

1-79
MIRZO ULUG'BEK NOMIDAGI
O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI



SH.B.UTAMURADOVA, O.X.QO'LDASHOV

MIKROELEKTRONIKA VA NANOELEKTRONIKA

621
U-79

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY TA'LIM,
FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI
MIRZO ULUG'BEK NOMIDAGI
O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

MIRZO ULUG'BEK NOMIDAGI
O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI
HUZURIDAGI YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASI VA
MIKROELEKTRONIKA ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI

Sh.B.Utamuradova, O.X.Qo'ldashov

**MIKROELEKTRONIKA VA
NANOELEKTRONIKA**

70530906- "Mikroelektronika" magistratura mutaxassisligida ta'lim
olayotgan magistrlar uchun

O'QUV QO'LLANMA



Toshkent
"Fidokor Yosh Avlod"
2023

UDK: 53:621.315.592(075)

KBK: 22.379m7

B 13

Sh.B.Utamuradova, O.X.Qo'ldashov. Mikroelektronika va nanoelektronika. o'quv qo'llanma. – T.: “Fidokor Yosh Avlod”, 2023. 176 bet.

O'quv qo'llanmada mikroelektronika va nanoelektronikaning fizik asoslari, tavsiflari, tasniflari va ularni fizik, texnologik jarayonlarni o'rganishda amaliy qo'llash pripsiplari va mikroelektronika va nanoelektronika element bazasi, ulardan foydalanish yo'llari bayon etilgan.

O'quv qo'llanma magistratura bosqichining 70530906 - Mikroelektronika mutaxassisligi magistrantlari uchun mo'ljallangan.

UDK: 53:621.315.592(075)

KBK: 22.379m7

B 13

Taqrizchilar

B.E.Egamberdiyev - f.m.-f.d, prof.

B.N. Raximov - t.f.d, prof

M.Sh. Isayev - f.m.-f.n, dots

O'quv qo'llanmaga Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti Kengashining 2023-yil 31-mart 8-son qaroriga asosan nashr qilishga ruxsat berilgan (O'quv qo'llanmani nashr ruxsatnomasi № 75).

ISBN: 978-9943-7727-4-8

© “Fidokor Yosh Avlod” nashriyoti, Toshkent 2023 yil.

O'zMU

AXBOROT-RESURS
MARKAZI

2025/3
4

ANNOTATSIYA

O'quv qo'llanmada mikroelektronika va nanoelektronikaning fizik asoslari, tavsiflari, tasniflari va ularning fizik, texnologik jarayonlarni o'rganishda amaliy qo'llash prinsiplari va mikroelektronika va nanoelektronika element bazasi, ulardan foydalanish yo'llari bayon etilgan.

O'quv qo'llanma magistratura bosqichining 70530906 - Mikroelektronika mutaxassisligi magistrantlari uchun mo'ljallangan hamda mikroelektronika va nanoelektronika bo'yicha ilmiy-tadqiqot ishlari olib borayotgan doktorantlar va ilmiy xodimlarga uslubiy ko'rsatma sifatida foydalanishga ham tavsiya etiladi.

Аннотация

В учебном пособии описаны физические основы, принципы, микроэлектроники и наноэлектроники необходимые для изучения физико-технологических процессов и элементной базы микроэлектроники и наноэлектроники.

Учебное пособие предназначено для магистров обучающихся по специальности - 70530906 "Микроэлектроника", а также рекомендуется для использования в качестве методического пособия докторантам и научным сотрудникам, проводящим исследования в области микроэлектроники и наноэлектроники.

Annotation

The manual describes the physical foundations, principles, microelectronics and nanoelectronics necessary for the study of physical and technological processes and the element base of microelectronics and nanoelectronics.

The manual is intended for master students in the specialty - 70530906 "Microelectronics", and is also recommended for use as a methodological manual for doctoral students and researchers conducting research in the field of microelectronics and nanoelectronics.

