vismut uchun ($m_{zh}^* = 0,1m_0$, $m_{ze}^* = 0,01 m_0$, $E_n = 30$ meV) yarimo'tkazgichga aylanishning kritik o'lchami $d = 35$ nm bo'lib chiqdi.

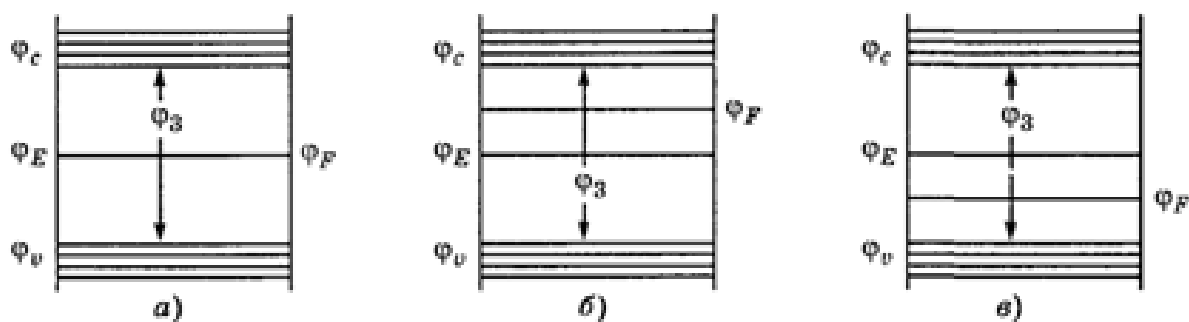
5.3. Ballistik transport

Uglerod atomlarini x_0 masofagacha yaqinlashtirilganda bu atomlarning 2s va 2p elektron holatlaridan hosil bo'lgan zonalar ustma ust tushadi. Bu hodisa s-p gibridlashish deyiladi. Atomlar orasidagi masofa a_0 valent zonasidagi elektronlar energiyasining minimumiga mos keladigan a_0 masofada olmosning turg'un holatiga erishiladi. Shunda taqiqlangan zonaning kengligi 5,3 eVga teng bo'ladi.

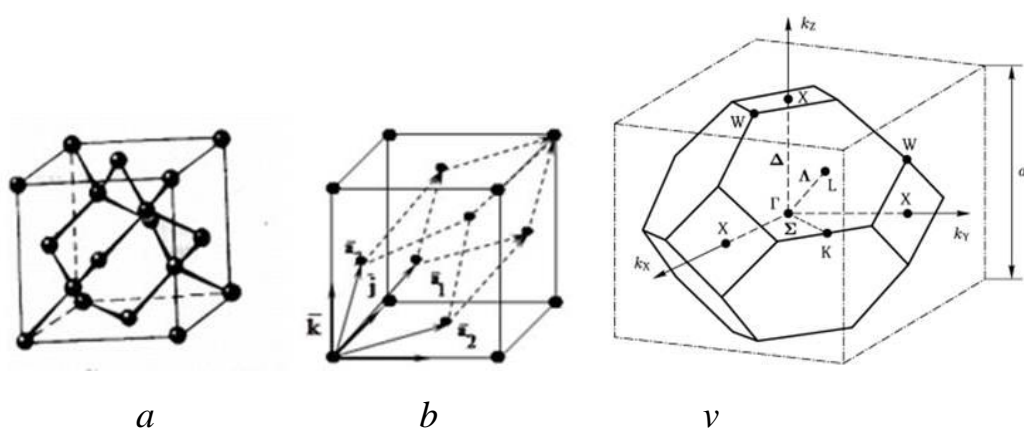
Ana shunday yo'l bilan kremniyda (3s va 3p holatlar) va germaniyda (4s va 4p holatlardan) energetik zonalar hosil bo'ladi. Ularning taqiqlangan zonalar kengligi $T = 0$ K da mos ravishda 1,165 va 0,746 eVni tashkil qiladi.



5.7-rasm. Energetik zonalar hosil no'lishi va metal, yarimo'tkazgich, dielektriklarda energetik zonalar



5.8-rasm. Xususiy (*a*), elektron (*b*) va kovak (*v*) yarimo'tkazgichlarning energetik zonalari



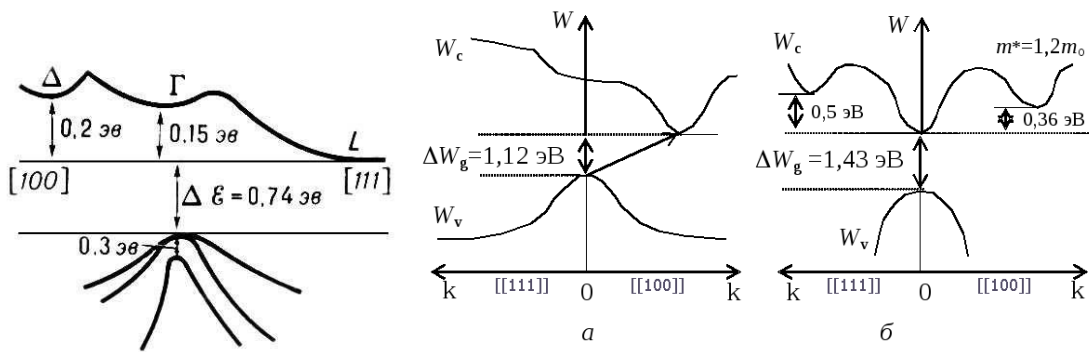
5.9-rasm. Kremniyning to'g'ri (*a*) va teskari (*b*) panjaralariningelementar yacheykalari va birinchi Brilliyuen zonasi (*v*)Panjara doimiysi $5,43 \text{ \AA}$, teskari panjaraniki $1,16 \text{ \AA}^{-1}$

G nuqta – Brilliyuen zonasining markazi, koordinatlari (0,0,0);

L nuqta - $\langle 111 \rangle$ o'qlarning (Δ chiziq) zona yonlari bilan kesishgan nuqtasi, koordinatlari (0,0,0);

X nuqta - $\langle 100 \rangle$ o'qlarning (Δ chiziq) zona yonlari bilan kesishgan nuqtasi, koordinatlari (0,0,1);

K nuqta - $\langle 110 \rangle$ o'qlarning (Σ chiziq) zona qirralari bilan kesishgan nuqtalari, koordinatlari (0,0,0).



Germaniy

Kremniy

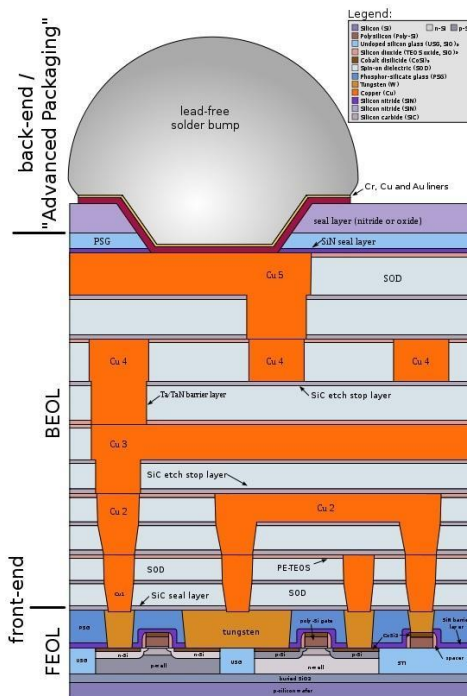
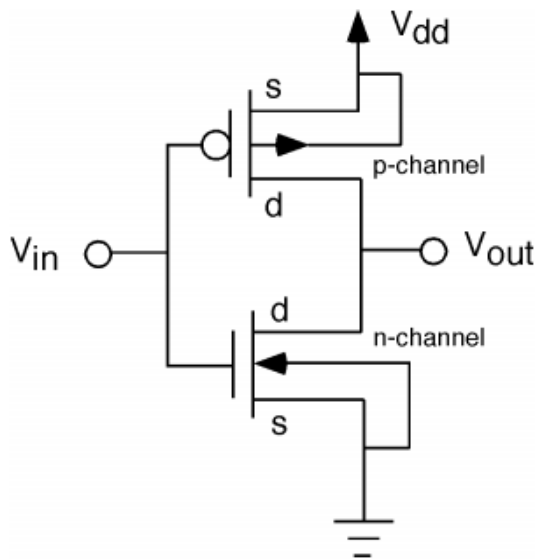
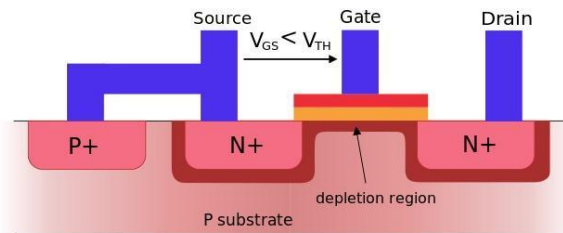
Galliyarsenadi

5.10-rasm. Germaniy, kremniy va galliy arsenadida energetik zonalar

5.4. Metall tranzistorlar

Zamonaviy raqamli mikrosxemalarning asosi MOP-tranzistor va SMOS yacheyka (5.9-rasm)

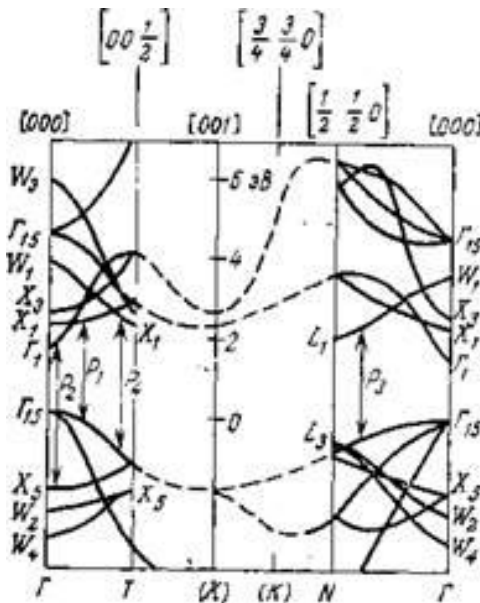
5.9-rasm. KMOYa (KMOP, CMOS)-chipning tuzilishi. Har bosqichda necha qatlam o'stirilishi rasmda ko'rsatilgan.



5.11-rasm. KMOYa-yacheyka va mikrosxemaning kesimi

Kremniy plastinkasidan tayyor mikrosxemagacha texnologik jarayonlar 50 marta takrorlanadi (5.11-rasm).

FEOL (front-end-of-line) jarayonlarini bajarish natijasi – plastinkada alohida tranzistorlarning yaratilishi, ular hozircha o'zaro bog'lanmagan. Plastinkadagi turli komponentlar orasida ichki bog'lanishlarni yaratish navbatdagi bosqich — BEOL (back end of line) da bajariladi.



5.12-rasm. Xalkopirit CuFeS_2 ga o'xshash tuzilishidagi yarimo'tkazgichlarning energetik zonalari

GaAs, GaN, GaP, InP, InSb, GaAlAs, AlGaIn, ZnO, In_2O_3 , SnO_2 , ITO va hokazo.

$A_{III}B_V$ yarimo'tkazgichlarining asosiy afzalligi –

zaryadtashuvchilareffektiv massasining kamligi va shuningamotashuvchilarning harakatlanuvchanligi yuqoriligi. Masalan, 300 K da kremniyda elektronlarning

harakatlanuvchanligi taxminan $0,15 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, GaAsda – $0,85 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, InAsda – $3,3 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, InSbda – $7,8 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.

Shu sabab bunday yarimo'tkazgichlardan yasalgan asboblarning ishlashtezligi yuqori.

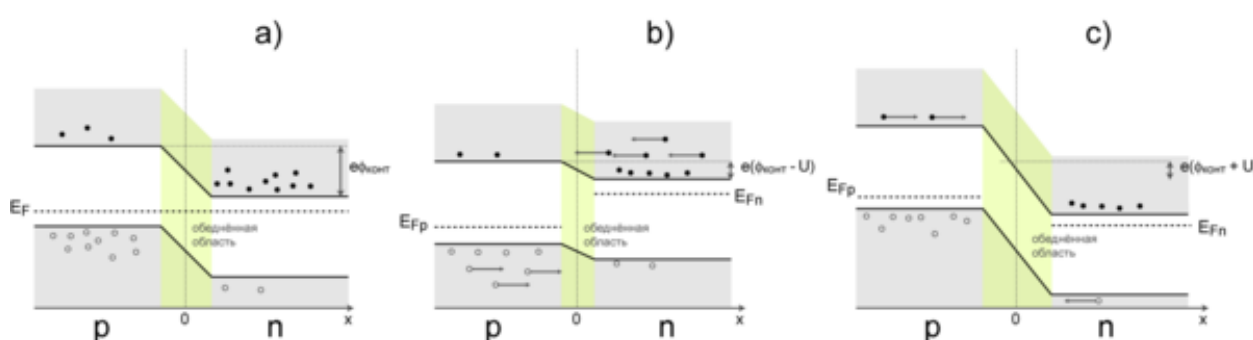
Kristall tuzilishining o'xshashligi - chegaralari nuqsonlarsiz geterotizimlar yaratish mumkin.

ZnO, In_2O_3 , SnO_2 , ITO shaffofo'tkazgichlar bo'lib, masalan, quyoshelementlarida ishlatiladi.

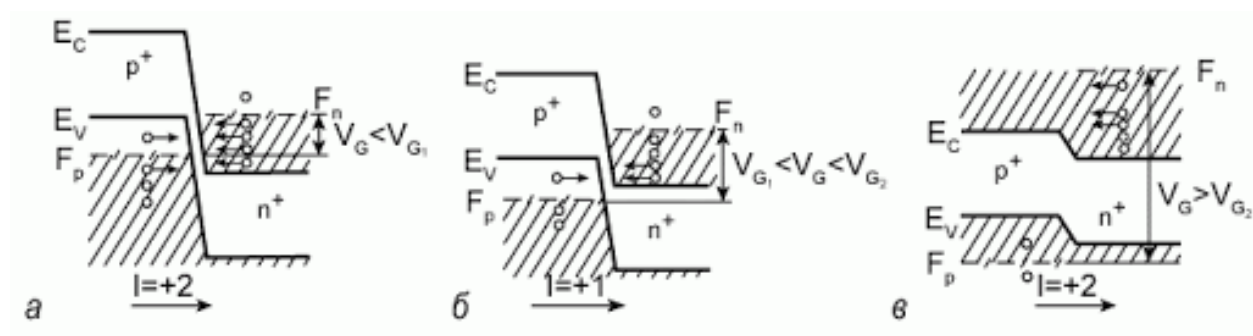
⊙ O'ta yuqori va teragers chastotadagi tranzistorlar va diodlar (400 GGs gacha yaratigan)

- ⊙ Favqulodda sharoitlarda ($T = 300-500^{\circ}\text{S}$), katta toklarda va yuqori kuchlanishlarda ishlaydigan tranzistorlar va diodlar (elektr transportda, energetikada elektr energiyasini o'zgartirish uchun)
- ⊙ FIK i yuqori energiya o'zgartirgichlar, masalan, quyosh batareyalari, termoelektrik o'zgartirgichlar
- ⊙ Yuqori unumli kompyuterlar uchun tranzistorlar, diodlar va mikrosxemalar
- ⊙ Turli to'liqin uzunliklarida ishlovchi quvvati oshirilgan lazerlar va svetodiodlar (uzoq IQ dan ultrabinafshagacha).

O'tkazuvchanligi ikki xil yarimo'tkazgichlar tutashuvining ($p-n$ -, $n-n^{+}$ -, $p-p^{+}$ -gomoo'tishlar) energetik diagrammasi

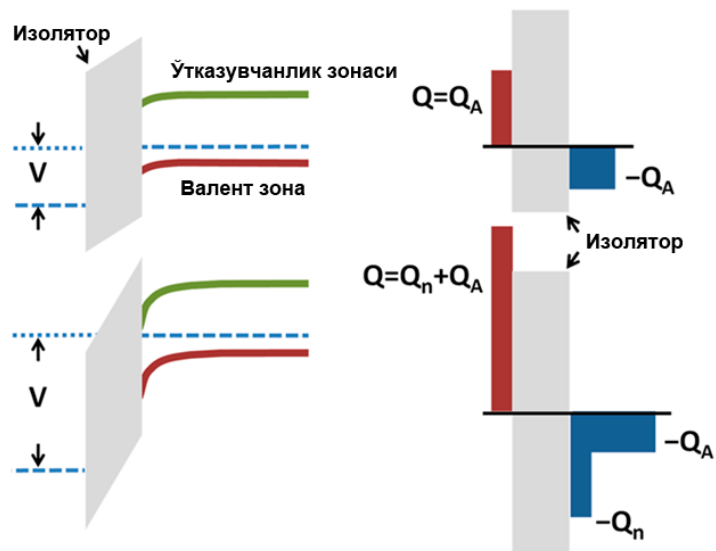


5.13-rasm. $p-n$ -o'tishning energetik diagrammasi muvozanat holatida (tashqi ta'sir yo'q - a), to'g'ri yo'nalishda (b) va teskari yo'nalishda (c)



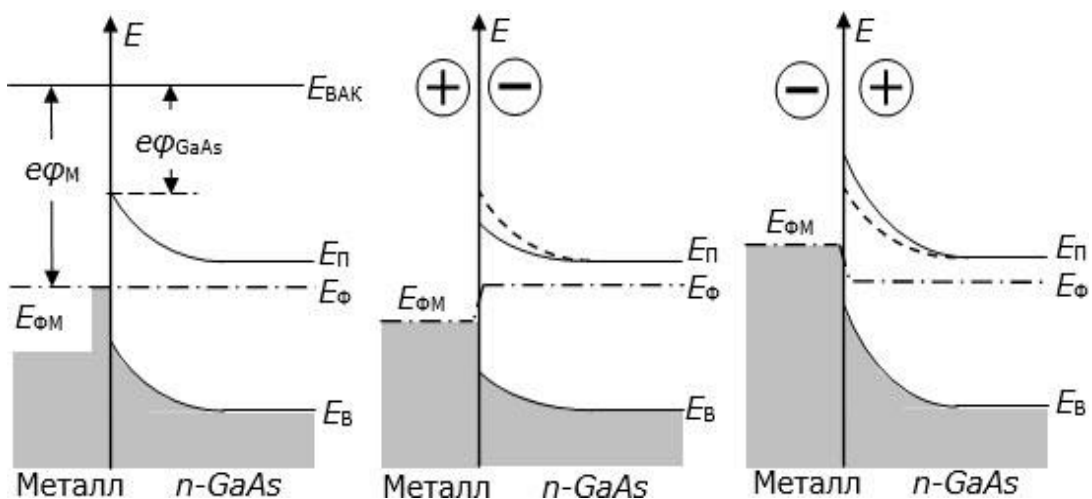
5.14-rasm. $p-n$ -o'tishda kvant tunnellanishi. (a) - muvozanat holatida (tashqi ta'sir yo'q), to'g'ri yo'nalishda (b) va teskari yo'nalishda (c)

Kremniyda invers qatlamlar

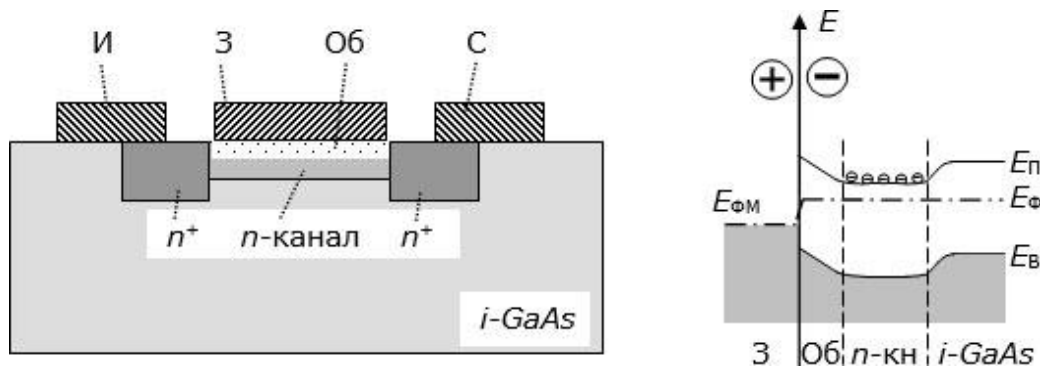


5.15-rasm. Kremniyda invers qatlamlarning energetik diagrammasi

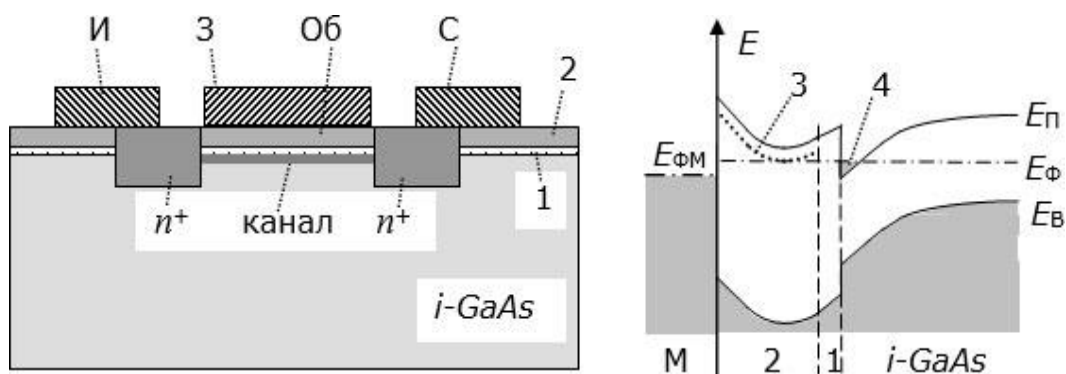
Geteroo'tishli tranzistorlar



5.16-rasm. Metall-yarimo'tkazgich o'tishi (Shottki to'sig'i) ning energetik diagrammasi



5.17-rasm. Shottki zatvorli maydon tranzistorining tuzilishi va energetik diagrammasi

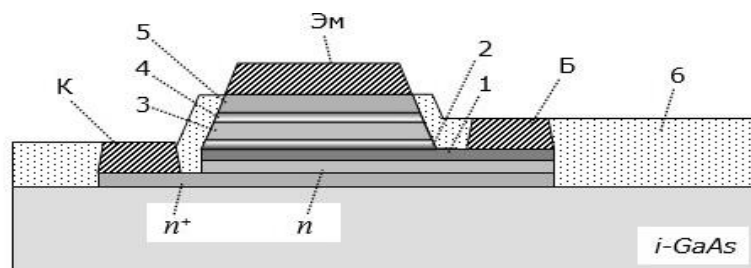


5.18-rasm. Shottki zatvorli maydon geterotranzistorining tuzilishi va energetik diagrammasi

O'ngda raqamlar bilan belgilangan: 1 - legirlanmagan GaAlAs qatlami (2-3 nm), 2 – n-GaAlAs qatlami, 3 – donorlarning energetik sathlari, 4 – ikki o'lchamli elektron gaz hududi (potensial o'ra, legirlanmagan GaAlAs qatlami).