MUNDARIJA

KIRISH	6
I. BOB. MIKRODAN NANOELEKTRONIKAGACHA	
1.1. Mikrodan nanoelektronikagacha.....	7
1.2. Mikroelektronikaning asosiy tushuncha va ta'riflari.....	11
1.3. Nanotexnologiyaning ustuvor rivojlanish yo'nalishlari.....	22
II - BOB. MIKROELEKTRONIKA ASOSLARI	
2.1. Yarimo'tkazgichli diodlar ishlash jarayonlari va asosiy xarakteristikalar.....	26
2.2. Diodning xarakteristikalar.....	28
2.3. Yarimo'tkazgichli bipolyar tranzistorlar ishlash jarayonlari va asosiy xarakteristikalar.....	31
2.4. Yarimo'tkazgichli maydonli tranzistorlar ishlash jarayonlari va asosiy xarakteristikalar.....	35
2.5. MOP-tranzistor.....	38
2.6. Operatsion kuchaytirgich ishlash jarayonlari va asosiy xarakteristikalar.....	40
2.7. Operatsion kuchaytirgichlar asosidagi generatorlar ishlash jarayonlari va asosiy xarakteristikalar.....	43
III. BOB. RAQAMLI QURILMALARNING MANTIQIY ASOSLARI	
3.1. Analog va raqamli signallar.....	47
3.2. Sanoq tizimlari.....	49
3.3. Logik elementlar ishlash jarayonlari va asosiy xarakteristikalar.....	52
3.4. Kombinsion mantiqiy sxemalar.....	58
3.5. Summator.....	63
3.6. Komparator (taqqoslagich).....	67
3.7. Shifratlar va deshifratlar ishlash jarayonlari va asosiy xarakteristikalar.....	73
3.8. Triggerlar ishlash jarayonlari va asosiy xarakteristikalar.....	77
IV-BOB. NANOELEKTRONIKA ASOSLARI	
4.1. Mikrodan nanoelektronikagacha.....	91
4.2. Yarimo'tkazgichli nanostrukturalar.....	94
4.3. Geteroo'tuychanlik. Nanoqatlamli geterost-rukturalar. Geterotranzistorlar.....	96

4.4.	Nanoelektron maydonli tranzistorlar.....	100
4.5.	Nanoelektronikaning ustuvor elementlari va jihozlari.....	101
4.6.	Nanoelektronikaning ekologik va iqtisodiy muammolari.....	103
4.7.	Mikroelektronika va nanoelektronikaning kelgusi rivojlanishi.....	106

V-BOB. VIRTUAL ELEKTRONIKA

5.1.	Yarimo'tkazgichli diodni tekshirish.....	114
5.2.	Kremniyli va germaniyli diodlarning volt-amper xarakteristikasini nuqtalar bo'yicha qurish.....	120
5.3.	Diodlar volt-amper xarakteristikalarining haroratga bog'liqligini tekshirish.....	127
5.4.	Bipolyar tranzistorlarni EWB dasturi yordamida tekshirish.....	133
5.5.	Maydonli tranzistorlarni EWB dasturida tekshirish.....	136
5.6.	Raqamli mikrosxemalarni EWB dasturida tekshirish.....	140
5.7.	Deshifratorni tekshirish.....	163
5.8.	Shifratorni tekshirish.....	165
	Glossariy.....	169
	Yarimo'tkazgichli qurilmalarning grafik belgilanishi.....	171
	Adabiyotlar.....	174

KIRISH

Mikroelektronika - bu elektronikaning zamonaviy yo'nalishi bo'lib, shu jumladan integral mikrosxemalar (IC) va ularga asoslangan elektron uskunalarni o'rganish, loyihalash va ishlab chiqarishdan iboratdir. Mikroelektronikaning asosiy vazifasi yuqori ishonchlilik va takrorlanuvchanlik, kam quvvat sarfi va yuqori funktsional murakkablikka ega mikrominiatura uskunalarini yaratishdir.

Fan va texnologiyadagi yutuqlar yagona texnologik tsiklda butun funktsional birliklarni ishlab chiqarishga imkon berdi, bu esa radio komponentlar va qurilmalarni mahsulot tarkibidan to'liq yoki qisman chiqarib tashlashga imkon beradi. Mikroelektronikaning eng muhim texnologik usullaridan biri bu integral texnologiya bo'lib, u bitta plastinkada bir-biriga bog'langan elementlarning guruhlarini yaratishga imkon beradi. Integral texnologiyadan foydalangan holda, yuqori samarali avtomatlashtirilgan qurilmalarda sxemalarni ishlab chiqarish mumkin, shu bilan birga parametrlarda bir xil funktsional tugunlarning katta qismini chiqarish mumkin.

Integral texnologiyadan foydalangan holda ishlab chiqarilgan funktsional tugunlar integral mikrosxemalar (IC) yoki oddiygina mikrosxemalar deyiladi.

Integral mikrosxemalarning diskret komponentlardagi o'xshash sxemalarga nisbatan asosiy afzalliklari kichik o'lchamlar hisoblanadi. Ularni ishlab chiqarishda yuqori samarali avtomatlashtirilgan uskunalaridan foydalanish tufayli kamroq xarajatlar talab etiladi, komponent parametrlarining o'ziga xosligi tufayli qo'l mehnatini sezilarli darajada kamaytirish va sxemalarning yaxshiroq xususiyatlarini olish mumkin. Payvandlangan bo'g'inlar sonini kamaytirish, texnologik operatsiyalarni avtomatlashtirish va bitta texnologik tsiklda ishlab chiqarilgan alohida elementlarning ishdan chiqish ehtimolini kamaytirish orqali ishonchlilik oshdi. Shuni ta'kidlash kerakki, mikroelektronika diskret komponentlarda tayyorlangan elektron tugunlarda bo'lgani kabi bir xil nazariy qoidalaridan foydalanadi. Biroq, uning rivojlanishi bilan individual funktsional birliklar va qurilmalarning elektron yechimiga yondashuv o'zgardi. Integratsiyalashgan texnologiya bilan faol komponentlar sonining sezilarli o'sishi mahsulot tannarxini sezilarli darajada o'zgartirmaydi. Shuning uchun ular qo'shimcha faol yoki passiv elementlarni kiritish orqali har qanday parametrlarni yaxshilash imkoniyatidan foydalaniladi.

Umuman olganda, o'quv qo'llanma keng miqyosdagi kitobxonlar, yarimo'tkazgichlar fizikasi mikroelektronika mutaxassisliklari uchun foydalidir.

I. BOB. MIKRODAN NANOELEKTRONIKAGACHA

1.1. Mikrodan nanoelektronikagacha

Elektronika sohasi rivojlanish taraqqiyoti mikroelektronika sohasini paydo bo'lishiga olib keldi va elementlar o'lchamlarining kichrayishi, mikronli o'lchamlarga o'tilishi bilan taraqqiy etib bordi, bu esa nanoelektronikaning shakllanishiga olib keldi. Nanoelektronika birgina o'lchamlarning kichrayishi, ya'ni mikron o'lchamlardan nanometrli, nanosekundli o'lchamlarga o'tishning o'zi bilan kifoyalanib qolmay, birinchi navbatda, elektronning kvant xususiyatlarini o'z ichiga oldi.

Nanotexnologiya tarixini ko'radigan bo'lsak, u yerda hali hayot paydo bo'lmagan avval ham mavjud bo'lgan. Tabiatdagi juda ko'p xodisalarda nanostrukturalar qatnashadi, masalan kosmik fazoda, havoda va suvda turli tarkibdagi va tuzilishdagi nanozarrachalar mavjuddir.

Yerda hayotning paydo bo'lishi, tabiat tomonidan bu hayotni ta'minlash va rivojlantirish uchun nanostrukturalarni maqsadga muvofik biosintezlashni o'zlashtirishining birinchi bosqichi hisoblanadi. Ma'lumki, ixtiyoriy biologik xujayra o'zida nanomasshtabdagi membranalar (5-10 nm), oqsillar (66 nm), DNK (diametri 2 nm) kabi elementlarga ega ekanligi tufayli xujayra mavjuddir.

Bizga ma'lumki yarimo'tkazgich materiallar dastavval o'tgan asrning 30-yillaridan boshlab muntazam o'rganila boshlandi, jumladan 1948-yili amerikalik olimlar Dj Bardin va U. Bratteyn tranzistorni ixtiro qildilar va u bipolyar tranzistor nomini oldi. 1949-yili U.Shokli maydon tranzistori modelini taklif etdi. Bu triodning qattiq jismla analogi edi, ya'ni bu holda lampali triodda vakumda ro'y beradigan jarayonlar qattiq jism ichida ro'y beradi, uni unipolyar tranzistor deb nomlanadi. Shundan so'ng yangi turdagi yarimo'tkazgichli asboblari yaratila boshladi va ko'p sohalarda astasekinlik bilan lampali elektron asboblarni siqib chiqardi. Yarimo'tkazgichli asboblarning asosiy afzalliklari - ularning mustahkamligi, o'lchamlarining kichikligi, yengilligi, kam energiya sarflashi, tannarxining arzonligi bo'ldi va yarimo'tkazgich asboblari texnologiyasi takomillashib bordi, yangi turdagi yarimo'tkazgich asboblari yaratildi, ularning o'lchamlari esa yanada kichrayib boraverdi. Shundan so'ng alohida yarimo'tkazgich asbobning o'rniga muayyan funksional vazifani bajara oladigan sxemani

yaxlit monokristalda yaratish usuli ishlab chiqildi.

Bular jumlasigi integral sxema (IS) kirib, natijada mikroelektronika va kompyuter texnologiyasi keskin rivojlandi, ularning eng so'ngi avlodlari yaratildi, raqamli televideniya vujudga keldi, mobil qo'l telefonlari paydo bo'ldi, ovoz, tasvir, axborotlar yozish, o'qish va saqlashning yangi usullari ishlab chiqildi. Shunday qilib, o'tgan asrning ikkinchi yarmidan boshlab mikroelektronika jadal sur'atlarda rivojlandi, hamda uning negizida nanoelektronika shakllana boshladi.

Mikroelektronikaning rivojlanish tarixi:

- 1785-yili elektrostatiikaning asosiy qonuni - Kulon qonuni kashf etildi.
- 1799-yili Italian fizigi A.Volta elektr batareyasini yaratdi.
- 1812-yilda X.Ersted elektr kuchlarining magnitga ta'siri g'oyasini olg'a surdi.
- 1820-yili A.Amper elektr toklarining o'zaro ta'sirini topdi.
- 1831-yili M.Faradey elektromagnit induksiya qonunini ochdi.
- 1865-yili J.K.Maksvell Faradeyning tajribalarini chuqur nazariy tahlil qilib, o'zining mashxur tenglamalari asosida klassik elektrodinamikani yaratdi.
- 1897-yili Ingliz fizigi Dj.Tomson tomonidan elektron kashf etildi.
- 1895-yilda A.S.Popov tomonidan simsiz telegraf - radio ixtiro qilindi.
- 1906-yili L.de Forest tomonidan birinchi aktiv elektron asbob - triod lampasi yaratildi.
- 1948-yili Dj.Bardin, V.Bratteyn va V.Shoklilar bipolyar tranzistorni kashf etishdi.
- 1969-yili integral mikrosxemalar (IMS) asosida qurilma va tizimlar yaratildi.