Bu ikki o'lchamli elektron gaz kvant xossalarini namoyon qiladi, elektronlarning to'liq funksiyalari esa potensial o'ra devorlaridan chiqadi. Chegara chastotasi yuqori – 80-120 GGs (0,1-0,2 mkm) va 600 GGs (20 nm).

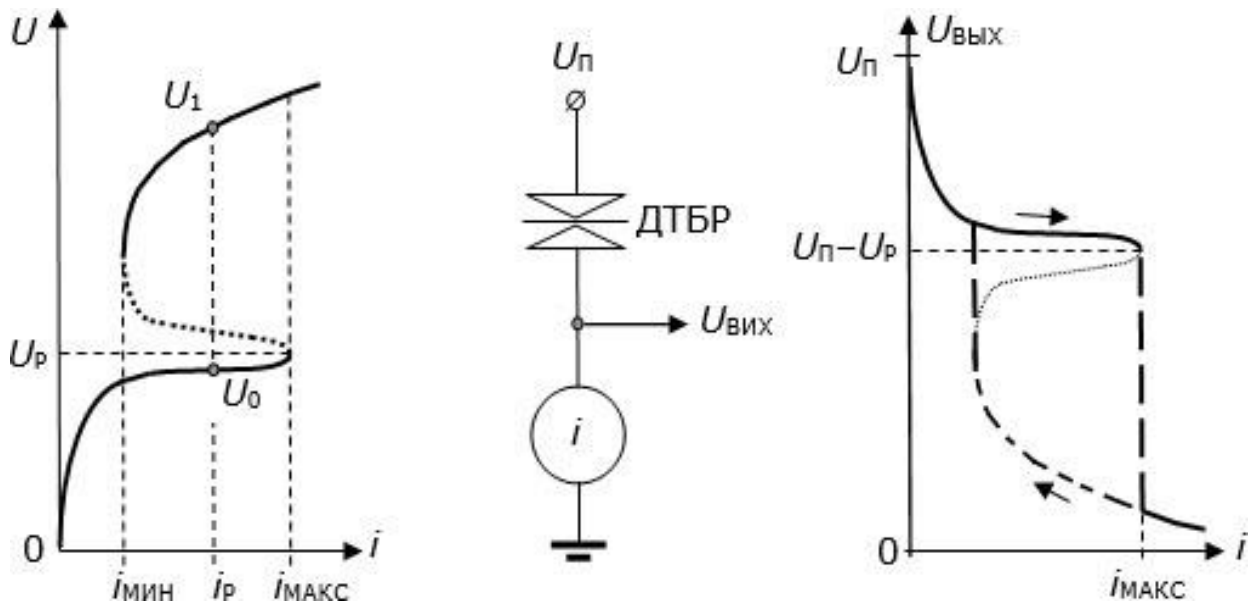
Bipolyar geterotranzistor



5.19-rasm. 1 – bazi qatlami (p+-GaAs), 2 – oraliq qatlam, 3 – emitter qatlami (n-GaAlAs), 4 oraliq qatlam, 5 – kontaktosti qatlami, 6 – izoliriyasiya qatlami. B, Em, K – mos ravishda bazaning, emitterning va kollektorning metall kontaktlari.

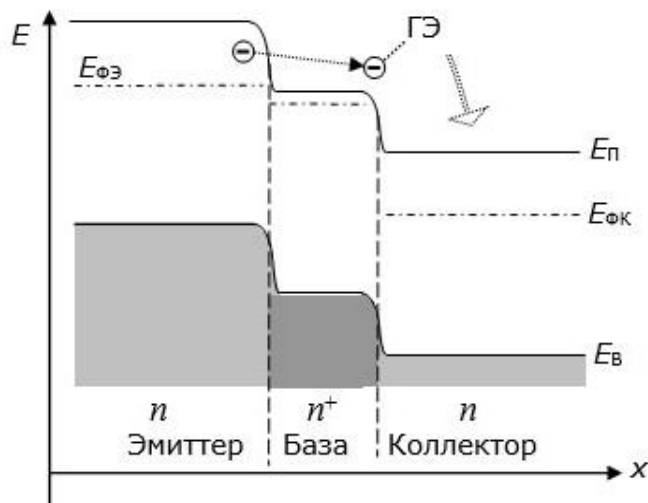
Bunday tranzistorlarning chegara chastotasi 250 GGs va hatto 400 GGs.

Rezonans tunnel geterotranzistor



5.20-rasm. Qo'shaloq tunnelto'siqli (QTT) kvanto'lchamli qatlamdagi kuchlanishning o'tayotgan tokka bog'liqligi, QTT ni tok manbasi bilan ketma-ket ulash sxemasi va bunday sxemaning chiqish xarakteristikasi. Pikosekundning ulushlari – tezkor logika Epitaksial o'stirish texnologiyasi QTT ning o'ta yupqa qatlamini bipolyar geterotranzistorning istalgan qismiga o'rnatish imkonini beradi.

Qaynoq tashuvchili tranzistorlar



5.20-rasm. Qaynoq tashuvchili tranzistorning energetik diagrammasi

Qaynoq tashuvchilarning energiyasi issiqlik energiyasi kT dan ancha yuqori.

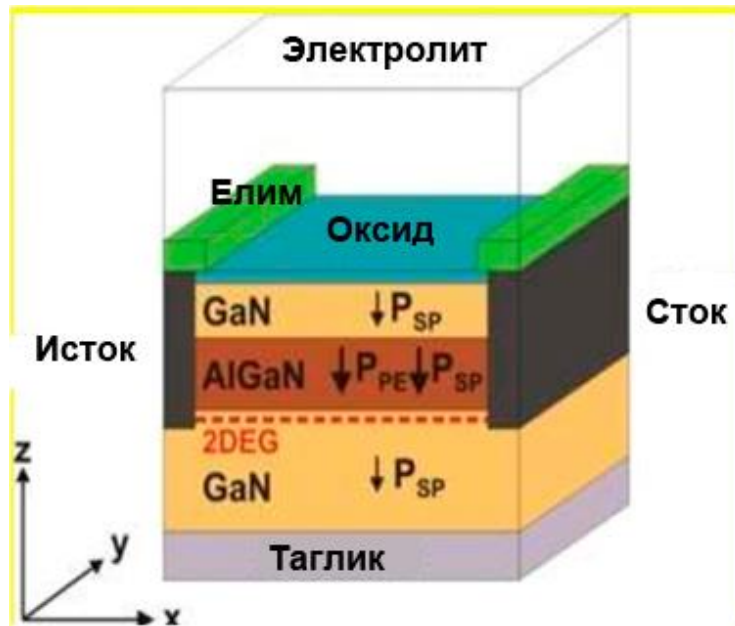
E_v – valent zonasining shipti, E_p – o'tkazuvchanlik zonasining tubi,

E_{fk} va E_{fk} – mos ravishda kollektordagi va emitterdagi Fermi sathlari.

Afzalligi – yuzlab GGs chastotalarda tokni kuchaytirish ko'effitsiyenti 10 dan oshadi va

shu bilan birga xususiy shovqin juda kam bo'ladi.

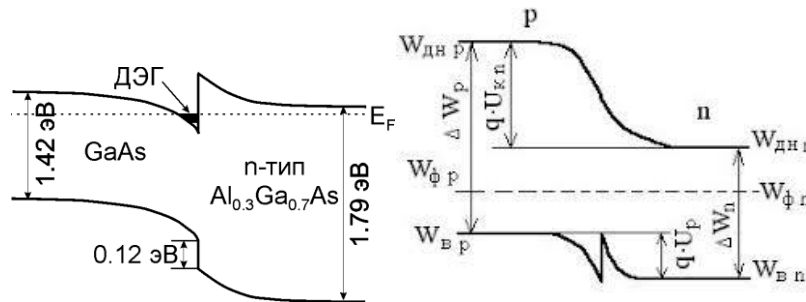
AlGaN danyasalganmaydontranzistori



5.21-rasm. AlGaN danyasalganmaydontranzistorining tuzilishi

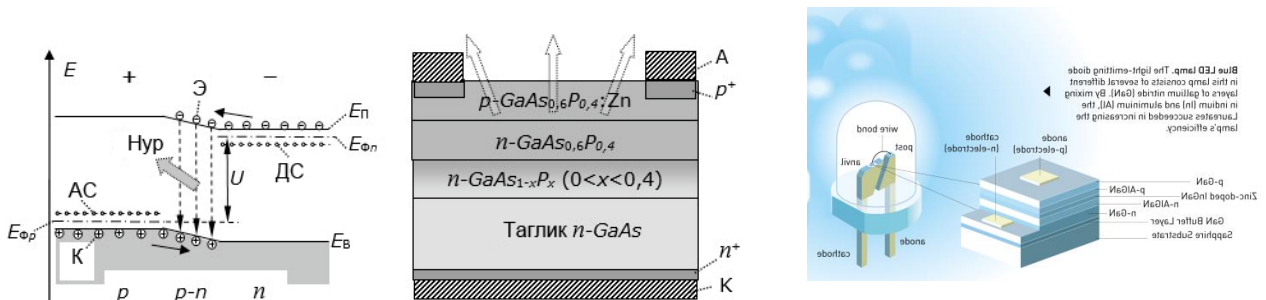
Katta kuchlanish vakatta toklarda, yuqori temperaturada ishlashi mumkin.

Getero'o'tishda ikki o'lchamli elektron gazning yuqori konsentratsiyasi hosil qilinishi mumkin (5.22-rasm).



5.22-rasm.

Geterostrukturalarning svetodioid sifatida ishlatilishi

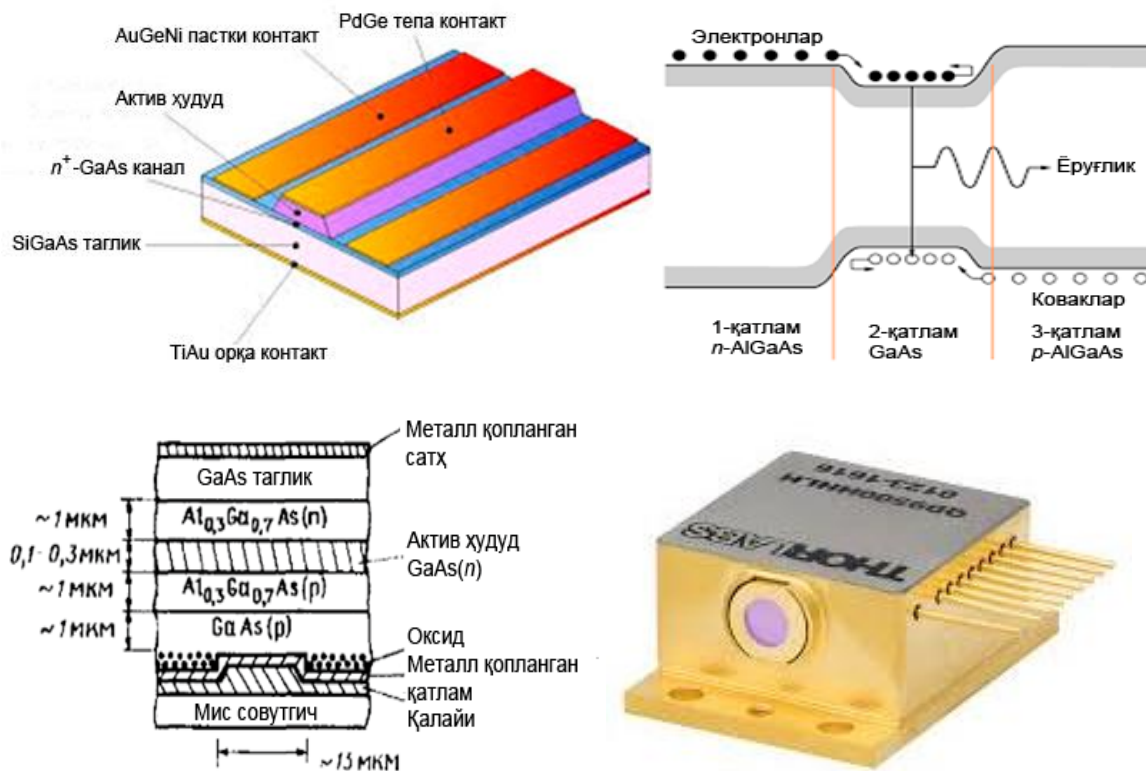


Qizil nur chiqaradi

Oq nur chiqaradi.

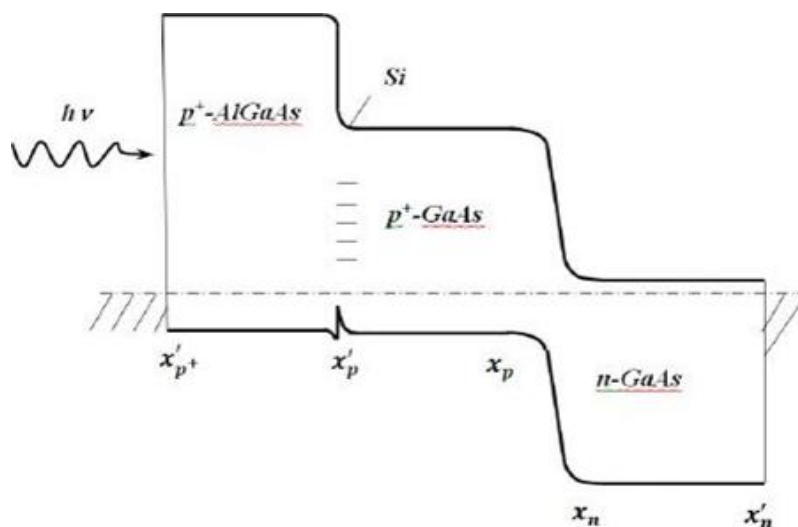
5.23-rasm. Geterostrukturalardan yasalgan svetodiodning tuzikishi

Geterostrukturalarning yarimo'tkazgich lazerlar sifatida ishlatilishi.



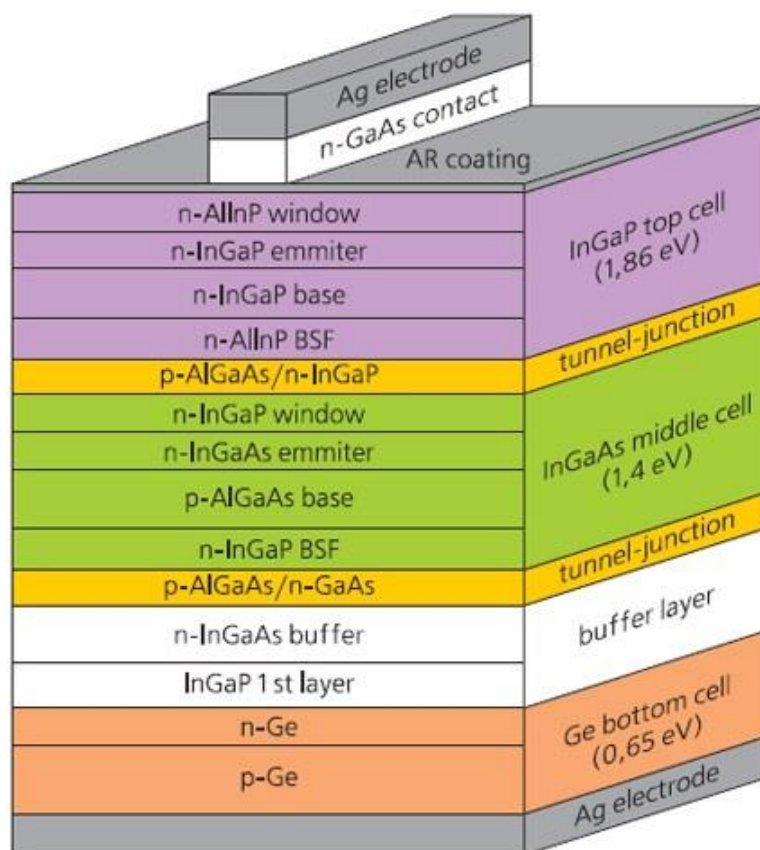
5.24-rasm. Geterostrukturalardan yasalgan lazerlarning tuazilishi, energetic diagrammasi va tashqi ko'rinishi

Geterostrukturalarning quyosh elementlari sifatida ishlatilishi.



5.25-rasm. Geterostrukturnalardan yasalgan quyosh elementining energetic diagrammasi





5.25-rasm. Geterostrukturalardan yasalgan quyosh elementining tuzilishi

6-ma`ruza. Xollning kvant effektlari. Butun sonly Xoll effekti.

Kasr sonly Xoll effekti.

REJA:

6.1. Xoll effekti tushunchasi.

6.2. Xollning kvant effektlari.

6.3. ButunsonliXolleffekti.

6.4. KasrsonliXolleffekti.

Tayanch iboralar: Elektr o'tkazuvchanlik, issiqlik o'tkazuvchanlik, Elektronlar va kvant oqimi. Kompozit zarrachalar. Fermion va bozonlar. Modullangan legirlash.