Nanoelektronikaning rivojlanish tarixi:

- 1803-yilda Jon Dalton tomonidan zamonaviy atomistik nazariyaning asoslari ta'riflab berildi.
- 1840-yil Y.Ya.Bertseliusning ishlari atomli- molekulyar nazariyaga kuchli turtki berdi.
- XVIII-XIX asrlarda olimlar Uejvud, Devi, Dager, Neps, Tolbot, Archer, Kennet, Maksvellarning faoliyati bilan bog'liq holda fotografiya va fotografiya materiallarining texnologiyasi rivojlanadi.

- 1857-yilda M.Faradey shishalarning kolloidli ranglanish mexanizmini tushuntirishga harakat qiladi.
- 1905-yilda Shveytsariyalik fizik Al'bert Eynshteyn shakar molekulasining o'lchami 1 nm atrofida bo'lishini isbotladi.
- 1908-yilda Gustav Mi metallning turli tabiatli va shaklli zarrachalari tomonidan shishani ranglashining nazariyasini yaratdi.
- 1928-yilda G.A.Gamov tomonidan tunnel effekti kashf etildi.
- 1928-yilda nemis olimlari Maks Knoll va Ernst Ruska elektron mikroskopni yaratdilar.
- 1932-yilda Gollandiyalik professor Frits Sernike fazali- kontrastli mikroskop kashf etdi.
- 1939-yilda Simens kompaniyasi, unda Ruska ishlardi, ajratish kobiliyati 10 nm bo'lgan elektron mikroskopli kommertsiya maqsadida ishlab chiqdi.
- 1956-yilda Uxlir nanogovakli kremliyni kashf etdi.
- 1959-yilda R.Feynman fizikaning fundamental qonunlari alohi-da atomlardan "konstruktsiyalar" yaratishni ta'qiqlamasligini ko'rsatdi.
- 29-dekabr 1959-yil nanotexnologiyalarning tug'ilgan kuni hisoblanadi.
- 1975-yilda kvantli iplar va kvantli nuqtalarning mavjud bo'lish mumkinligi nazariy jihatdan o'rganildi.
- 1977-yilda Amerikalik student Dreksler tomonidan molekulyar zanjirlardan foydali obyektlarning gipotetik yig'ilishini anglatadigan "nanotexnologiya" so'zi ishlatildi.
- 1978-yilda German klasterlarni tavsiflash uchun "jele" modelini ishlab chiqdi.
- 1982-yilda - IBM kompaniyasining avstriya filiali xodim-lari Gerd Binning va Genrix Rorerlar skanirlovchi tunnelli mikroskopni yaratdilar.
- 1983-yilda V.N.Lapova va L.I.Trusovalar nanokristalli nikel olishdi.
- 1985-yilda Xarold Kroto, Robert Kyorl va Rixard Smeli fullerenlarni kashf etdilar.
- 1986-yilda AQSH lik fizik A.Eshkin lazerli pintset - suyuq muhitlarda fokuslangan lazer nuri yordamida mikro va nanoobyektlar ustida manipulyatsiyalash qurilmasini yaratdi.

- 1987-yilda T.A.Fulton va G.J.Dolanlar bir elektronli tranzistorni birinchi bo'lib yaratdilar.

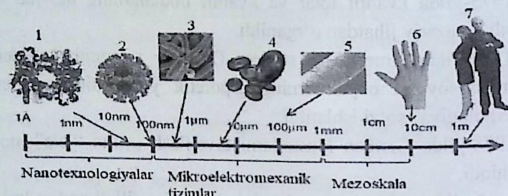
- 1987-1988-yillarda - P.N.Luskinovich nanozarrachalarni zond uchidan yo'nalishli termik desorbtitsiyasini amalga oshirilgan nanotexnologik qurilma yaratdi.

- 1990-yilda "Nanotexnologiya" jurnalining birinchi soni xorijda chop etildi.

- 1998-yilda nanoquvurlar asosida dastlabki maydonli tranzistorlar yaratildi.

Agar o'lchamlardan biri 100 nm dan kichik zarracha bo'lsa, unda bunday zarracha nanozarracha hisoblanadi. "Nano" so'zi "milliardga bir qism" degan ma'noni anglatadi. 1.1-jadvalda taqqoslash uchun turli xil o'lchamdagi obyektlarga misollar keltirilgan.

Yunon tilidan tarjima qilingan nano so'zi "mitti", fanda nano qo'shimchasi "milliardning bir qismi", ya'ni nanometr (nm) 10^{-9} m, nanosoniya (ns) esa 10^{-9} sekundga teng. Bir nanosekundda yorug'lik taxminan 30 santimetr masofani bosib o'tadi. 1-rasmda metrik tizimda o'lchov birliklarini nomlashda qo'llaniladigan ba'zi qo'shimchalar keltirilgan.



1-rasm. Metrik tizimda o'lchov birliklarini

Bu yerda:

- 1- Gemoglobin
- 2- OITS
- 3- Bakteriya
- 4- Qizil qon
- 5- Soch
- 6- Qo'l
- 7- Inson

Ba'zi obyektlarning o'lchamlari

№	Obyekt	Birlikning o'lchami (metrda)
1.	Uran yadrosi (diametri)	10^{-13}
2.	Suv molekulasi	10^{-10}
3.	DNK molekulasi (kengligi)	10^{-9}
4.	Protozoa (oddiy bir hujayrali organizmlar)	10^{-3}
5.	Yomg'ir tomchisi	10^{-2}
6.	Inson	2
7.	Everest (balandlik)	10^4
8.	Yer (diametri)	10^8
9.	Quyoshdan Plutongacha bo'lgan masofa	10^{13}

1.2. Mikroelektronikaning asosiy tushuncha va ta'riflari

Mikroelektronika - elektronikaning integratsiyalashgan guruh texnologiyasi asosida ishlab chiqarilgan eng kichik o'lchamlari va ishonchliligi yuqori bo'lgan elektron qurilmalarni ishlab chiqish, ishlab chiqarish va ulardan foydalanish bilan shug'ullanadigan bo'limidir.

Integral texnologiya - bitta texnologik jarayonda ko'proq mahsulot ishlab chiqarish texnikasi.

Texnologiyaning guruh usullari - ko'proq miqdordagi turli xil, ammo ma'lum xususiyatlarga ko'ra guruhlangan mahsulotlarni ishlab chiqarish uchun oz miqdordagi texnologik usullardan foydalanish.

Mikroelektronika odatda ikki qismga bo'linadi:

1. Integral elektronika;
2. Funktsional elektronika.

Integral elektronika bitta texnologik jarayonda bitta chipda ishlab chiqarilgan ko'p sonli tranzistorlarni (rezistorlar va boshqa elektron elementlar) o'z ichiga olgan integral sxemalarning ishlash printsipli va ishlab chiqarishi haqidagi ma'lumotlarni umumlashtiradi. Integral

elektronikada axborot tashuvchi elektr toki yoki elektr potentsialidir. Integral sxemalar kremniy kristallari yoki $A^{III}B^V$ birikmalariga (masalan, galliy arsenidi) asoslangan. Hozirgi vaqtda super-o'tkazgichlar yoki segnetoelektriklar asosida integral mikrosxemalar yaratish bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda. Biroq, bugungi kunda integral sxemalarning 90% dan ortig'i kremniy asosida ishlab chiqariladi. So'nggi paytlarda mikroelektronika tarmog'i yuqori chastotalarda signallarni qayta ishlashga yo'naltirishda jadal rivojlanmoqda.

Funktional elektronika katta hajmdagi ma'lumotlarni to'plash, saqlash va qayta ishlash mumkin bo'lgan faol vositaga asoslangan qurilmalarning ishlash printsiipi va ishlab chiqarishi haqidagi ma'lumotlarni umumlashtiradi.

Bugungi kunda integral mikrosxemalar 106 tagacha elementni o'z ichiga olishi mumkin. Yuqori darajadagi integratsiyaga ega bo'lgan bunday IC lar zamonaviy kompyuterlarning kichik o'lchamlari va yuqori ishlashini ta'minlaydi.

Integratsiyal sxema (mikrosxema) - ma'lum bir o'zgartirish qilish, signalni qayta ishlash, ma'lumot to'plash funksiyasini bajaradigan va elektr bilan bog'langan elementlarning (yoki elementlar va komponentlarning) yuqori zichligiga ega bo'lgan mikroelektron mahsulot sifatida ko'rib chiqiladi.

Element - mustaqil mahsulot sifatida ajratib bo'lmaydigan har qanday elektr radio elementining funksiyasini amalga oshiradigan integral mikrosxemaning bir qismi. Radio element deganda tranzistor, diod, rezistor, kondensator va boshqalar tushuniladi. Elementlar murakkabroq vazifalarni ham bajarishi mumkin, masalan, mantiqiy (mantiqiy elementlar) yoki axborotni saqlash (xotira elementlari).

Komponent - mustaqil mahsulot sifatida ajratilishi mumkin bo'lgan radio element funksiyasini amalga oshiradigan integral mikrosxemaning bir qismi.