6.1. Xoll effekti tushunchasi.

1879-yilda amerikalik fizik Edvin Xoll qiziq bir fizik tajriba o'tkazdi. U yupqa to'rtburchak oltin plastinani kuchli magnit maydoniga, ushbu magnit maydoni tekisligiga perpendikulyar tarzda joylashtirdi. Keling, x va x' o'sha tilla to'rtburchakning ikkita qarama-qarshi tomonini ifodalasin; y va y' esa qolgan yana ikkita qarama-qarshi tomonini ifodalasin. Olim tillato'rtburchakning x va x' tomonlariga batareykaning qutblarini uladi va tok x yo'nalishida oqishni boshladi. Shunda Xoll hayrat bilan shuni kuzatdiki, y va y' tomonlar orasida ham muayyan elektr kuchlanishi yuzaga keldi. Ushbu kuchlanish esa, tokning zichligi va magnit maydoni qiymati B_z ning ko'paytmasiga proporsional ekan. Ko'p yillar mobaynida Xoll effektidan amaliy foydalanish sohasini topish qiyin bo'ldi. Chunki, bunda hosil bo'layotgan kuchlanish qiymati juda past edi. Lekin ushbu effekt XX-asrning ikkinchi yarmida butun dunyo bo'ylab son-sanoqsiz ilmiy tadqiqotlar va tajriba-sinov ishlanmalarida anchayin foydali manba sifatida qo'llanildi. Aytish joizki, Xoll tomonidan bunday past kuchlanishni kashf qilishi, elektron kashf qilinishidan naq 18-yil avvalroq sodir bo'lgan edi.

Xoll konstantasi R_H - induksiyalangan elektr maydoni E_y ning tok zichligi j_x va B_z ko'paytmasi bilan o'zaro nisbatiga teng:

$$R_H = \frac{E_y}{(j_x \cdot B_z)}$$

y o'qi bo'ylab yuzaga keladigan kuchlanish va tok kuchining o'zaro nisbati *Xoll qarshiligi* deyiladi. Xoll konstantasi ham, xoll qarshiligi ham qaralayotgan moddaning xossasi bo'ladi. Xoll effekti magnit maydoni va tok tashuvchilarining zichligini o'lchashda juda ham qo'l keluvchi muhim fizik effekt bo'lib chiqdi. Biz ataylab, «tok tashuvchilari» degan jumalani qo'llamoqdamiz. Chunki, biz bilgan elektr tokini nafaqat

elektronlar, balki boshqa turdagi zaryadlangan zarralar ham tashishi mumkin. Masalan, musbat zaryadlangan tok tashuvchilaridan *teshiklar* ni eslash o‘rinli.

Hozirgi kunda Xoll effektidan foydalanib ishlovchi qurilmalar talaygina. Xususan, magnit maydonini yoki suyuqlik oqimlarini qayd qiluvchi datchiklar, bosimdatchiklari, hamda, avtomobilni o‘t oldirish taqsimlagichlari shular jumlasidandir. 1980-yilda nemis fizigi Klaus fon Klitsing kvant miqyosidagi Xoll effektini ham kashf qildi. Aniqlanishicha, kuchli magnit maydoni va past haroratlarda, Xoll qarshiligining magnit maydoni bilan bog‘liqlik grafigida sakrashlar kuzatilar ekan.

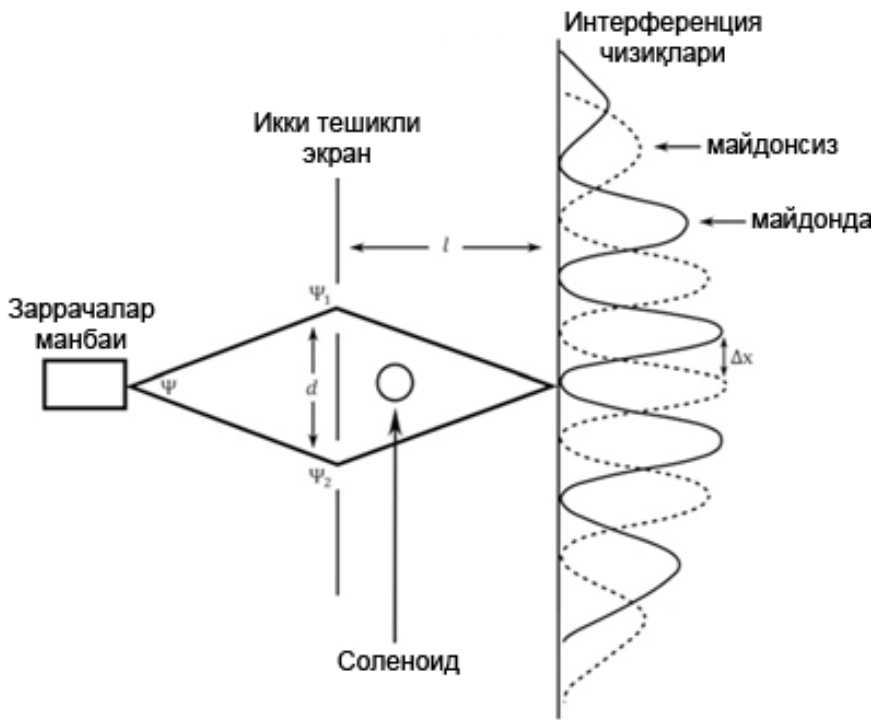
6.2. Xollning kvant effektlari.

Mikroskopik darajada tizimning xossalari kvantlangan bo‘lishi endi ajablanarli emas. Biroq, 1980 yilda fon Klitzing va boshqalar tomonidan o‘tkazilgan tajribajuda hayratlanarli natija ko‘rsatdi: Kvantlangan makroskopik xususiyatlarni ko‘rsatadigan tizimlar mavjud. Ushbu tajriba kuchli magnit maydonlar va past haroratlarda ostida ikki o‘lchovli erkin elektronlar tizimidan iborat edi. Taxminan doimiy o‘tkazuvchanlik qiymatining nisbatan katta bosqichlaridan iborat bo‘lgan magnit maydonning intensivligiga nisbatan o‘tkazuvchanlikning juda g‘ayrioddiy harakati kuzatildi. Ushbu hodisa hozirda kvant Xoll effekti deb nomlanadi va u o‘tgan asrdagi kondensatsiyalangan moddalar fizikasining eng muhim yutuqlaridan biri hisoblanadi.

Ikki o‘lchamli elektron gaz va Xollning kvant effekti Aaronov-Bom effekti: magnit maydonida 1 va 2 nuqtalarni birlashtiruvchi har xil trayektoriyalar boylab harakatlanayotgan ikki elektronning fazalari farqi

$$\Delta\phi = e\Phi / h,$$

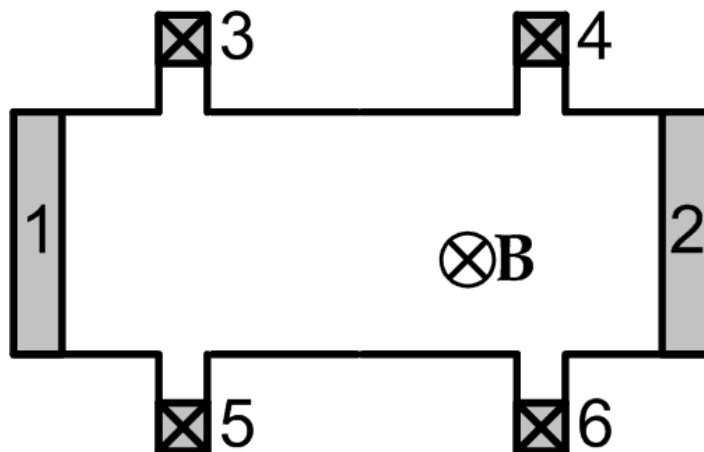
bunda Φ – shu trayektorilardan tashkil topgan konturdagi magnit maydoni oqimi.



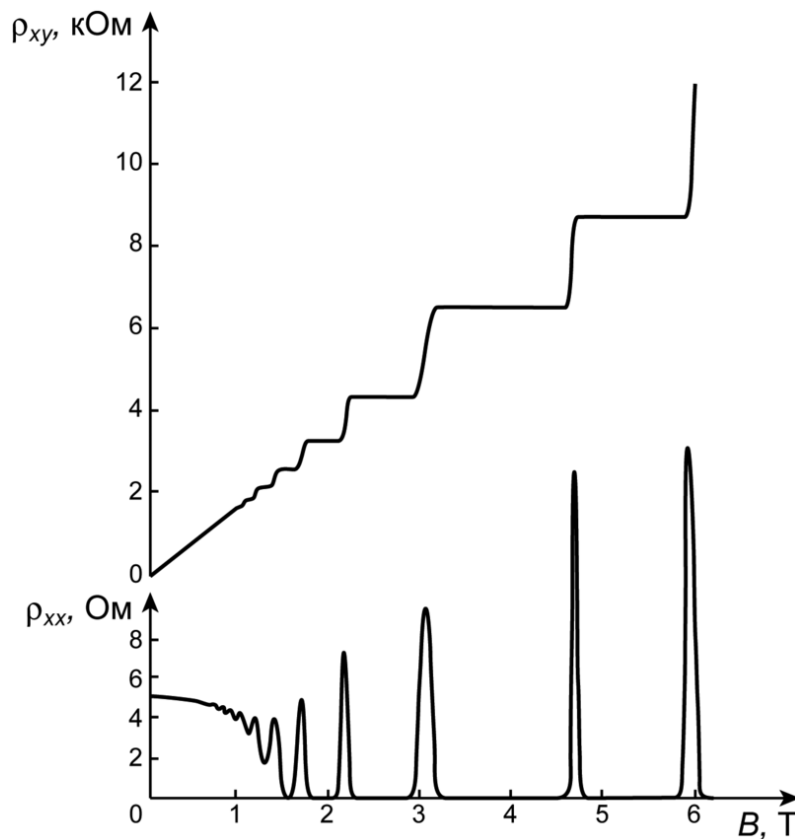
6.1-rasm. Aaronov-Bom effekti tufayli elektronlarning de Broyl to'liqlari interferensiyasi tasviri o'zgaradi – magnit maydonida markazda maksimum o'rniga minimum paydo bo'ladi.

Bu faza siljishini hisobga olsak Landau sathlari uchun boshqacharoq ifodani topamiz:

$$E_n = h\nu_L n.$$



6.2-rasm. Ikki o'lchamli elektron gaz.



$$\rho_{xy} = E_y / j = B / (ne).$$

Xoll qarshiligi – Xoll

EYuK sining bo'ylama

tokka nisbati:

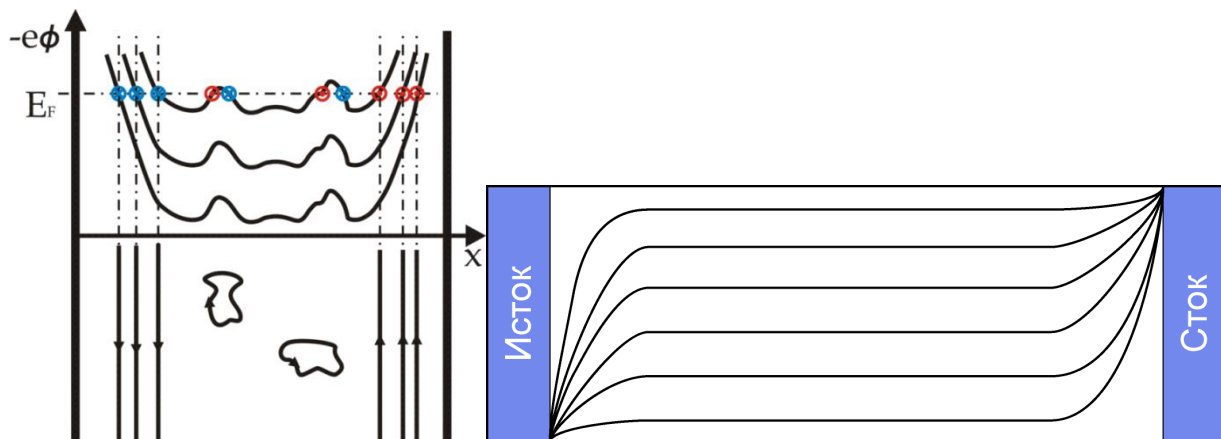
$\rho_{xy} = \frac{h}{e^2} \nu$ kvantlangan.
 ν – butun son
 (Landau sathlarining to'lish koeffitsienti)

6.3-rasm. Xollqarshiligining bo'ylama tokga nisbati.

Ikki o'lchamli electron gazning chekkasi yaqinida kambag'allashgan qatlam hosil bo'ladi va Landau sathlarining sanoq boshi koordinatga bog'liq bo'ladi – ular «yuqoriga» egiladi.

Fermi-Dirak statistikasi.

To'ldirish koeffisiyenti ν butun songa yaqinlashganda chekkadan uzoqroqda lokallashgan holatlar, chekka yaqinida esa tok holatlari paydo bo'ladi. Konturni aylanish yo'nalishi magnet maydonining yo'nalishi bilan belgilanadi.



6.4-rasm. Ikki o'lchamli elektron gaz va Xollning kvant effekti.

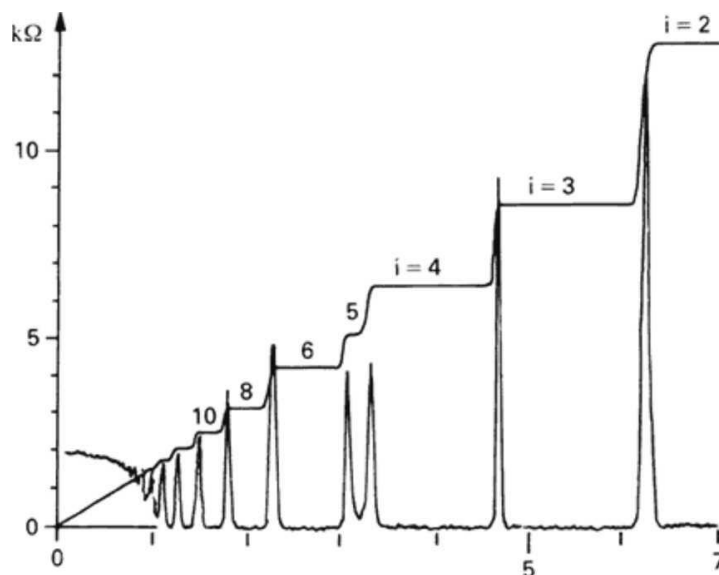
6.3. Butun sonli Xoll effektining kelib chiqishi.

Ikki o'lchovli elektron gazda juda past haroratda ($T < 4 \text{ K}$) kuchli perpendikulyar magnit maydon ($B \sim 0 \text{ (T)}$) ta'sirida elektr o'tkazuvchanligi klassik fizikaning bashoratlaridan tubdan farq qiladigan qiymatlarni oladi. Hall o'tkazuvchanligi deb ham ataladigan ko'ndalang o'tkazuvchanlik miqdori butun sonli qiymatlarni oladi:

$$\sigma_{xy} = \nu \frac{e^2}{2\pi\hbar}$$

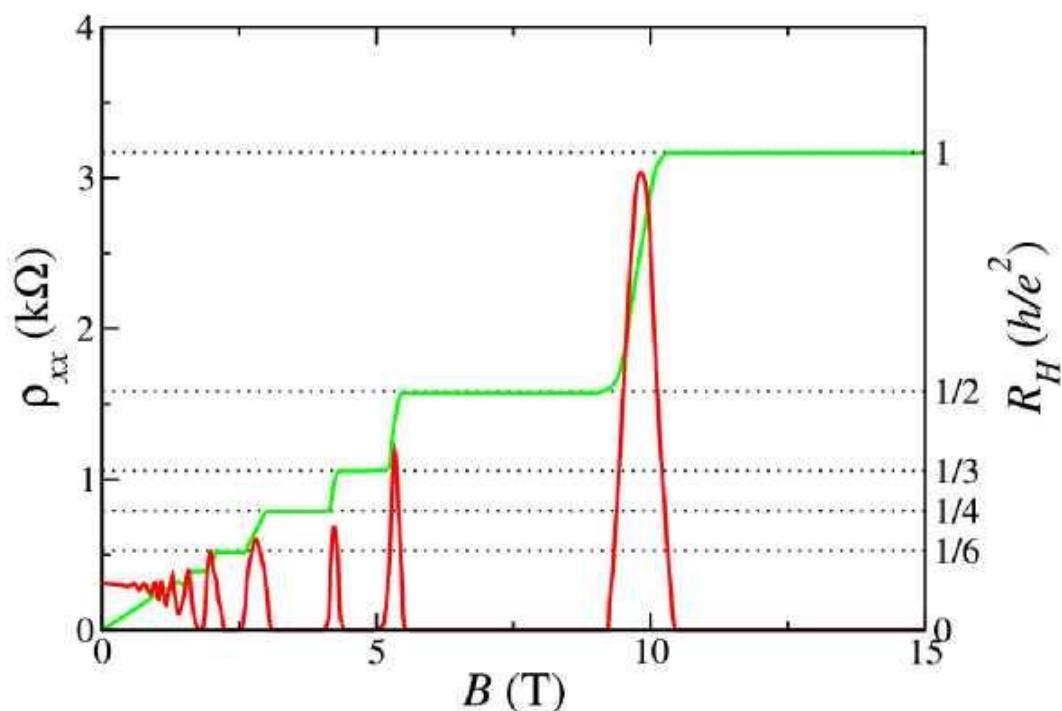
Bu erda ν qiymati butun son bo'lishi juda yuqori aniqlikda o'lchangan, shuning uchun butun son kvant Hall effekti nomi berilgan. Butun sonli kvant Xoll effektini kashf etgani uchun Klaus fon Klitsing 1985 yilda Nobel mukofotiga sazovor bo'ldi.

Biz butun son kvant Xoll effektining bir-biridan farq qiladigan ikkita tushuntirishini ko'rib chiqamiz. Qirralari bo'lgan chekli tizimda chekka yaqinidagi qo'zg'alishlar tomonidan belgilanadigan Hall oqimini izohlash mumkin. Bu chekka holatlarni tajribada ham kuzatish mumkin. Ular faqat bitta qat'iy yo'nalishda oqim o'tkazishi mumkinligi ma'nosida chiral rejimlardir. Shu bilan birga, bu chekka rejimlar tizimdagi uzluksiz o'zgarishlarda chekka rejimlar soni o'zgarmaydigan tarzda himoyalangan.



$$\rho_{xy} = \frac{2\pi\hbar}{e^2} \frac{1}{\nu}$$

6.6-rasm. Butun sonli kvant xoll effekti qarshilgining kuchlanishga bog'liqligi.



6.7-rasm: Butun sonli kvant Xoll tizimining qarshiligi, magnit maydonning funktsiyalari sifatida. Qizil chiziq p_{xx} bo'ylama qarshiligini ko'rsatadi, agar p_{xy} plato darajasida o'tirsa, u nolga teng bo'ladi va p_{xx} bir platodan ikkinchisiga o'tganda keskin ko'tariladi. Yashil chiziq Xoll qarshiligining p_{xy} ni bildiradi, u plato shaklini oladi, ya'ni magnit maydonlar oralig'ida doimiydir.

6.4. Kasrsonli Xoll effekti.

1982-yilda Daniel Sui (Daniel Tsui) va Xorst Shtyormer (Horst Störmer) ochishgan, 1983-yilda Robert Laflin tushuntirib bergan.

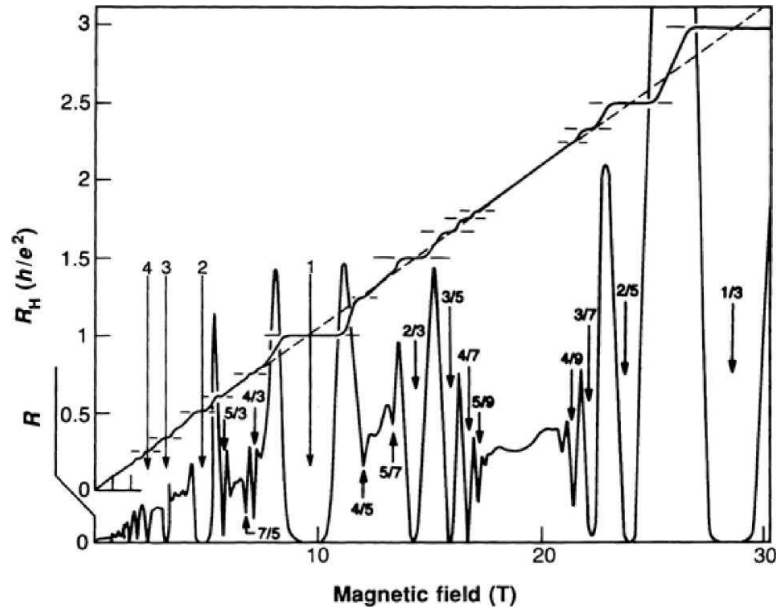
Xoll qarshiligidagi «yassi hududlar» nafaqat n ning butun son qiymatlarida, balki kuchli magnit maydonida $n = 1/3$ bo'lganda, keyinchalik esa n ning boshqa kasr qiymatlarida ($n = 2/5, 3/7\dots$) ham kuzatildi.