Nanotexnologiyalar. Klassik mexanika moddiy zarralarning aniq chiziqlar, ya'ni trayektoriyalar bo'ylab harakat qilishini miqdoriy qonuniyatlar yordamida o'rganadi. Bunda zarraning boshlang'ich holatini ifodalovchi shartlar ma'lum bo'lsa, kelgusida uning qanday bo'lishi ham aniqlanadi. Oqibat, fanda chuqur iz qoldiradigan va olamning mexanik

manzarasini yaratishga (barcha hodisalarni mexanika qonunlari asosida tushuntirish) intilish paydo bo'ldi.

Olamni faqat mexanika qonunlari asosida butunlay tushuntirishning iloji yo'q. Shu bois, bunday qarashlar o'zini oqlamadi desak, xato bo'lmaydi. XIX asr oxiri XX asr boshlarida matematika sohasida erishilgan yutuqlar (differentsial hisob, Minkovski geometriyasi) tufayli mexanik qonunlarning yangi ko'rinishlari paydo bo'ldi. To'liq tenglamalarining otasi Ervin Shryodinger tomonidan yaratilgan mikrozarralarning harakat (Shryodinger) tenglamalari klassik tasavvurlarga sig'maydigan natijalarga olib keldi. Masalan, energiyaning kvantlanishi (klassik mexanikada esa energiya uzluksiz bo'ladi). O'sha davrda bu tenglamalar to'g'risida fikr yuritishga jazm qiladigan inson yo'q edi. Sababi, bunga ma'lum ma'noda «fandagi shakkoklik» deb ham qaralgan.

Kvant fizikasining asoschilaridan biri M.Plank 1879-yili Myunxenda dissertatsiyasini himoya qilgandan keyin ustoz Filip fon-Jolliga nazariy fizika bilan shug'ullanish niyati borligini aytadi. Ustoz esa o'z navbatida nazariy fizika poyoniga yetgani, faqat ba'zi xususiy hollar, boshlang'ich va chegaraviy shartlarni o'zgartirib differentsial tenglamalarning yechimini topish qolgani, umuman, bu «istiqbolsiz ish» bilan shug'ullanish befoydaligini uqtiradi.

Plank nazariy fizika bilan shug'ullanishni davom ettirib, 1900-yili elektromagnit nurlanishning diskret ekanligini kashf qildi. 1905-yilda Eynshteyn tomonidan elektromagnit maydonning energiyasi diskret strukturaga egaligi, undagi eng kichik zarra fotonni aniqlaydi, keyinchalik atomning kvant nazariyasi va kvant mexanikaga asos soladi. U davrda kvant mexanikasi tushunchalarining ilm ahli tomonidan qabul qilinishi juda qiyin kechdi. Boisi, birinchidan, kichik zarralarning kichik o'lchamlarda harakat traektoriyasi degan tushunchaning yo'qligi, ikkinchidan, Veyner Geyzenberg tomonidan kiritilgan noaniqlik printsiipi edi. Unga ko'ra, kichik o'lchamlarda zarrachaning impulsi va koordinatasi (energiya yoki vaqt) ni bir vaqtda katta aniqlikda o'lchab bo'lmaydi.

Nobel mukofotining laureati Richard Feynman tomonidan yaratilgan kvant mexanika borasida ko'pchilik bu murakkab formulalar to'plamidir, degan fikrda. Olim yetuk mutaxassis sifatida kvant mexanikasining yuksak

istiqbolini ko'ra bilgan. Uning ta'kidlashicha: «Insonlar kelgusida alohida atomlarni boshqarishni o'rganib olib, xohlagan narsalarini yaratishlari (sintez qilishlari) mumkin». Sohaning keyingi rivoji jism zarralari harakatini o'lchamning kvantlanishi masalalariga olib keldi. Bunda erkin zarraning harakatini biror-bir o'lcham yoki yo'nalish bo'yicha chegaralasak, ya'ni kvantlasak, natijada uning harakat qonunlari erkin zarranikidan butunlay farq qiladi. Kvantlashni davom ettirib, zarraning harakatini ikki o'lcham bo'yicha (bir o'lchamli tuzilmalar), so'ngra uni uchala o'lcham bo'yicha ham chegaralasak (nol o'lchamli tuzilmalar), butunlay yangi hodisalar va qonuniyatlar namoyon bo'lar ekan. Xususan, 1987-yili Xoll effektlarining kashf etilishi past o'lchamli tuzilmalarga qiziqishni kuchaytirdi. Ikki o'lchamli tuzilmalarda yorug'likning katta miqdorda sochilishi va yutilishi, yupqa pardalarda ulkan magnit qarshiliklar, uglerod asosidagi kvant o'lchamli yirik molekullar, fullerenlarning kashf etilishi va ularning amaliyotda ishlatilish istiqbollari - bu sohadagi izlanishlarga katta turtki berdi.