Qismantoldirilgan electron zonalarikuchlikorrelyasiyalitizimbo'lib, undaayrimelektronlarniboshqalargabog'lanmagandebbo'lmaydi, chunkielektronlarningo'zarota'siritizimningxossalarinimutlaqo'zgartiradi.Bundaytizimd aayrimelektronlaro'rnigakvazizarrachalar – yangi, jamoaviyerkinlikdarajalaripaydobo'ladi.Laflinshundaykvazizarrachalarningto'lqinfunksiyasinitopdi, vaundankelibchiqdi-ki, kvazizarrachalarkasrzaryadgaega.

Kasr kvant Xoll effekti kuchli magnit maydonlarida kuzatiladi.Kuchli deganning ma'nosi – bunday maydonda elektronlarning siklotron orbitalarining radiusi elektronlar orasidagi masofadan ancha kam.Elektronlarning itaruvchi elektr maydoni ularni magnit maydonida bir-birining yonida sekin surilish (dreyf) ga majbur qiladi. Agar

elektronlarning o'rnida bir-biriga tortiluvchi zarrachalar bo'lsa (masalan, elektron va pozitron) ular o'zaro parallel siljishadi.

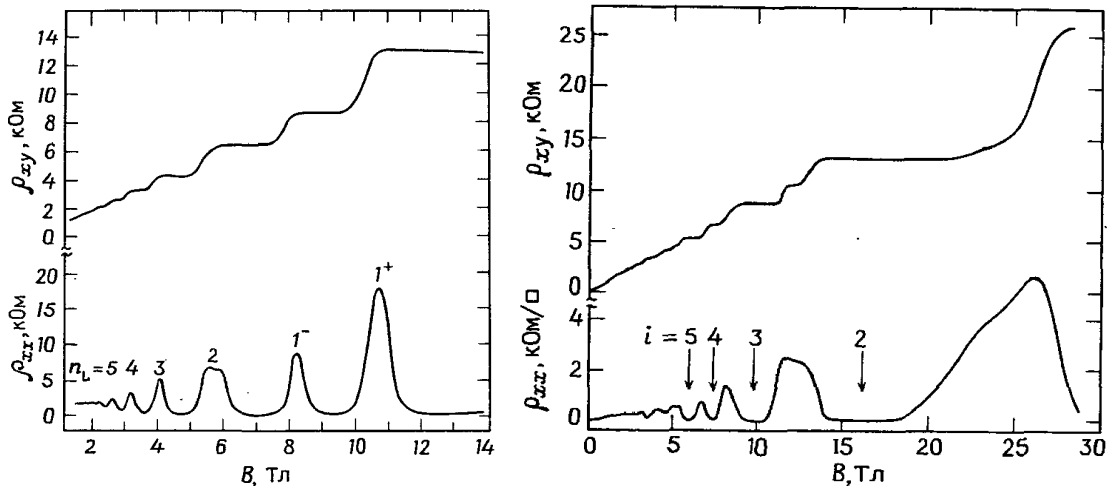
Shunday qilib, ikki zarracha bog'langan holat – ularning o'zaro ta'siriga bog'liq bo'lmagan universal hodisa - yaratadi. Bunday bog'lanan holat, xususan, o'ta o'tkazuvchanlikka olib keladi.



$$\rho_{xy} = \frac{2\pi\hbar}{e^2} \frac{1}{\nu} \quad \nu \in \mathbb{Q}$$

6.8-rasm. Karsonli Xoll effekti.

Boshqa nanotizimlarda kvant Xoll effekti



6.9-rasm. GaSb-InAs-GaSb geterotizim $T = 0,55 \text{ K}$ va $B = 28 \text{ T}$ gacha. Bir vaqtning o'zida elektronlar va kovaklar mavjud – InAs dagi ikki o'lchamli elektron gaz va GaSb dagi ikki o'lchamli kovak gaz. Chala metall, ammo InAs ga o'tgan elektronlar soni uning qalinligiga bog'liq. Kritik qalinlik 6 nm (undan yupqa bo'lsa elektronlar

o'tmaydi), 30 nm da – toyinish. 1^+ va 1^- - spin boyicha ajralgan sathlar

Kvant Xoll effektining qo'llanilishi. Qarshilik standarti sifatida ishlatiladi. Hozirgi vaqtda ma'lum-ki, kvantlangan Xoll qarshiligining qiymati na namunaning sifatiga, na uning materialiga bog'liq. Shuning uchun 1990-yildan boshlab qarshiliklarni kalibrovka qilish (asl qiymatini belgilash) belgilab qoyilgan qiymati $R_e = 25812.807557(18)$ Om bo'lgan kvant Xoll effektiga asoslangan.

7-ma`ruza. Kvant tunnellanish effekti. Rezonans tunnellanish. Bir elektronli tranzistor. Sirt plazmon rezonansi (SPR). Nanofotonika elementlari.

Reja:

7.1 Kvant tunnellanish effekti.

7.2 Rezonans tunnellanish.

7.3 Sirt plazmon rezonansi (SPR).

7.4 Nanotexnologiya va nanofotonika elementlari.

Tayanch iboralar: tunnellanish effekti, elektronlar va kvant oqimi, bir elektronli transistor.

7.1. Kvant tunnellanish effekti.

Tasavvur qiling, siz kichkina koptokchani xonangiz devoriga otib, uni devorga urilib qaytishida yana tutib olib, o'ynamoqdasiz. Albatta, har safar koptokchani devorga otganingizda u devorga borib urilib qaytadi. Chunki, u devor orqali qo'shni xonaga o'tib ketishi uchun yetarli energiyaga ega emas.

Biroq, kvant mexanikasi qonunlariga ko'ra, koptokcha ehtimoliylikning uyqash to'liqlari sifatida tasavvur qilinadi va kvant fizikasiga ko'ra, koptokchada devor orqali qo'shni xonaga o'tib ketish uchun juda oz bo'lsa-da, harholda imkoniyat bor. Geyzenbergning noaniqliklar nisbatlari tamoyilini energiyaga tadbiq qilish qoidalariga asosan, koptokni tashkil qiluvchi zarrachalar devorni tashkil qiluvchi zarrachalar orqali tunneldan o'tgandek o'tib ketishi ehtimoldan holi emas. Ushbu nisbatga ko'ra, zarracha muayyan vaqt momentida muayyan energiya miqdoriga ega bo'ladi deb aniq aytishning iloji yo'q. o'ta kichik vaqt birliklari miqyosida, zarracha energiyasi sezilarli darajada fluktuatsiyalanishi mumkin va natijada, u devor to'sig'ini yengib o'tish uchun yetarli qiymatga ega bo'lib qolishi mumkin. Bu satrlarni o'qib, siz xuddi ertak eshitayotgandek, yoki, bo'lmag'ur gaplarni o'qiyotgandek ensangiz qotishi tabiiy. Bu faqat - sizning kvant fizikasidan yaxshi xabardor emasligingiz tufaylidir. Aslida, tabiatda bu tarzdagi kvant tunnellarish effekti allaqachon mavjud va u hozirda sizning qo'l ostingizda ham ro'y bermoqda desam, - hayratda qolmang. Masalan, tranzistorlarda elektronlar ushbu elektron uskunaning bir qismidan boshqa qismiga tunnel effekti bilan o'tib turadi. Yadroviy parchalanishda ham zarrachaning uchib chiqishi tunnel effekti hodisasi orqali ro'y beradi. Xususan, alfa-zarracha (geliy yadrosi) oxir-oqibatda uran yadrosidan tunnellanadi. Ushbu effektini XX-asr o'rtalarida mashhur fizik Georgiy Gamov (1904-1968) va undan mustaqil ravishda Ronald Gyorni (1898-1953) hamda Edvard Kondonlar (1902-1974) tomonidan bayon qilingan edi. Ular, agar tunnel effekti bo'lmaganda, alfa-zarracha hech qachon yadrodan uchib chiqa olmagan bo'lardi, - deb bir ovozdan ta'kidlashgan.

Tunnel effekti [Quyoshdagi termoyadro sintezi reaksiyalarining](#) borishi uchun ham juda muhimdir. Ushbu effektsiz yulduzlar ham charaqlamagan bo'lardi. Skanerlovchi tunnel mikroskopida tunnellanish hodisasi o'tkazgich yuzalarning mikroskopik reliefini kuzatish imkoni beradi. Bunday mikroskopda juda ingichka va o'tkir igna (zond) qo'llaniladi va ushbu igna va tekshirilayotgan namuna orasida tunnel toki oqadi. Biokimyoy va mikrobiologiyada ham, tunnel effekti fermentlar tomonidan ayrim reaksiyalarni qanday katalizlanishi mexanizmlarini o'rganish uchun qo'llaniladi.

Albatta, boshida keltirilgan misol - koptokchani devor orqali qo'shni xonaga o'tib ketishi - favqulodda oz ehtimollikka ega va makroskopik miqyosda deyarli imkonsiz. Tunnellanish faqat subatom miqyoslarida ro'y beradi va bizning olamimizda amalda yuz berishi ehtimolligi favqulodda darajada oz. Sizing devor orqali yotoqxonadan oshxonaga o'tib ketishingiz ehtimoli garchi yo'q darajada kam bo'lsa-da, harholda kvant fizikasi doirasida bunday ehtimollik istisno qilinmaydi. Lekin, agar siz koptokchani har soniyada bir martadan devorga otib tursangiz, sizda, butun Koinot paydo bo'lgandan buyon o'tgan vaqtdan (~13,7 milliard yil) ham ko'proq vaqt sarflash orqaligina, koptokchani devor orqali tunnellab yuborish imkoni paydo bo'ladi.

Kvant mexanikasi tunnellanish hodisasi

Shredingertenglamasi

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U_{\text{pot}})\psi = 0,$$

Agar $E > U_{\text{pot}}$ bo'lsa, butenglamaningechimiquyidagiko'rinishdabo'ladi:

$$\psi = A \exp\left(ix \frac{\sqrt{2m(E - U_{\text{pot}})}}{\hbar} \right) + B \exp\left(-ix \frac{\sqrt{2m(E - U_{\text{pot}})}}{\hbar} \right).$$

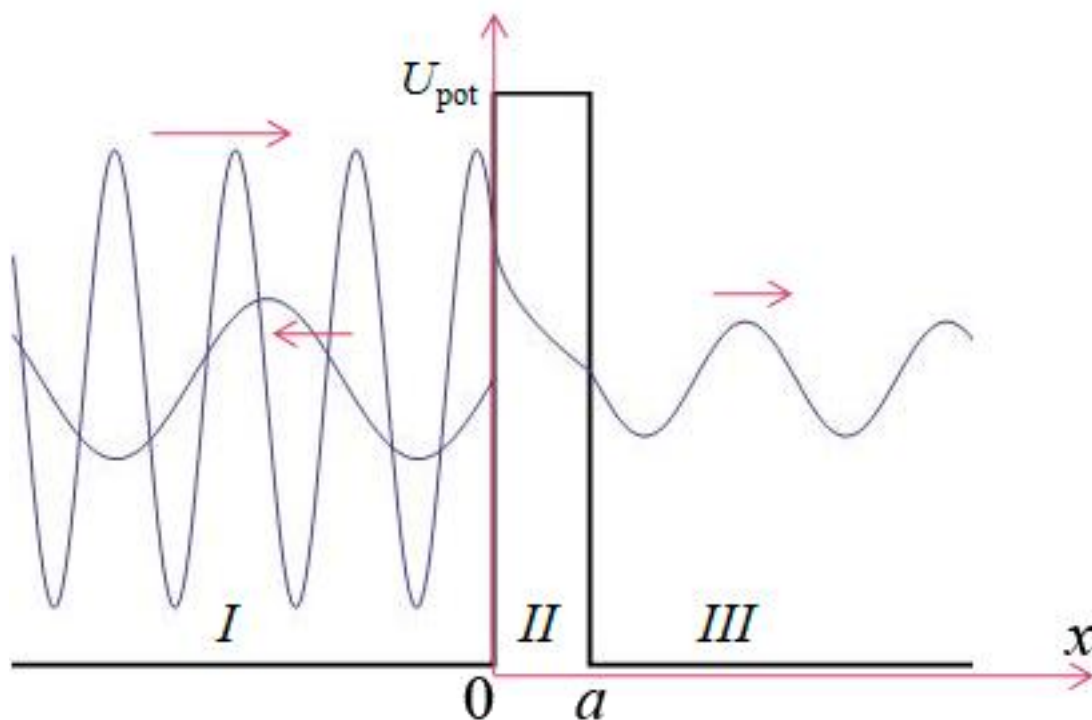
Harakatlanayotganzarrachabalandligi $U_0 \gg E$ vakengligiabo'lganpotensialto'siqqaduchkeldideylik. Unda *I*, *II* va *III* hududlar uchunto'liqinfunksiyasi quyidagichayoziladi:

$$\psi_I = A_1 \exp(ikx) + B_1 \exp(-ikx),$$

$$\psi_{II} = A_2 \exp(-\chi x) + B_2 \exp(\chi x),$$

$$\psi_{III} = A_3 \exp(ik(x - a)) + B_3 \exp(-ik(x - a)),$$

$$k = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(E - U_f)}, \quad \chi = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(U_0 - E)}.$$



7.1-rasm. Potensial to'siq orqali tunnellanib o'tish. a - to'siqning kengligi, U_{pot} - to'siqning balandligi

$B_3 \exp(-ik(x-a))$ qo'shiluvchi cheksizlikdan kelayotgan qaytgan to'liqini ifodalaydi. Berilgan sharoitda bu to'liqinyo'q. Shuning uchun $B_3 = 0$.

O'tgan zarrachalar oqimi zichligining tushayotgan oqim zichligiga nisbatini ifodalash uchun to'siqning shaffoflik koeffitsiyenti kiritiladi:

$$D = \frac{j_{III}}{j_I}$$

Zarrachalar oqimi quyidagicha ta'riflanadi:

$$j = \frac{i\hbar}{2m} \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial x} \psi - \frac{\partial \psi}{\partial x} \psi^* \right),$$

shuning uchun
$$D = \frac{|A_3|^2}{|A_1|^2}.$$

Pirovardda Bunda
$$D \cong D_0 \exp\left(-\frac{2a\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar}\right). \quad D_0 = \frac{16n^2}{(1+n^2)^2} = 16 \frac{(U_0 - E)(E - U_f)}{(U_0 - U_f)^2}.$$

Ixtiyoriy shakldagi potensial to'siq uchun quyidagicha almashtiruv qo'llaniladi:

$$\frac{2a\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar} \Rightarrow \frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U(x) - E)} dx, \quad D \cong D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U(x) - E)} dx\right).$$

unda

$U(x_1) = U(x_2) = E$ shartdan x_1 va x_2 aniqlanadi.

Tunnellanish hodisasini quyidagicha yozilgan noaniqliklar nisbati orqali ham tushuntirish mumkin:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2}, \quad \overline{\Delta p^2} > \frac{h^2}{4\Delta x^2} = \frac{h^2}{4l^2}.$$

Impulsning noaniqligi Δp energiyaning noaniqligiga olib keladi,

$$\Delta E \sim (\Delta p)^2.$$

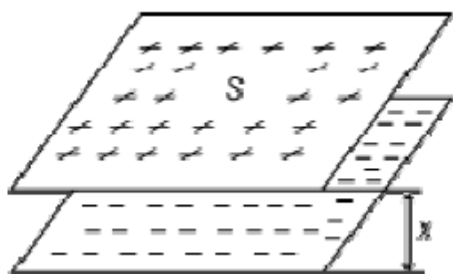
va ayrim zarrachalar to'siqdano'tishga yetarli energiyaga ega bo'lishlarim mumkin.

Makroskopik tizimlarda tunnellanish hodisasi bir nechta ko'rinishdan amoyon bo'ladi:

1. Zaryad tashuvchilarning p - n -o'tishdagi potensial to'siqdano'tishi — amalda tunneldiodlarda foydalaniladi.
2. Bir qator metallar (xususan, alyuminiy) yuzasini qoplovchi va dielektrik xossasiga ega bo'lgan yupqa oksid qatlami orqali zaryad tashuvchilarning tunnellanishi. Bujarayono'tkazgichlarning mexanik tutashgan (buralgan, qisqichli, jamperli) joylarining o'tkazuvchanligini ta'minlaydi. O'tao'tkazuvchan materiallarga nisbatan bu hodisa Jozefson effektide botaladi.
3. Avtoelektron emissiya — qattiq jismining yuzasi yaqinidagi kuchli elektr maydoni hosil qilinganda elektronlarning potensial to'siq orqali qattiq jismdan vakuumga tunnellanishi.

7.3. Sirt plazmon rezonansi

Plazmon va plazma chastotasi.