O'lchamli kvantlanishni yarim o'tkazgichlarda namoyon qilish yuqori texnologiyalar (molekulyar nurli epitaksiya) yordamida biror taglik ustida nafaqat kristolografik tuzilishi, balki kimyoviy tarkibi ham bir-biridan farq qiladigan o'ta yupqa qatlamlar o'stirish orqali amalga oshirildi. Bu sohadagi tadqiqot ishlari o'tgan asrning 70-yillaridan boshlandi. E'tiborlisi, asosan uchlangan birikmalar asosida $Al_x Ga_{1-x} As$ ikkilangan geteroo'tishlar hosil qilish ustida tadqiqotlar olib borildi va natijada 2003-yili nemis olimi Bimberg va rus olimi J.Alfyorov Nobel mukofotiga sazovor bo'lishdi. Hozir yarim o'tkazgichlardagi past o'lchamli strukturalar quyidagilarga bo'linadi:

- kvant nuqtalar (KN) - bu strukturalarning o'lchamlari mavjud uch yo'nalish bo'yicha qator atomlar orasidagi masofa tartibida bo'ladi (KNlarni ba'zan sun'iy atomlar deb ham atashadi). Masshtabiga bog'liq ravishda struktura nol o'lcham (0D) yoki uch o'lchamli (3D) hisoblanadi. Bu yerda D-dimension-o'lcham, massiv, o'lchov, kattalik, hajm so'zlarining birinchi harfi bo'lib, uning oldidagi raqam esa tuzilma geometrik o'lchami tartibini bildiradi;

- kvant simlar (KS) yoki kvant iplar (KI) - bunda strukturalar o'lchamlari ikki yo'nalish bo'yicha bir necha atomlar orasidagi masofaga

teng bo'ladi, uchinchi yo'nalish bo'ylab esa o'lcham makroskopik qiymatga ega bo'ladi (1D);

- kvant devorlar (KD), boshqacha aytganda, kvant chuqurliklar (KCh) -strukturalarning o'lchamlari bir yo'nalish bo'yicha qator atom oralig'idagi masofa tartibida bo'ladi, qolgan ikki yo'nalish bo'yicha esa o'lcham makroskopik qiymatga ega bo'ladi (2D).

O'lchami chegaralangan muhitda elektronlar holati va tashqi ta'sirlarga javobi quyidagicha kechishi mumkin. Faraz qiling, o'quvchi bola futbol maydonida turibdi. U uch o'lcham bo'yicha harakat qilishi, to'rt tarafa yugurishi va yuqoriga sakrashi mumkin. Demak, u X, Y, Z koordinata o'qlar bo'yicha erkin harakat qiladi. Bunga bolaning uchta erkinlik darajasi bor deyiladi. Yuqoriga harakat qilishi, sakrashini tepadan devor bilan chegaralasak, u faqat chor atrofga XOY koordinata tekisligida yugurishi mumkin. Bunda bolaning harakati ikki o'lchamli bo'ladi. Bolani ikki yon tomondan ham devorlar bilan to'sib, harakatni yana chegaralasak, u faqat oldinga harakat qila oladi. Agar harakati faqat bitta koordinata o'qi bilan belgilansa, u bir o'lchamli deyiladi. Bola harakati old va orqadan chegaralansa, u harakatlana olmaydi. Bu uning harakati nuqtadan iborat degani.

Yuqorida keltirilgan to'rt holatda bolaning tashqi ta'sirga beradigan javobini tasavvur qilib ko'ring. Birinchi holda u erkin, ikkinchisida sakrashga da'vat qilinsa-da, bunga imkoni yo'q, uchinchi vaziyatda esa faqat oldinga va orqaga harakat qila oladi. Tashqi da'vat uni yon tomonga undasa-da, buning iloji bo'lmaydi. To'rtinchi holatda harakati butunlay cheklangan, u faqat yetarli bo'lgan tashqi kuchlar ta'siridagina devorlardan oshishi mumkin, kuch yetarli bo'lmasa, o'z holatini o'zgartira olmaydi. Barcha holda ham bolaning tashqi ta'sir yoki da'vatlarga javobi turlicha, ba'zan esa g'ayritabiyy bo'lib, u o'z vaziyatidan kelib chiqib, javob beradi va hatto kutilmagan harakatlar qiladi. Elektron ham bolaga o'xshab o'zini yuqorida tasvirlanganidek tutadi.

Chegaralangan tuzilmalarda zarracha yoki elektron energiyasini o'z holatidan kelib chiqib o'zgartiradi, potentsial to'siq (devor) larni yengish uchun yetarlicha energiya berilsagina oshib o'tadi, aks holda, energiya qancha katta bo'lmasin, natija kuzatilmaydi. Oqibatda elektron energiyasining uzluksiz ortishiga imkon bermay, sakrab, faqat ma'lum

miqdorda o'zgarishiga olib keladi, fan tilida esa bu kvantlanish deb ataladi.

Mazkur hodisalar yordamida ko'plab zamonaviy elektron asboblari va qurilmalar yaratish mumkin. Ularga yarim o'tkazgichli lazerlar, fotoelementlar, turli datchiklar, sensorlar, tranzistorlar, doimiy xotira qurilmalari, DVD disklar, shuningdek, kvant kompyuterning asosi bo'lgan uch o'lchamli kvant hodisalarga asoslangan mikrosxemalarni kiritish mumkin.