7.2-rasm. Plasma tebranishlarining paydo bo'lishi

Zaryadlarning yuza zichligi $\sigma = eN_e x$

Yassikondensatorning maydoni $E = \sigma/\epsilon_0 = eN_e x/\epsilon_0$

Bu maydonda elektronlarning qaytaruvchilik uchun = $e^2 N_e x/\epsilon_0$,
va elektronlarning tezlanishi

$$\mathcal{E} = -\frac{e^2 N_e}{m^* \epsilon_0} x.$$

Bu tenglama ω_p chastotali garmonik tebranishlarini ifodalaydi:

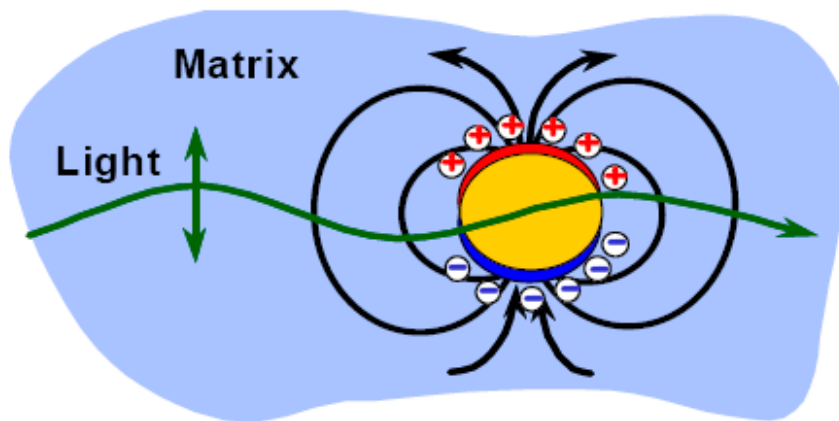
- plazmate tebranishlarining xususiy chastotasi

Plazmate tebranishlarini hisobga olganda yutilish koeffitsiyenti tubandagicha bo'ladi:

$$\alpha = 3V \frac{\omega_p^2}{\omega_p^2 - 3\omega^2 - i\gamma\omega} \quad \longrightarrow \quad \omega_{sp} = \sqrt{3}\omega_p$$

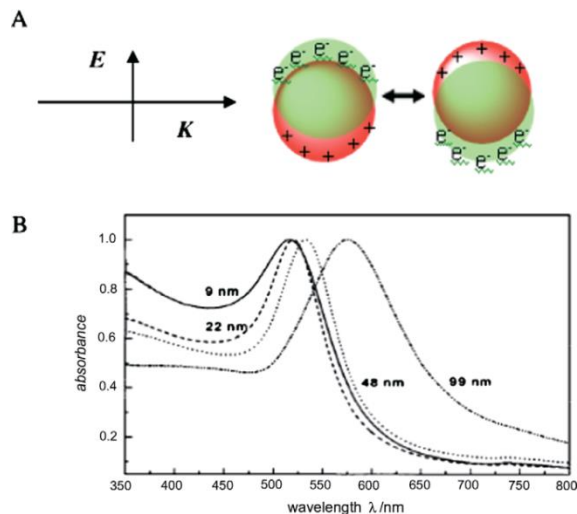
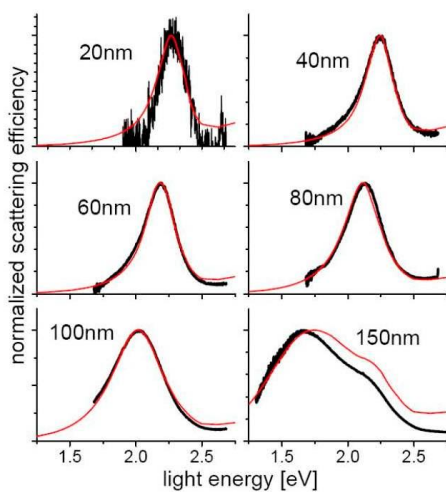
Yuza plazmon rezonansi

Yuza plazmon (Yup) – faqat nanozarracha yoki o'tkazgich sathi yaqinida, o'tkazgich-dielektrik chegarasida mavjud bo'ladi



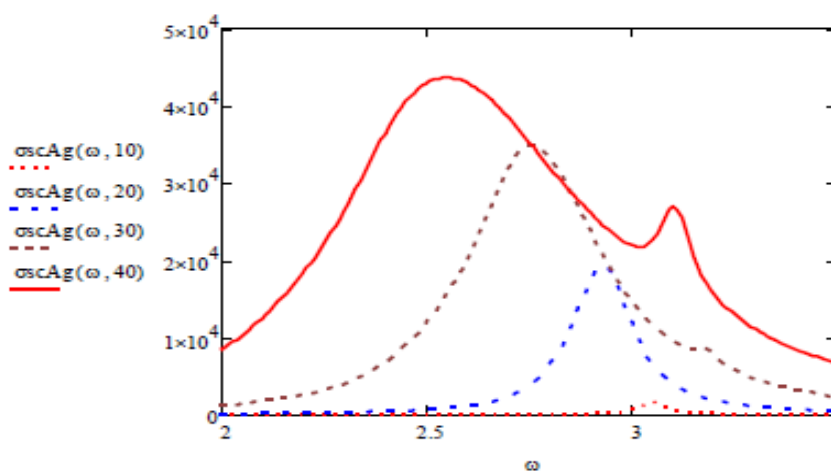
7.3-rasm. Nanozarrachada yuza plazmon rezonansi

Nurlanish sochilishi va yutilishining Mi nazariyasi (1908-yil)



7.4-rasm. Turli

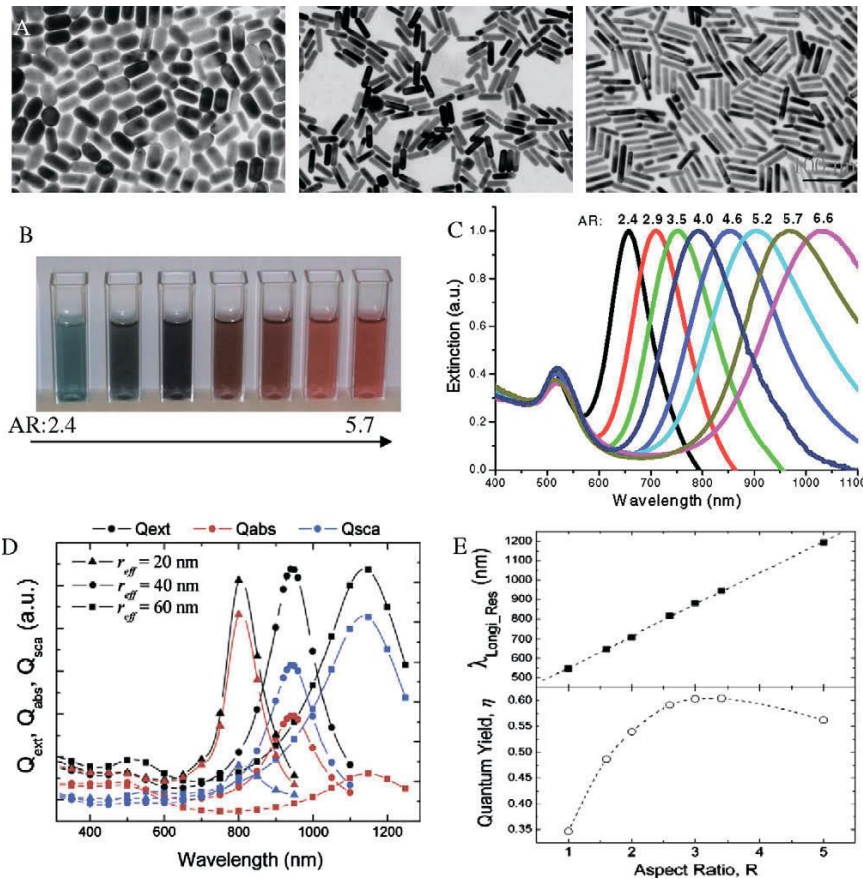
diametrli oltin nanosferalarida nurlanish sochilishi spektrlari: tajriba (qora chiziqlar)va
Mi nazariyasi natijalari (qizil chiziqlar)



7.5-rasm. Shishada plazmon rezonansi yaqinida turli radiusli (10, 20, 30, 40 nm) kumush nanozarrachalarida sochilishning hisoblangan ko'ndalang kesim yuzasi

$$\gamma = \frac{2\pi N M \epsilon_b^{3/2}}{3\lambda} \sum_j \frac{(1/P_j^2)\epsilon_2}{\left(\epsilon_1 + \frac{1-P_j}{P_j}\epsilon_m\right)^2 + \epsilon_2^2},$$

$$P_B = P_C = \frac{1-P_A}{2}, \quad e = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2}, \quad P_A = \frac{1-e^2}{e^2} \left[\frac{1}{2e} \ln \frac{1+e}{1-e} - 1 \right], \quad \lambda_{\max} = 95R + 420$$



7.6-rasm. Nanozarrachalar shakli va o'lchamlarining yorug'likning yutilish spektriga ta'siri

Plazmonrezonansining ta'siri.

- Rezonansda yutilish koeffitsiyenti va sochilish kesim yuzasi keskin oshadi
- Rezonansda nanozarrachadagi elektr maydoni keskin ortadi (nanozarrachaning rezonator sifatida sifatligiga mos): kumush zarrachalarida sifatlilik 30 gacha boradi, sochilish kesim yuzasi 10 martagacha ortadi:

$$\alpha = 3V \frac{\omega_p^2}{\omega_p^2 - 3\omega^2 - i\gamma\omega} = 3V \frac{\omega_p^2}{(\omega_p^2 - 3\omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} [\omega_p^2 - 3\omega^2 - i\gamma\omega]$$

Fotonning nanozarrachada sochilish koeffitsiyenti

$$C_{\text{scat}} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 |\alpha|^2$$

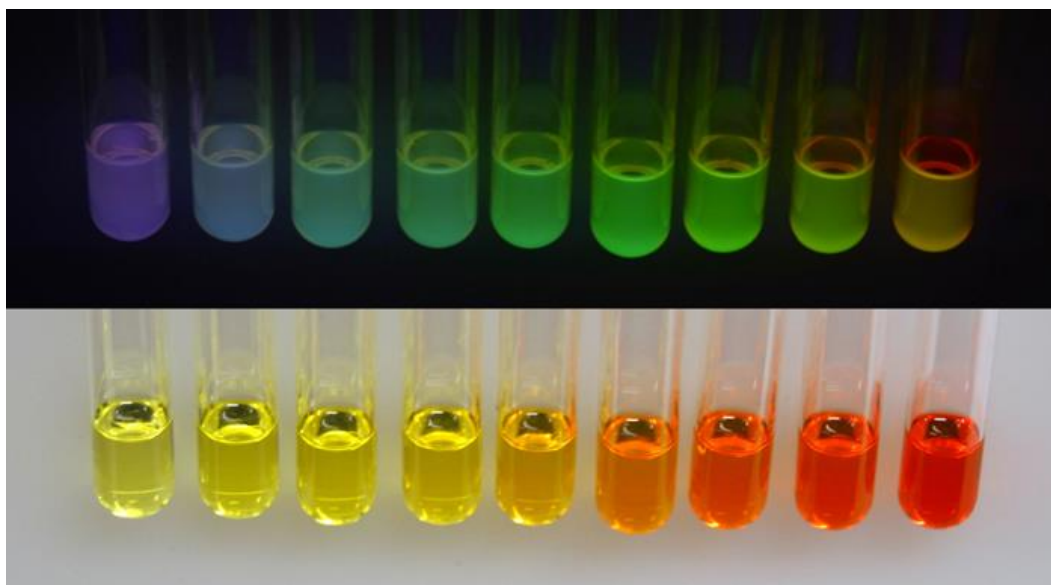
Agar nanozarrachaning diametric yorug'likning to'liq uzunligidankichik bo'lsa,

Nuqtaviy dipol modelida yutilish koeffitsiyenti.

$$\alpha = 3V \left[\frac{\epsilon_p / \epsilon_m - 1}{\epsilon_p' / \epsilon_m + 2} \right]$$

Sferik zarrachalar uchun yuza plazmonlarning optimal chastotasi

$$\omega_{sp} = \sqrt{3}\omega_p$$

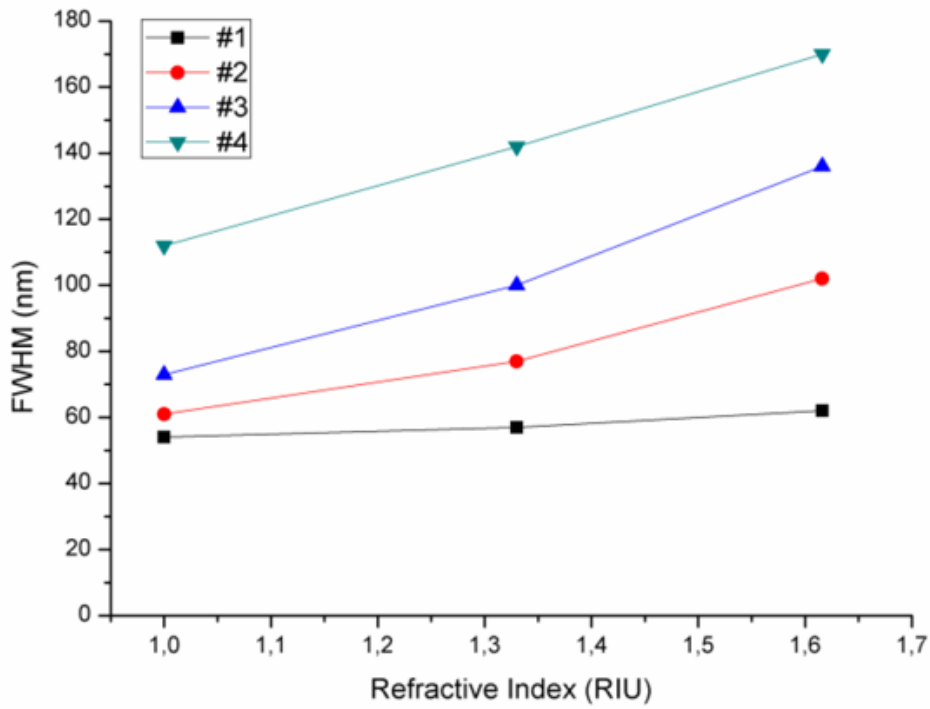


7.7-rasm. CdSenanozarrachalariborsuspenziyadafotolyuminessensiya:

Tepadagi qator– uzun to’lqinli ultrabinafsha nur bilan yoritilganda;

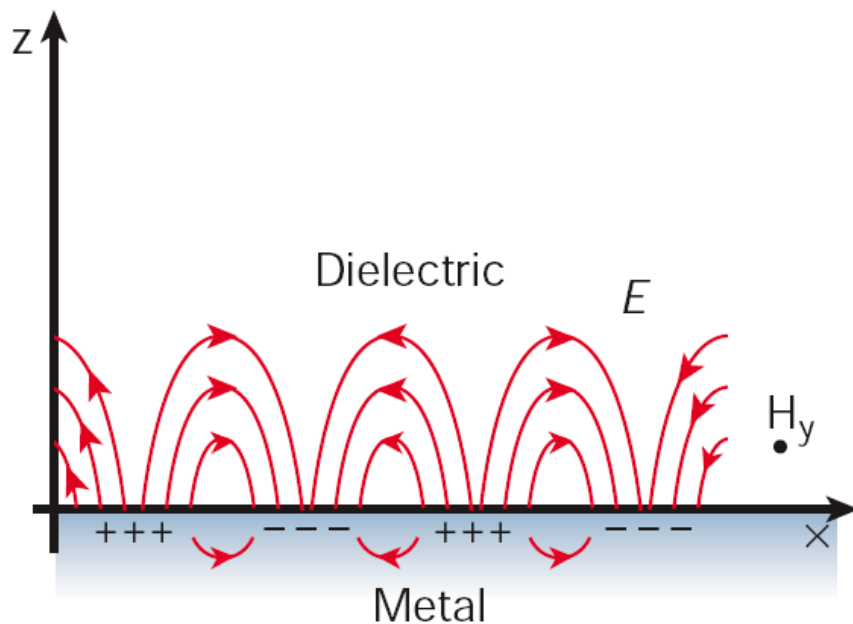
Pastki qator – odatdagi yorug’lik bilan yoritilganda. Nanozarrachalarning o’lchamlari chapdan o’ngga ortib boradi

Fizika va ximiyada yuza plazmon rezonansi.

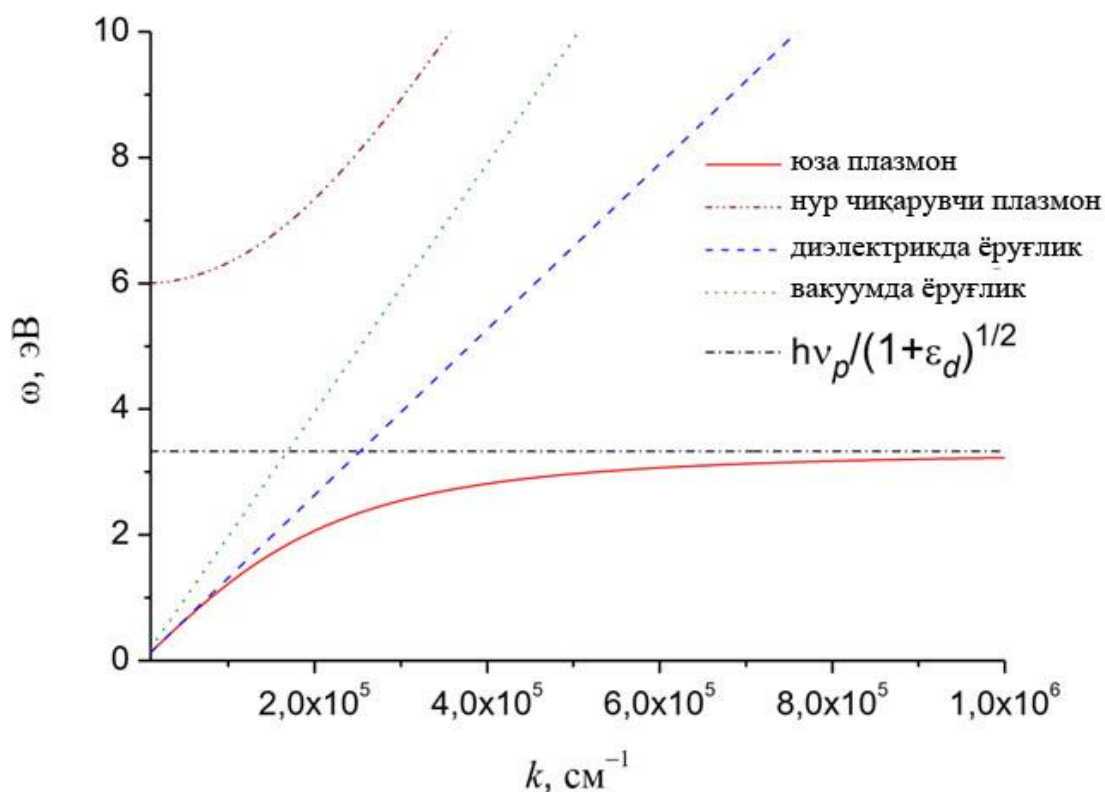


7.7-rasm.

Turliqalinlikdagito'rtaqatlamdayutilishspektricho'qqisiningyarimbalandlikdagikengligi (FWHM). Oltinnanozarrachalariniqalinligi 7.5 nm, 12.5 nm, 15 nm va 30 nm qilib purkaldi. Havoda ($n = 1$), suvda ($n = 1.33$) va moyda ($n = 1.616$)

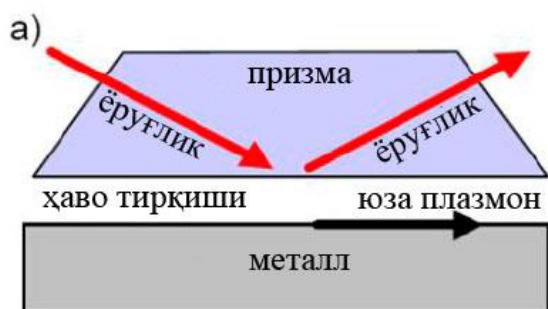


7.8-rasm. Metall va dielektrik chegarasida yuza plazmonning elektromagnit maydoni



7.9-rasm. Yuza plazmonlar uchun dispersiya chiziqlari

- taqiqlangan zona. $\omega_p > \omega > \omega_p / \sqrt{1 + \epsilon_d}$



Otto konfiguratsiyasi



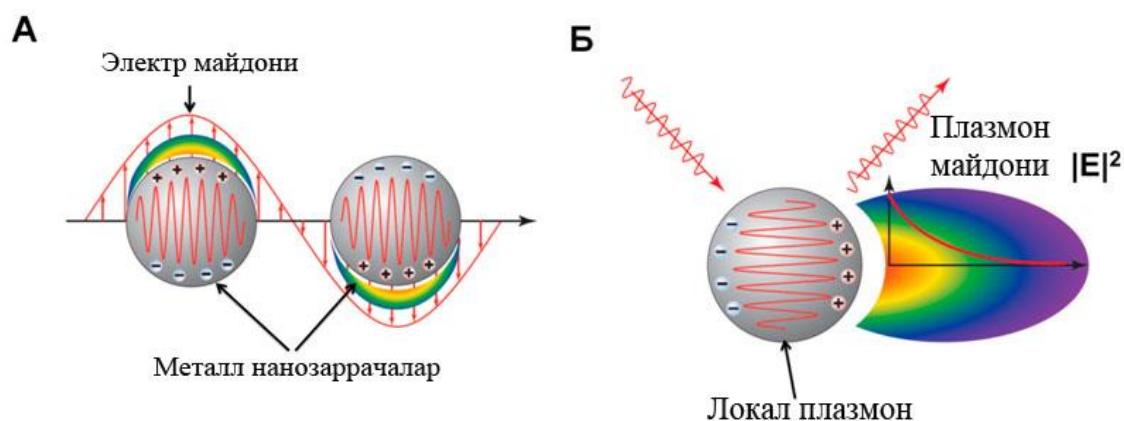
Kerchmann konfiguratsiyasi

7.10-rasm. Yuza plazmonlarni qo'zg'atish usullari

Generatsiya jarayonida fazasinxronizmi sharti bajarilishi lozim— impulsning saqlanish qonunining to'liq analogi.

Lokallashgan plazmonlar. LYupR ni elektr maydoni orqali qo'zg'atish (A) va qo'zg'atilgan plazmonli nanozarracha atrofida maydon intensivligining taqsimlanishi (B). LYupR ni qo'zg'atish uchun hech qanday qo'shimcha moslamalar kerak emas. Nanozarracha atrofidagi muhitning xossalari o'zgarishi elektron tebranishlarining rezonans chastotasini va nanozarrachalar eritmasi orqali o'tayotgan yorug'lik

spektridagi ekstinsiya (yutilish) cho'qqisini o'zgartiradi. Busiljishnanozarrachalaryuzasidakomplekslarhosilbo'lishinikuzatishdaishlatiladi.



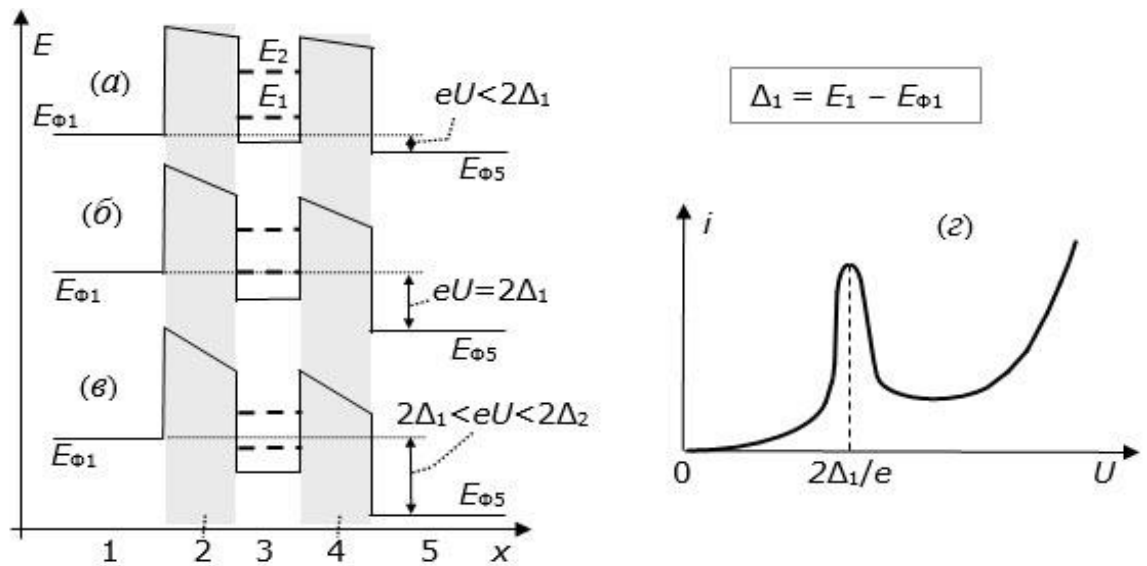
7.11-rasm. Metall nanozarrachalar atrofida local plazmonlar qo'zg'atilishi

Fizika va ximiyada yuza plazmon rezonansi.

Yuza plazmon rezonansi – makromolekulalarning bog'lanish doimiysini aniqlash usuli. Oltin nanozarrachalarining yuzasidagi elektronlar ma'lum bir to'lqin uzunligidagi nur bilan yoritilganda bunga javoban jamoa bo'lib tebranishadi. Oqibat qaytgan nurning spektrida qo'zg'atuvchi nurga xos bo'lmagan cho'qqilar paydo bo'ladi. Agar nanozarrachaning sirtiga yorug'likni yutuvchi oqsil biriktirilgan bo'lsa, va uning chastotasi plazmon rezonansi chastotasi bilan ustma ust tushsa (qisman), sochilish spektridagi cho'qqida oqsil yutadigan hududda o'pirilish paydo bo'ladi. YupR (SPR) usuli nanozarrachaning va oqsil biriktirilgan nanozarrachaning sochilish spektrlarini taqqoslashga asoslangan. Bu hodisa, metall qatlam sathida paydo bo'lgach, eritma ichiga tarqaladi va masofa boylab eksponensial so'nadi. Molekulalarning o'zaro ta'siri so'nuvchi to'lqinni o'zgartiradi, oqibatda yuza plazmonning xossalari o'zgaradi. Bu o'zgarishlar rezonans burchagining va yuza qatlamda sindirish ko'rsatkichining o'zgarishi sifatida namoyon bo'ladi. Sindirish ko'rsatkichining o'zgarishiga qarab biomolekulalarning o'zaro ta'siri haqidahukm yuritiladi. Bu usul reaksiyaning real vaqtda davomida kuzatishimkonini beradi.

Qo'shaloq potensial to'siq. Rezonans tunnellanish.

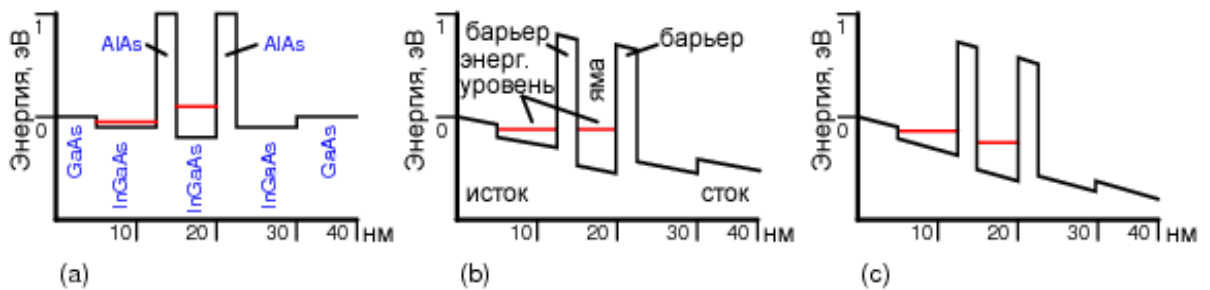
Muhim: to'siqlar orasidagi kvant o'rada energiya sathlari diskret!



7.12-rasm. Chapda – kvanto’lchamli markaziy hududi (kvanto’ra) borqo’shaloqtunnel to’siqning energetik diagrammasi: a) $eU < 2\Delta_1$ bo’lganda; b) $eU = 2\Delta_1$ bo’lganda; v) $2\Delta_1 < eU < 2\Delta_2$ bo’lganda; g) shunday tizimning VAXi.

Rezonans-tunnel diodi

Tor (kengligi 5-10 nm) kvanto’ra (InGaAs)GaAs qatlam bilan ajratilgan kigetero o’tishorasi paydo bo’ladi. Unda faqat bitt a energetik sath bo’lib, urezonans energetik sathide bataladi.



7.13-rasm. (InGaAs)GaAs dan yasalgan rezonans-tunnel diodining energetik diagrammasi. (a) – boshlang’ich holat; (b) rezonans kuchlanishi berilgan; (c) – kuchlanish oshgan

Rezonans tunnel diod (RTD):

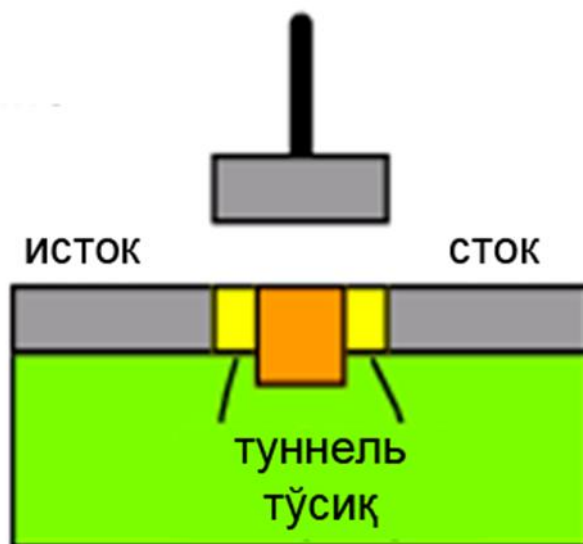
- (a) Kuchlanish berilmaganda istok va kvanto’raning energetik sathlari mos kelmaydi, o’tkazuvchanlik yo’q.
- (b) Ozgina kuchlanish berilganda energetik sathlari mos keladi (rezonans) va o’tkazuvchanlik paydo bo’ladi.
- (c) Kuchlanishning yanada oshishi energetik sathlari mosligini buzadi va o’tkazuvchanlik kamayadi.

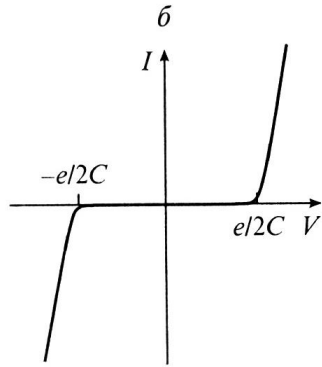
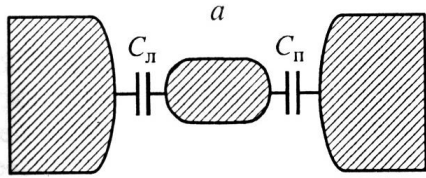
Rezonans tunnel diodlari 712 GGs chastotada ishlay oladi!
GaAsningtaqiqlanganzonasiningkenligi 1,4 eV, AlAs niki 2,2 eV.

7.3. Birelektronlitransistorlar

Zaryad cheksiz bo'laklanishi mumkin emas va to'siq orqali elektronning zaryadiga karrali diskret ulushlarda o'tadi. Agar kvant nuqtaning o'lchami, vademak, sig'imi $S = S_1 + S_p$ (S_1 va S_p – chap va o'ng tunnel o'tishlarining sig'imi) yetarlicha kichik bo'lsa, elektronning nuqtaga o'tkazilishi yoki undan olib ketilishi elektrostatik energiyani $ye^2/2S$ ga o'zgartiradi.

Tunnel tizimdagi kuchlanish V_{kam} bo'lganda tok o'tmaydi va u faqat kuchlanish absolyut qiymati boyicha $ye/2C$ danoshgandapaydobo'ladi. Boshqachaqilibaytganda, kamkuchlanishlardatunnelkontaktning voltamperxarakteristikasianchanochiziqlibo'ladi.



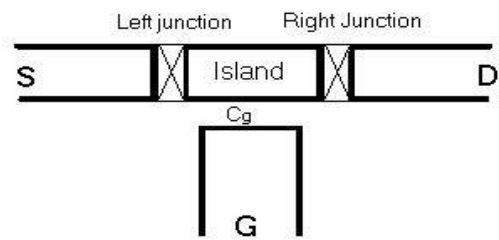
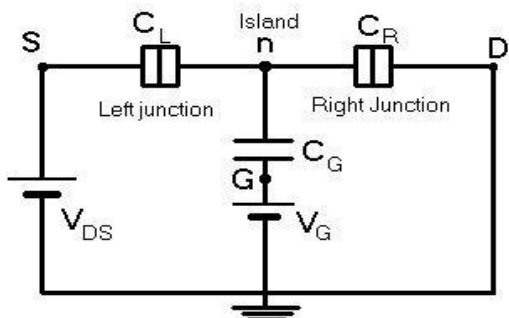


7.14-rasm. Kulon blokadası.

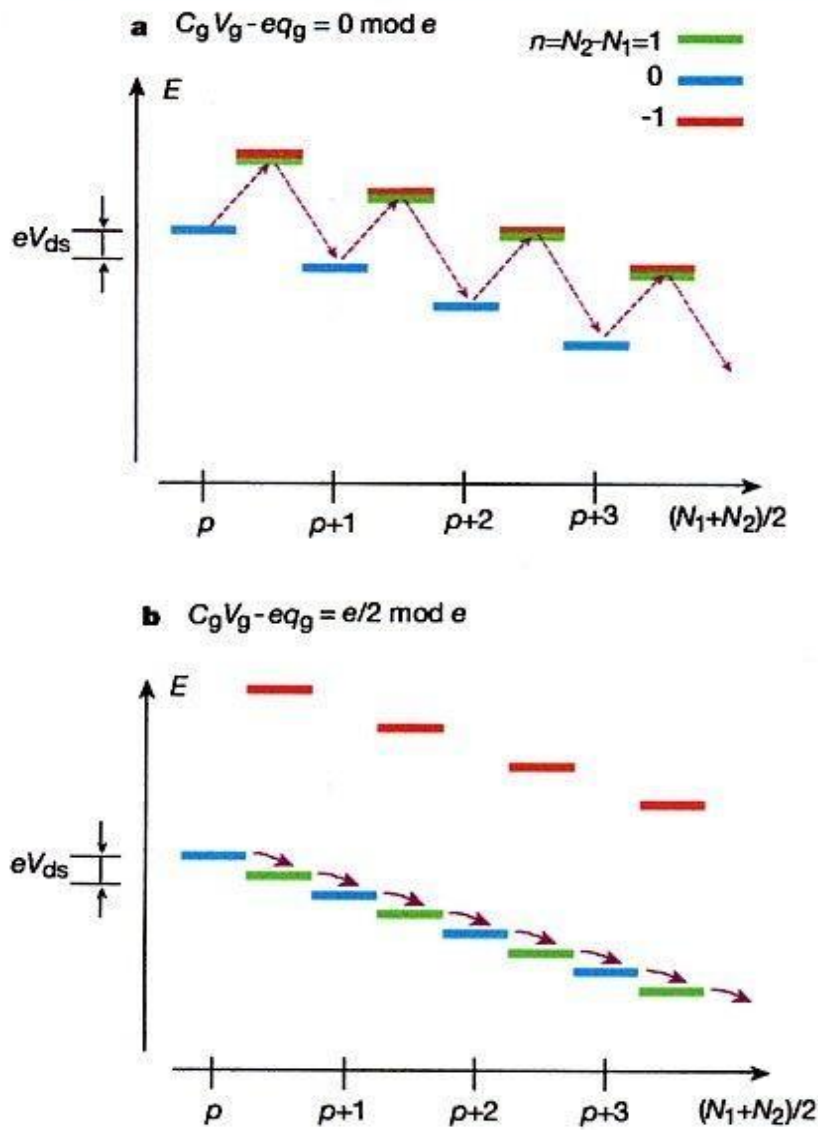
7.15-rasm.

Kulon blokadası tizimi

Bir elektronli tranzistor: Bir jufto'tkazgichlar, o'tao'tkazgichlar yoki yarimo'tkazgichlar kvant nuqtasiga o'xshash kichkina o'tkazuvchan orolchani qurshab olgan ikkita tunnel to'sig'i (dielektrik) bilan ajratilgan bo'lsa, yakka zaryadlar (o'tao'tkazuvchan materiallarda – Kuper juftlari) oqimi zatvordagi kuchlanish orqali boshqarilishi mumkin. Bunday bir elektronli tranzistor rasmda ifodalanganiga o'xshaydi. Zatvordagi musbat kuchlanishni oshirish elektronning «orolcha» ga tunnelanishiga imkon beradi. Agar bu «orolcha» lozim darajada kichik bo'lsa, past sig'im tufayli nuqtaviy potensial hatto bittagina elektron sababli ancha o'zgarishi mumkin. Mavjud elektronning zaryadi ta'sirida ko'p elektronlar «orolcha» ga tunnelanish imkondan mahrum bo'ladi. Bu hodisa «Kulon blokadası» deb tanilgan. «Orolcha» ga tunnellenagan elektron keyin stokka tunnellenishi mumkin.



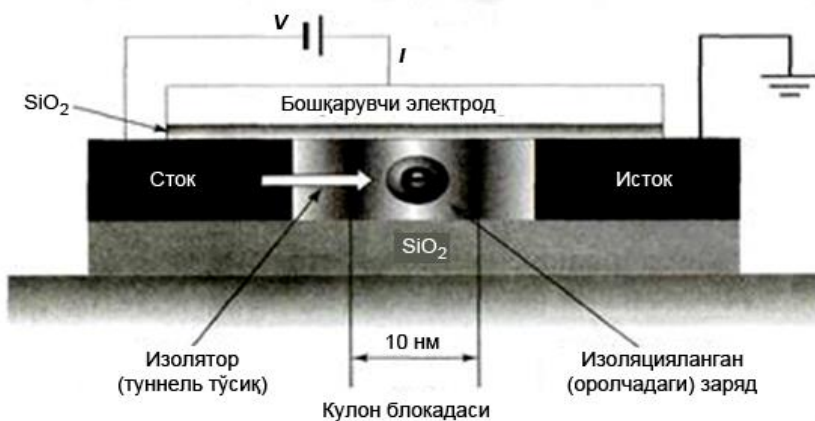
7.16-rasm: Chapda: bitta elektronli tranzistorning sxematik tuzilishi. O'ngda: bitta elektronli tranzistorning "yadrosi" ning tasviri



7.17-rasm: Bir elektronli tranzistor uchun a) yopiq holatida va b) o'tkazuvchanlik holatida Kulon blokadasining grafik tasviri. Zaryadi $e(2N+1)/2$ ga teng bo'lsa, bu erda N butun son bo'lsa, tranzistor o'tkazuvchan holatda bo'ladi. Agar zaryadi e ning butun qiymatlariga teng bo'lsa, Kulon blokadasini faol bo'ladi va o'tkazuvchanlik bo'lmaydi. Rasmda N_1 va N_2 ulanishlar orqali tunnel o'tgan elektronlar sonini bildiradi va p butun sonidir.

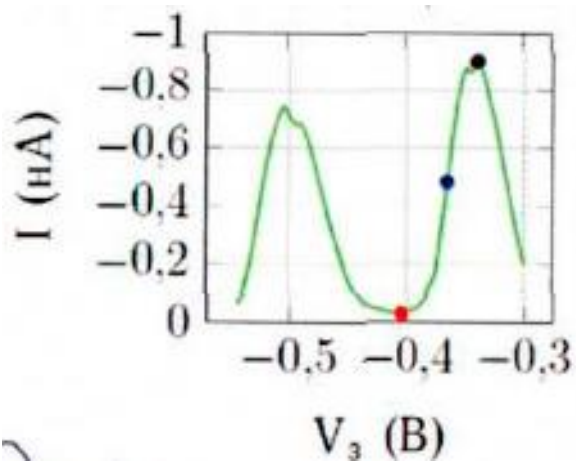
Бир электронли транзисторнинг ишлаш принципи

«Кулон блокадаси» дан фойдаланиб айрим электроннинг ҳаракатини бошқариш



Кулон блокадаси

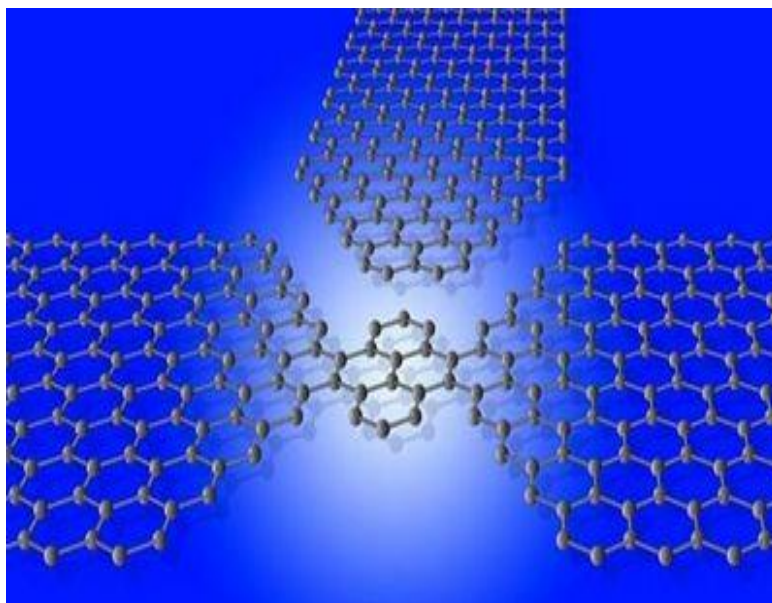
Туннель эффекти орқали яқка электронни бошқариш электр потенциалининг жуда кам ўзгаришини талаб қилади



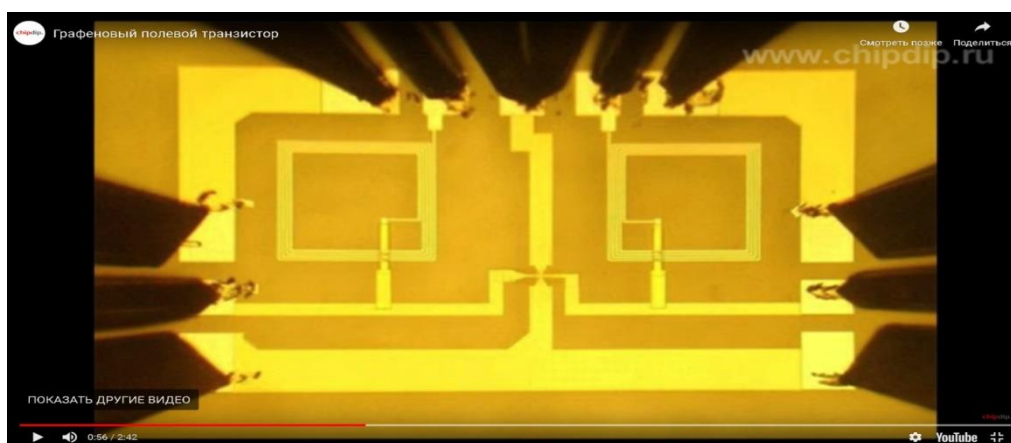
7.18-rasm. Bir elektronli kremniy tranzistor va uning VAXi. $V_{si} = -2$ mV, $T = 15$ mK.
 Tepada – tuzilishi, pastda chapda – electron mikroskopda ko'rinishi

Grafenorolchani o'lchami 100 nmdankattabo'lsa, bunday asbob Kulon blokada si effektini namoyon etib, birelektronli transistor sifatida ishlaydi. O'lchamlari 100 nmdankichik bo'lsa, cho'qqilar (VAXdagi) judan odaviy bo'lib, kvant effektlarining hissasini ko'rsatadi.

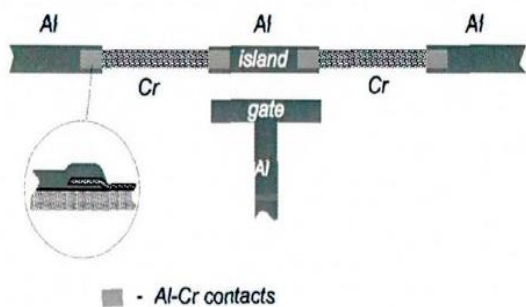
Tutashgan qismining kengligi 2 nm gacha kamayganda ham asbob yuqori o'tkazuvchanligini saqlab qoladi. Hozir chatadqiqotchilarsa kiztak kremniy tranzistor o'rniga uchta grafentranzistoriasida istisnoli «YokI» sxemasini tayyorlay olishdi, bu esa mikro sxema kristalida anchakam joy egallash imkonini beradi. Yanashuni siqiziqarliki, grafentranzistorlar 400 GG dani yuqori oqchastotalarda ishlaydigan mumkin.



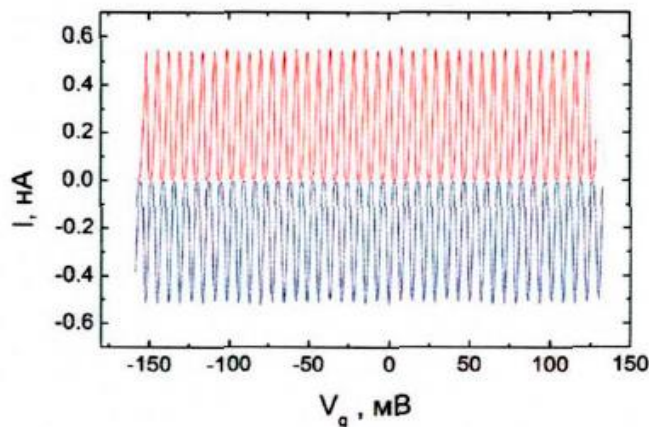
7.19-rasm. Grafentranzistor



7.20-rasm. Grafen maydon tranzistori



Ekspperimental tizimlar 200 nm



Al_2O_3 buferqatlamibo'lgankremniytaglikdatayyorlandi. Tranzistor tizimi Al orolchasi ($100 \times 1000 \text{ nm}^2$), zatvor va qalinligi 6-8 nm va kvadratining qarshiligi $R_{kv} = 4 \text{ kOm}$ bo'lgan ikki Cr tasmadan ($100 \times 1000 \text{ nm}^2$) iborat bo'ldi (7.21-rasm). Namunaning to'la asimptotik qarshiligi R 110 kOm ga yaqin bo'ldi.

7.21-rasm. Metalltranzistor tuzilishi va uning VAXi

Ikkiquatlamlitunneltranzistori

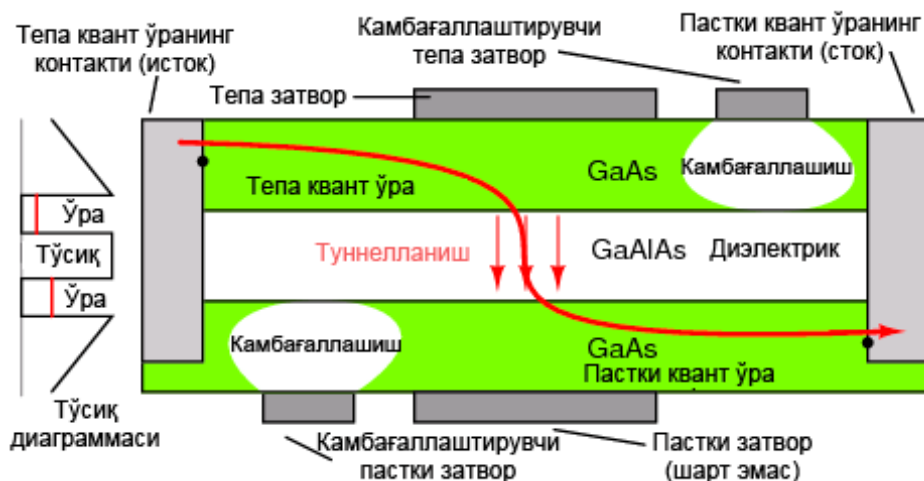
Ikkiquatlamlitunneltranzistori:

DELTT,

ikkiquatlamlitunneltranzistorisifatidahamma'lumbo'lgan, dielektrikdanyokitaqiqlanganzonasikengyarimo'tkazgichbilanajratilganikkitaotkazuvchanpotensialo'ralardantayyorlangan.

O'ralarshunchalikiyupqa-ki,

elektronlarikkio'lchamligazhosilqiladivaularningenergiyasikondalangyo'nalishdakvantlanganbo'ladi.



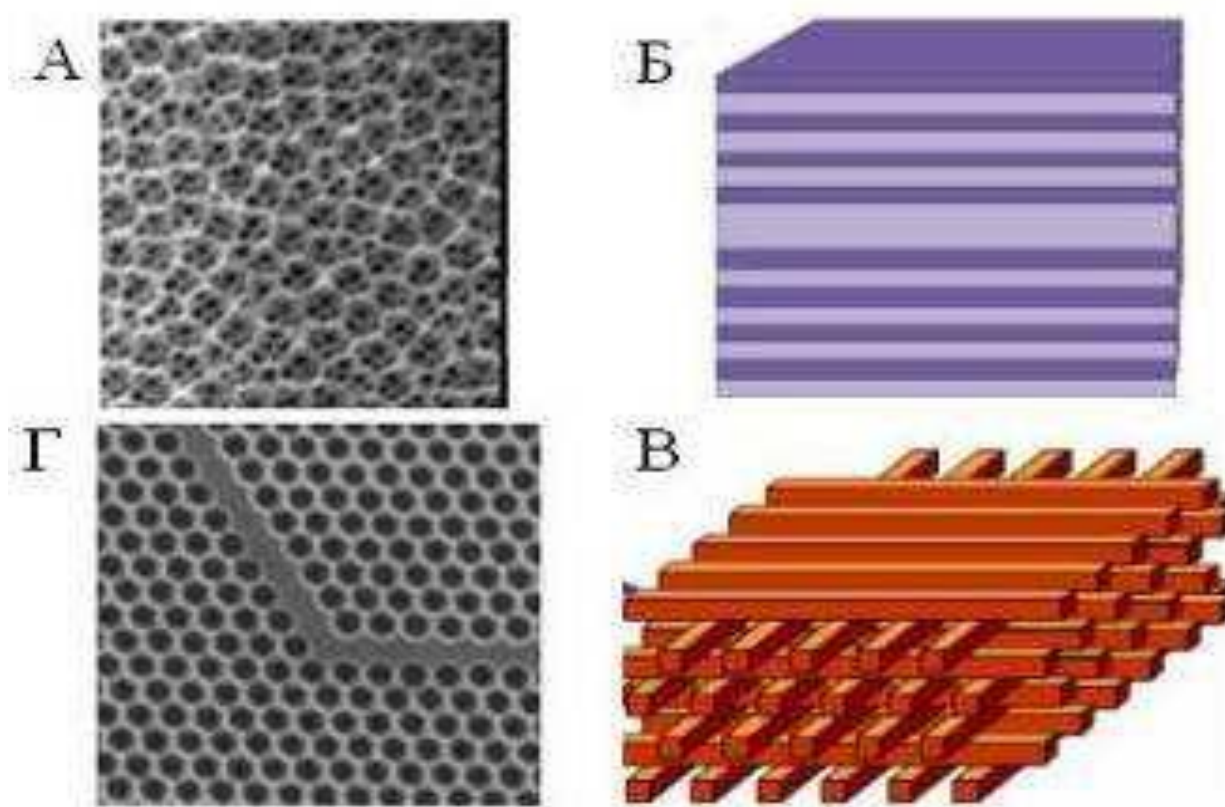
7.22-rasm. Ikki qatlamli tunnel tranzistorining tuzilishi

Agarzatvordagikuchlanishtunnellanishuchunzarurqiymatlardanoshsa, kvanto'ralardagi energetic sathlarmoskelmayqoladivatunnellanishto'xtayboshlaydi,

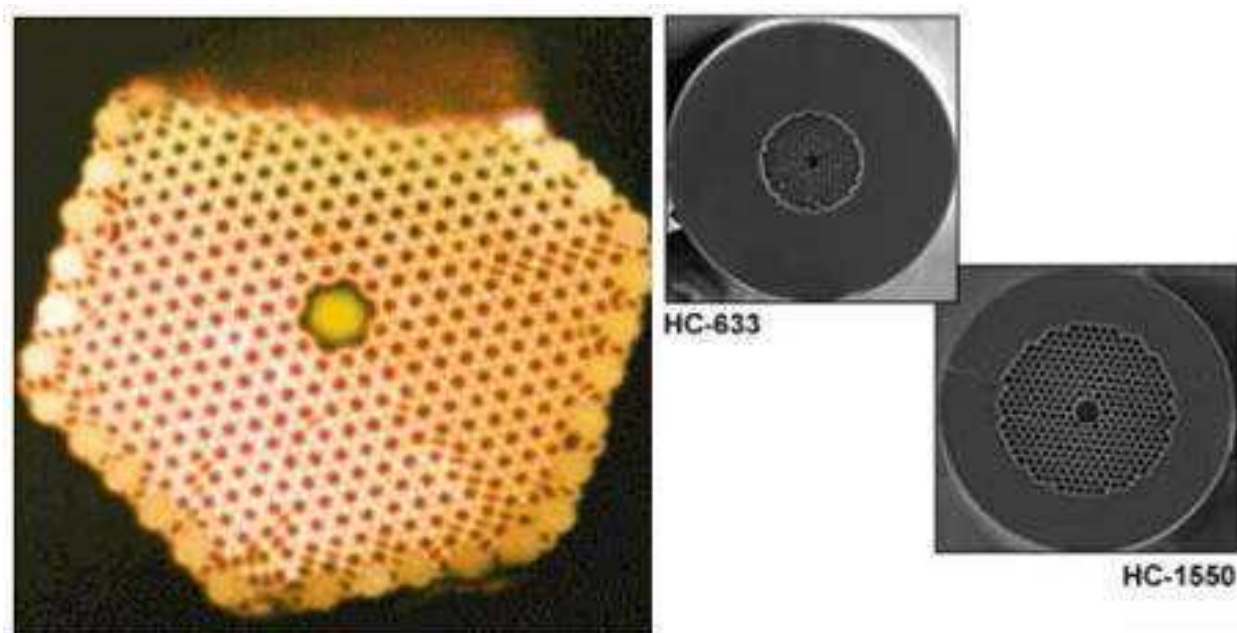
istokdan stokka o'tayotgan tok kamayadi.

Shunday qilib, zatvorkuchlanishining nuldandan boshlab oshishi oldiniga «yopiq», keyin «ochiq» vayana «yopiq» holatlarini beradi. Buning uchun DELTT tranzistorini komplementar (o'zaro to'ldiruvchi) CMOS tranzistorlar juftiga o'xshatib ulashimkin beradi, ammo bunda *p-in-tur* dagi har xil tranzistorlarga hojat qolmaydi. Tok manbasining kuchlanishi 100 mV atrofida. Eksperimental DELTT tranzistorlari 4,2K, 77K va 0°C temperaturalarda ishladi.

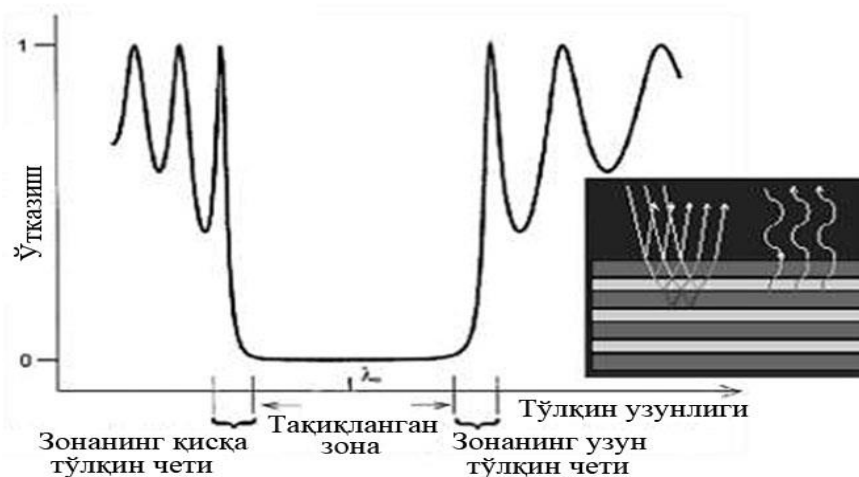
7.4. Nanotexnologiya va nanofotonika elementlari. Foton kristallarning tuzilishi va xossalari.



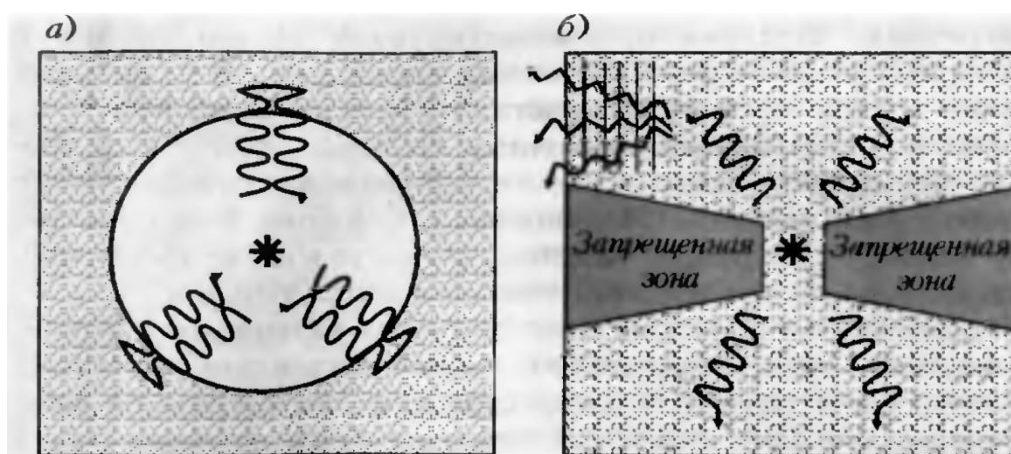
7.23-rasm. Betartib nanostruktura (A), bir o'lchamli (B), ikki o'lchamli (B) va uch o'lchamli (Γ) foton kristallar.



7.24-rasm. Havo o'zakli foton-kristall tolalar (ThorLabsfirmasi)



7.25-rasm. Bir o'lchamli foton tizimi va uning o'tkazuvchanlik spektri



7.26-rasm. To'la (a) va qisman (b) taqiqlangan zonali foton kristalda

joylashgan nuqtasimon yorug'lik manbaidan chiqqan nurning
tarqalishi (sxematiktarzda)

Adabiyotlar

1. Osnovinanofiziki. Metodicheskiye ukazaniya k prakticheskim zanyatiyampodissipline«Vvedeniyevnanofiziku»dlyastudentovdnevnoyformiobucheniY. SostaviteliS. G. Moiseyev, S. V. Vinogradov. Ulyanovsk, 2010
2. T.A.Vartanyan.OsnovifizikimetallicheskixnanostrukturUchebnoyeposobiye,Sankt-Peterburg, 2013
3. V.V.SlepsovKursleksiy«Fiziko–ximicheskiyeosnovinanotexnologiy»Izd. MATI-RGTUim.K.E. Siolkovskogo,2013
4. ParfenovV.V.Kvantovo-razmerniyestrukturivelektronike:optoelektronika. Kazan, 2007
5. N.G.Guseyn-zade,K.A. Zvezdin,M.Y. Romanovskiy,Kursleksiyfizikenanostruktur,Uchebnoyeposobiye.Izd. «Moskovskiygosudarstvenniytexnicheskiiuniversitetradiotexniki,elektronikiiavtomatiki»MGTUMIREA, Moskva, 2012.
6. L.Novotniy,B.Xext.Osnovinanooptiki.PerevodsangliyskogoMoskva, Fizmatlit,2009
7. A.I. Mamikin,A.A.RassadinaVvedeniyevfizikunanorazmernixstruktur. Moskva, 2016 g.
8. I.P.SuzdalevNanotexnologiy.Fiziko-ximiyananoklasterov,nanostruktur i nanomaterialov. - Moskva, KomKniga, 2006. -592 s.
9. N. Ashcroft, N. MerminFizika tverdogotela, tom-1, Moskva, Mir,1979
10. A.G.Gurevichfizikatverdogotela,Uchebnoye posobiye dlyavuzov.FTIim.A.F. Ioffe RAN). S. Peterburg.2004.-320 s.
11. V.A.Kulbachinskiy.Dvumerniye,odnomerniyeinulmerniyestrukturiisverxreshetki.Izd.fizicheskogofakultetaMGUim.M.V.Lomonosova,1998
12. Kvantoviyerazmerniyeeffektivpoluprovodnikovixipolumetallicheskixplenkax.B. L.Tavger,V.Y.Demixovskiyuspexifizicheskix nauk,1968g. Sentabr. Tom96, vip. 1
13. V.M.Pudalov.Perexodimetall-dielektrik:novayafizikastarogoyavleniY. Priroda,1999, №1, s 11-22
14. M. Ribalkina.Nanotexnologiidlya vsech, Moskva,2005. 440 s
15. Y. Altman. Voyenniye nanotexnologii.Moskva:Texnosfera, 2006,424 s
16. I. Prigojin, I. Stengers. Vremya,xaos, kvant. URSE, Moskva, 2003
17. Pul–ML.F.Ouens.Nanotexnologii(2-izdaniye).Moskva:Texnosfera,2006
18. FosterNanotexnologii,nauka,innovatsiiivozmojnostiMoskva:Texnosfera, 2008-352 s
19. Y.I.Golovin.Nanomirbezformul. Moskva. Binom,2012. - 513 s
20. K.Muqimov.Mittibunyodkorlaryoxudnanotexnologiyalarnima?Maktabkutubxonasi. Toshkent:"Kamalak" 2017 , -143 s

IV. AMALIY MASHG'ULOTLAR MAZMUNI

1-amaliy mashg'ulot. Energodispersion va rentgenofluoressent spektrometrlar yordamida nanostrukturaning elementar tarkibini aniqlash (2 soat).

Energodispersion spektrometrning tuzilishi va ishlashi.

Rentgenofluoressent spektrometrning tuzilishi va ishlashi.

2-amaliy mashg'ulot. Transmission va skanlovchi elektron mikroskoplarining tuzilishi va ishlash prinsipi, namuna tayyorlash usullari (2 soat).

3-amaliy mashg'ulot. Skanlovchi tunnel mikroskopi va atom kuch mikroskopining tuzilishi va ishlash prinsipi (2 soat).

4-amaliy mashg'ulot. Optik va o'ta yuqori chastotali yaqin maydon skanlovchi mikroskopi orqali nanoobektlarni kuzatish. Nanostrukturalarning, jumladan foton kristallarning optik xususiyatlarini o'rganish usullari (2 soat).

5-amaliy mashg'ulot. Rentgen diffraktometrini tuzilishi va ishlash prinsipi va uning yordamida namunaning kristall tuzilishini aniqlash (2 soat).

6-amaliy mashg'ulot. Nanolitografiya usullari. Nanotexnologiyalardan foydalanib yangi tipdagi quyosh elementlarini yig'ish va ularning xususiyatlarini laboratoriya sharoitida aniqlash usullari (2 soat).

Amaliy mashg'ulotlarni tashkil etish bo'yicha ko'rsatma va tavsiyalar

Amaliy mashg'ulotlarda tinglovchilar o'quv modullari doirasidagi ijodiy topshiriqlar, keyslar, o'quv loyihalari, texnologik jarayonlar bilan bog'liq vaziyatli masalalar asosida amaliy ishlarni bajaradilar.

Amaliy mashg'ulotlar zamonaviy ta'lim uslublari va innovasion texnologiyalarga asoslangan holda o'tkaziladi. Bundan tashqari, mustaqil holda o'quv va ilmiy adabiyotlardan, elektron resurslardan, tarqatma materiallardan foydalanish tavsiya etiladi.

O'QITISH SHAKLLARI

Mazkur modul bo'yicha quyidagi o'qitish shakllaridan foydalaniladi:

- ma'ruzalar, amaliy mashg'ulotlar (ma'lumotlar va texnologiyalarni anglab olish, aqliy qiziqishni rivojlantirish, nazariy bilimlarni mustahkamlash);
- davra suhbatlari (ko'rilayotgan loyiha yechimlari bo'yicha taklif berish qobiliyatini oshirish, eshitish, idrok qilish va mantiqiy xulosalar chiqarish);
- bahs va munozaralar (loyihalar yechimi bo'yicha dalillar va asosli argumentlarni taqdim qilish, eshitish va muammolar yechimini topish qobiliyatini rivojlantirish).

V. GLOSSARIY

O‘zbekcha termin	Inglizcha termin	O‘zbek tilidagi sharhi
Geografik qobiq (landshaft qobig‘i)	Geographical environment	Yerning litosfera, gidrosfera, atmosferalar tutashib va bir-biriga ta’sir etib hosil qilgan bir butun qobig‘i, inson yashaydigan va faoliyat ko‘rsatadigan muhit.
Gidrosfera	Hydrosphere	(yunoncha <i>gidro</i> - suv, <i>sfera</i> - shar) - Yer sharining okean va dengizlar, daryo va ko‘llar, qor va muzliklar, atmosferadagi suvlar va yer osti suvlaridan iborat suv qobig‘i.
Biogeografiya	Biogeography	tirik organizmlar (o‘simlik, hayvonlar, zamburug‘lar, mikroorganizmlar) jamoasi va ular komponentlari (tur, urug‘, oila va b.) ning Yer yuzida tarqalishi qonuniyatlarini o‘rganuvchi fan.

Landshaft	Landscape	<p>(nemischa <i>land</i> - yer va <i>shaft</i> - manzara) - tabiiy komplekslarni umumlashtiruvchi tushuncha:</p> <p>geologik zamini, relyefi, iqlimi, tuproqlari, o‘simlik turkumi, hayvonot dunyosi, yer osti va yer usti suvlari rejimining bir xilligi bilan ajralib</p>
------------------	------------------	---

		turadigan va tabiiy chegaralarga ega bo'lgan hudud.
Landshaft komponentlari	Component a landscape	har bir joydagi tog' jinslari, relyef, iqlim, yer usti va yer osti suvlari, o'simliklar, hayvonot dunyosi, tuproqlar.
Landshaft qobig'i	Landscape cover	- geografik qobiqning litosfera (Yer po'sti) gidrosfera (suv qobig'i) va troposfera bevosita tutashib turgan nisbatan yupqa markaziy qismi. L. q. hozirgi nurash po'stini, tuproq-o'simlik qoplamini, barcha tirik organizmlarni va havoning yerga tutashib turgan quyi qismini o'z ichiga oladi.
Metod	Method	(yun. metodos - bilish yoki tadqiqot yo'li, nazariya, ta'limot) -voqelikni amaliy va nazariy egallash, o'zlashtirish, o'rganish, bilish uchun yo'l-yo'riqlar, usullar majmuasi, falsafiy bilimlarni yaratish va asoslash usuli.

Geografiya	Geography	Yerning geografik qobig‘i, uning struktura va dinamikasi, alohida komponentlarini hududlar bo‘yicha o‘zaro ta’siri va
		taqsimlanishini o‘rganadigan fanlar majmui.
Geofizika	Geophysics	Yerning ichki tuzilishini, geografik qobiqlarda (atmosfera, gidrosfera, Yer po‘sti, mantiya, Yer yadrosida) ro‘y beradigan jarayonlarni o‘rganuvchi fanlar turkumi.

<p>Tabiiy geografiya</p>	<p>Physical geography</p>	<p>1) geografik qobiq tabiatini o‘rganuvchi fan. Yer haqidagi fanlardan biri. Geografik qobiqning moddiy tarkibi, tuzilishi, rivojlanishi, o‘zgarishi, hududiy bo‘linishini o‘rganadi; 2) tabiiy geografik fanlar sistemasn. Bu sistemaga umumiy yer bilimi, hududiy tabiiy geografiya, landshaftshunoslik, geomorfologiya, iq-limshunoslik, okeanografiya, muzshunoslik, muzloqshunoslik, tuproqlar geografiyasi, bio geografiya, fenologiya va boshqa fanlar kiradi.</p>
<p>Tabiiy resurslar</p>	<p>Natural resources</p>	<p>inson xo‘jalik faoliyatida tabiatdan oladigan barcha boyliklar tabiiy resurslarga kiradi.</p>

Geoekologiya	Geocology	ekologiyaning yuqori bosqichdagi ekosistemalarni, (geosistemalarni) shu jumladan biosferani ham tadqiq etuvchi bo'limi. Geoekologiyani landshaft ekologiyasi, biogeotsenologiya deb ham yuritiladi.
Antropogen landshaft	Anthropogenous landscape	Inson faoliyati ta'sirida o'zgargan tabiiy landshaft
Atmosfera	Atmosphere	[yun. atmos – bug' va sphere – shar] – yer va boshqa fazoviy jismlarning gazsimon qobig'i. Yer yuzasida u asosan azot (78,08%), kislorod (20,95%), argon (0,93%) suv but (0,2–2,6%), karbonat angidrid gazidan (0,03%) tashkil toptan.
Geosfera	Geosphere	Yerni tashkil etgan konsentrik qobiqlar. Yerning ustidan markaziga tomon atmosfera, gidrosfera, Yer po'sti, mantiya, yadro geosferalari ajratiladi. Ichki va tashqi geosfera farq qilinadi. Tashqi geosfera atmosfera va gidrosfera, ichki geosfera Yer po'sti, mantiya va yadrodan iborat.

Kriosfera	Cryosphere	Yer yuzasining atmosfera, gidrosfera va litosfera o‘zaro tutashib turgan hamda muzlar bo‘lgan va muz hosil bo‘ladigan sovuq qobig‘i.
Xionosfera	Hionosfera	troposferaning qor va muz to‘planishi mumkin bo‘lgan qatlami. Shartli tushuncha, chunki troposferaning bu qatlamida qor to‘planishiga sharoit (iliq o‘lkalarda baland tog‘lar) mavjud bo‘lsagina to‘planadi. Xionosfera qutblar atrofida yer yuzasida pastda joylashgan.
Antropogen omillar	Anthropogenic factors	muhitning antropogen omillari - odam va uning xo‘jalik faoliyatining o‘simlik, hayvon va boshqa tabiat komponentlariga ta’siri bilan bog‘liq omillar guruhi.
Biotik omillar	Biotic factors	muhitning biotik omillari - bir yoki har xil turga mansub o‘simlik, hayvon va mikroorganizmlar hayot faoliyatining organizmlarga ta’siri majmui.

Nurash	Weathering	tog‘ jinslarining havo, suv, muz haroratining o‘zgarib turishi, organizmlar ta’sirida parchalanib uvoqlashishi hamda kimyoviy tarkibining o‘zgarishi jarayoni.
Tabiat	Nature	kishilarning moddiy va ma’naviy

		talablarini qondirish manbayi. Tabiat deganda ko‘pincha olamning, moddiy dunyoning bir qismi tushuniladi.
Geografik (atrof) muhit	Geographical environment	tabiatning odamni o‘rab olgan, inson jamiyati bilan bevosita o‘zaro ta’sir va aloqada bo‘lib turadigan, ya’ni Yerning odam hayoti bilan juda yaqindan bog‘langan qismi.
Aholi	Population	Yer yuzida yoki uning muayyan hududi, qit’a, mamlakat, tuman, shaharida istiqomat qiluvchi odam (inson) lar majmui.
Madaniy landshaft	Cultural landscape	muayyan maqsad bilan (biologik hosilni oshirish; rekreatsiya, aholi turar joylarini bunyod etish va h. k.) ilmiy asosda va insonlar manfaatini ko‘zlab oqilona o‘zgartirilgan landshaftlar.

VI. ADABIYOTLAR ROYXATI

I. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining asarlari

1. Mirziyoyev SH.M. Buyuk kelajagimizni mard va olijanob xalqimiz bilan birga quramiz. – T.: “O'zbekiston”, 2017. – 488 b.
2. Mirziyoyev SH.M. Milliy taraqqiyot yo'limizni qat'iyat bilan davom ettirib, yangi bosqichga ko'taramiz. 1-jild. – T.: “O'zbekiston”, 2017. – 592 b.
3. Mirziyoyev SH.M. Xalqimizning roziligi bizning faoliyatimizga berilgan eng oliy bahodir. 2-jild. T.: “O'zbekiston”, 2018. – 507 b.
4. Mirziyoyev SH.M. Niyati ulug' xalqning ishi ham ulug', hayoti yorug' va kelajagi farovon bo'ladi. 3-jild.– T.: “O'zbekiston”, 2019. – 400 b.
5. Mirziyoyev SH.M. Milliy tiklanishdan – milliy yuksalish sari. 4-jild.– T.: “O'zbekiston”, 2020. – 400 b.

II. Normativ-huquqiy hujjatlar

6. O'zbekiston Respublikasining Konstitusiyasi. – T.: O'zbekiston, 2018.
7. O'zbekiston Respublikasining 2020 yil 23 sentabrda qabul qilingan “Ta'lim to'g'risida”gi O'RQ-637-sonli Qonuni.
8. O'zbekiston Respublikasining “Korrupsiyaga qarshi kurashish to'g'risida”gi Qonuni.
9. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2015 yil 12 iyun “Oliy ta'lim muassasalarining rahbar va pedagog kadrlarini qayta tayyorlash va malakasini oshirish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida”gi PF-4732-sonli Farmoni.
10. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevral “O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish boyicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida”gi 4947-sonli Farmoni.
11. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 20 aprel "Oliy ta'lim tizimini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida”gi PQ-2909-sonli Qarori.
12. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2018 yil 5 iyun “Oliy ta'lim muassasalarida ta'lim sifatini oshirish va ularning mamlakatda amalga oshirilayotgan keng qamrovli islohotlarda faol ishtirokini ta'minlash boyicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida”gi PQ-3775-sonli Qarori.
13. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2018 yil 21 sentabr “2019-2021 yillarda O'zbekiston Respublikasini innovasion rivojlantirish strategiyasini tasdiqlash to'g'risida”gi PF-5544-sonli Farmoni.
14. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019 yil 27 may “O'zbekiston Respublikasida korrupsiyaga qarshi kurashish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida”gi PF-5729-son Farmoni.
15. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019 yil 17 iyun “2019-2023 yillarda Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitetida talab yuqori bo'lgan malakali kadrlar tayyorlash tizimini tubdan takomillashtirish va ilmiy

salohiyatini rivojlantiri chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-4358-sonli Qarori.

16. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019 yil 27 avgust "Oliy ta'lim muassasalari rahbar va pedagog kadrlarining uzluksiz malakasini oshirish tizimini joriy etish to'g'risida"gi PF-5789-sonli Farmoni.

17. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019 yil 8 oktabr "O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim tizimini 2030 yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi PF-5847-sonli Farmoni.

18. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020 yil 29 oktabrdagi "Ilm-fanni 2030 yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi PF-6097 – sonli Farmoni.

19. O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2019 yil 23 sentabr "Oliy ta'lim muassasalari rahbar va pedagog kadrlarining malakasini oshirish tizimini yanada takomillashtirish boyicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi 797-sonli Qarori.

20. O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2021 yil 23 sentabr "Oliy ta'lim muassasalari rahbar va pedagog kadrlarining malakasini oshirish tizimini yanada takomillashtirish boyicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi 797-sonli Qarori.

21. O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Maxkamasining «Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston milliy universitetining nanotexnologiya-larni rivojlantirish markazi faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida“ 2021 yil 12 oktabrdagi 640-son karori.

III. Maxsus adabiyotlar

22. Основы нанofiziki. Metodicheskiye ukazaniya k prakticheskim zanyatiyam po discipline «Vvedeniye v nanofiziku» dlya studentov dnevnoy formy obucheniya. Sostaviteli S. G. Moiseyev, S. V. Vinogradov. Ulyanovsk, 2010

23. T.A. Vartanyan. Основы fiziki metallicheskih nanostruktur Uchebnoye posobiye, Sankt-Peterburg, 2013

24. Slepsov V. V. Kurs leksiy «Fiziko–ximicheskiye osnovy nanotexnologiy» izd. MATI-RGTU im. K.E. Siolkovskogo, 2013

25. Parfenov V.V. Kvantovo-razmernyye struktury v elektronike: optoelektronika. Kazan, 2007

26. N.G. Guseyn-zade, K.A. Zvezdin, M.Y. Romanovskiy, Kurs leksiy po fizike nanostruktur, Uchebnoye posobiye. Izd.«Moskovskiy gosudarstvennyy texnicheskiy universitet radiotexniki, elektroniki i avtomatiki» MGTU MIREA, Moskva, 2012.

27. L. Novotnyy, B. Xext. Основы nanooptiki. Perevod s angliyskogo Moskva, Fizmatlit, 2009

28. Мамыкин А. I., Rassadina А. А. Vvedeniye v fiziku nanorazmernykh struktur. Moskva, 2016 g.

29. I.P. Suzdalev Nanotexnologiya. Fiziko-ximiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov. - Moskva, KomKniga, 2006 . -592 s.

30. N. Ashcroft, N. Mermin Fizika tverdogo tela, tom-1, Moskva, Mir, 1979
31. A.G. Gurevich Fizika tverdogo tela, Uchebnoye posobiye dlya vuzov. FTI im. A.F. Ioffe RAN). S. Peterburg. 2004.-320 s.
32. V.A. Kulbachinskiy. Dvumernyye, odnomernyye i nulmernyye struktury i sverxreshetki. Izd. fizicheskogo fakulteta MGU im. M.V. Lomonosova, 1998
33. Dieter Vollath Nanoparticles-Nanocomposites-Nanomaterials. An introduction for beginners. – Wiley-VCH VerlagGmbH&Co.KGaA, Boschstr. Weinheim, Germany, 2013. – P. 322.
34. English for Specific Purposes. All Oxford editions. 2010, 204.
35. Harvey Gould, Jan Tobochnik, Wolfgang Christian. “An introduction to computer simulation methods. Applications to Physical Systems”. Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley, 2007.
36. <http://phet.colorado.edu>
37. Isabel Gedgrave ”Modern Teaching of Physics”. 2009
38. S.M. Lindsay, Introduction to nanoscience, Oxford University Press, 2010
39. Steve Taylor “Destination” Vocabulary and grammar”, Macmillan 2010.
40. Thomas Hanemann. Polymer-Nanoparticle composites: From Synthesis to Modern Applications. – Materials, 2010. – P.50.
41. Vittorio Degiorio, Ilaria Cristiani / Photonics. A short course / Springer International Publishing Switzerland 2014.
42. William D. Callister Jr. Materials Sciences and Engineering. An Introduction. John Wiley & Sons. Ins. 2010. – P. 1000.
43. Asekretov O.K., Borisov B.A., Bugakova N.Y. i dr. Sovremennyye obrazovatelnyye tekhnologii: pedagogika i psixologiya: monografiya. – Novosibirsk: Izdatelstvo SRNS, 2015. – 318 s. <http://science.vvsu.ru/files/5040BC65-273B-44BB-98C4-CB5092BE4460.pdf>
44. Belogurov A.Y. Modernizatsiya prosessa podgotovki pedagoga v kontekste innovatsionnogo razvitiya obshchestva: Monografiya. — M.: MAKS Press, 2016. — 116 s. ISBN 978-5-317-05412-0.
45. Gulobod Qudratulloh qizi, R. Ishmuhamedov, M. Normuhamedova. An’anaviy va noan’anaviy ta’lim. – Samarqand: “Imom Buxoriy xalqaro ilmiy-tadqiqot markazi” nashriyoti, 2019. 312 b.
46. Djorayev M., Fizika o’qitish metodikasi. Guliston davlat universiteti. Guliston , 2017. – 256 b.
47. Ibraymov A.Ye. Masofaviy o’qitishning didaktik tizimi. Metodik qo’llanma / tuzuvchi. A.Ye. Ibraymov. – Toshkent: “Lesson press”, 2020. 112 bet.
48. Ignatova N. Y. Obrazovaniye v sifrovuyu epoxu: monografiya. M-vo obrazovaniya i nauki RF. – Nijniy Tagil: NTI (filial) UrFU, 2017. – 128 s. http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/54216/1/978-5-9544-0083-0_2017.pdf
49. Ishmuhamedov R.J., M.Mirsoliyeva. O’quv jarayonida innovatsion ta’lim texnologiyalari. – T.: «Fan va texnologiya», 2014. 60 b.
50. Muslimov N.A va boshqalar. Innovatsion ta’lim texnologiyalari. O’quv-metodik qo’llanma. – T.: “Sano-standart”, 2015. – 208 b.

51. Noxara X. Reforma gosudarstvennykh universitetov i nauchnykh issledovaniy v Yaponii. // Ekonomika obrazovaniy. – 2008. – № 3. – S. 77–82

52. Oliy ta'lim tizimini raqamli avlodga moslashtirish konsepsiyasi. Yevropa Ittifoqi Erasmus+ dasturining ko'magida. https://hiedtec.ecs.uniruse.bg/pimages/34/3_UZBEKISTAN-CONCEPT-UZ.pdf

53. S.G. Moiseyev, S.V. Vinogradov. Osnovy nanofiziki. Ulyanovsk, 2010.

54. Usmonov B.SH., Habibullayev R.A. Oliy o'quv yurtlarida o'quv jarayonini kredit-modul tizimida tashkil qilish. O'quv qo'llanma. T.: "Tafakkur" nashriyoti, 2020 y. 120 bet.

55. Щербак Ye.N. Zarubejnyye obrasyy sistema upravleniya vysshim obrazovaniyem (na primere obrazovatelnykh standartov Fransii i SSHA) // Obrazovaniye i pravo. – 2012. – № 9 (37). – S.79-87

IV. Internet saytlar

56. <http://edu.uz> – O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi

57. <http://lex.uz> – O'zbekiston Respublikasi Qonun hujjatlari ma'lumotlari milliy bazasi

58. <http://bimm.uz> – Oliy ta'lim tizimi pedagog va rahbar kadrlarini qayta tayyorlash va ularning malakasini oshirishni tashkil etish bosh ilmiy-metodik markazi

59. <http://ziyonet.uz> – Ta'lim portali ZiyonET

60. <http://www.nobelprizes.com/>

61. <http://www.wittenborg.eu>

62. <http://www.physics.ox.ac.uk>

63. <http://www.phy.cam.ac.uk>

64. <http://www.physics.uni-heidelberg.de>

65. www.cultinfo./fulltext/1/008/077/561/htm

66. <http://www.unibo.it>

67. <http://www.iau-aiu.net/>

68. <https://en.wikipedia.org/wiki/>

69. <http://www.aca-secretariat.be/>

70. <https://ui.adsabs.harvard.edu/>

71. <https://arxiv.org/>