Quyida bu qurilmalar, magnit molekulalar, ularni olish va ishlab chiqarish usullari bilan shug'ullanuvchi yangi soha - «nanotexnologiya» bilan kengroq tanishamiz.

Magnit molekulalar. Tarkibida nodir Yer elementlari va o'tish guruhi metallari ionlari bo'lgan molekulyar kristallarga magnit molekulyar nanoklasterlar deyiladi. Bu kristallarning tarkibiy qismi bo'lgan molekulalar murakkab tuzilishga ega. Ular qo'shimcha ichki erkinlik darajasi - magnit momentiga ega. Aynan shu magnit momenti ularning xossalriga xilma-xillik bag'ishlaydi va ularni tashqi magnit maydoni yordamida boshqarishga imkon beradi. Aytish joiz, magnetizm mohiyatan kvant mexanik hodisadir. Mendeleyev jadvalining ko'pgina elementlari atomlari, elektron spinlari kompensatsiya-lanmaganligi tufayli magnit momentiga ega. Ular orasida o'tish guruhi metallari (Fe, Co, Ni, Mn va b.), lantanoidlar (nodir elementlari va aktanoidlar) eng ko'p e'tiborga molikdir. Odatda molekulalar diamagnitdir, ammo ba'zida, masalan, kislorod molekulalari bundan istisno bo'lishi ham mumkin. Makroskopik moddalarning magnit xossalari unchalik oddiy emas, chunki alohida atom yoki molekulalarning magnit momentlari murakkab darajada. Alohida atomlarning magnit xossalari juda yaxshi tushunarli. Hozirga qadar, tarkibida o'tish guruhi yoki nodir Yer elementlari atomlari mavjud bo'lgan magnit kristallarning xossalari batafsil o'rganilgan bo'lsada, qator savollar ochiq qolmoqda.

Gap shundaki, bu materiallarda mavjud uzoq magnit tartib alohida atomlarning magnit xossasi hissalarining oddiy superpozitsiyasi emas. Magnit tartiblanish - bu jamoaviy kvant mexanik hodisa bo'lib, uning asosida Pauli printsiipi bilan bog'liq atom spinlari orasidagi o'ziga xos ta'sirlashuv yotadi. Bu almashinuv ta'sirlashuvi deyiladi.

Almashinuv ta'sirlashuvi moddaning makroskopik sohalarida

spinlarning parallel joylashuvini (ferromagnetizm), panjaraning qo'shni tugunlarida antiparallel joylashuvi (antiferromagnetizm) yoki magnit tartiblanishning boshqa murakkab shakllarini yuzaga keltirishi mumkin. Magnetik klasterlar yoki magnit molekularlar alohida atomlarning mikroskopik magnetizmini va kristall holda amorf jismlarning makroskopik magnetizmini birlashtiruvchi bo'g'imidir. Shuning uchun ular ba'zan mezoskopik magnitlar deb ham yuritiladi. Mezoskopik atamasi o'rta, oraliq ma'nosini bildirib, modda makroskopik jism sifatida shakllanmagan, biroq alohida atom emas, balki atomlar majmuasi bo'lganda ularning xossalari tavsiflashda ishlatiladi.

Ana shunday xossalarga ega molekularlar o'tish guruhi elementlari ishtirokida qurilgan (Fe, Mn va b.) yuqori spinli metaloorganik molekularlar yoki magnit molekularlar deb ham ataladi.

Ta'kidlash lozim, bu molekularlarning uyg'unligi va mukammalligi kishini hayratda qoldiradi! Misol tariqasida oddiy Fe10 klasterlarni ko'rib chiqaylik.

Bu xlor, kislorod va uglerod ionlari bilan o'ralgan o'nta Fe³⁺ ionlari, ular orasidagi ta'sirlashuv antiferromagnit xarakterga ega. Shu sabab, molekulaning asosiy holatida spini nolga teng $S=0$. Fe10 magnit klasterini bir molekula doirasidagi antiferromagnitik deyish mumkin

Mn6 manganets xalqasi bundanda murakkab tuzilgan. Bu klaster Mn²⁺ ionlari va organik radikallar ketma-ket joylashgan halqasimon uzilmadan iborat. Mn²⁺ ionlari spinlari ($S=5/2$) va R radikallar spinlari ($S=1/2$) o'zaro kuchli antiferromagnit ta'sirlashuv bilan bog'langan, shuning uchun Mn6 klasteri ferrimagnit, ya'ni kompensatsiyalanmagan butun spinli struktura ekan. Agar Mn²⁺ ionlarining barcha spinlari yuqoriga, radikallarniki pastga yo'nalsa, unda molekulaning to'liq spini $S=12$ ga teng.

Bu kabi katta spinli klasterlar tabiatda kam uchraydi, ular asosan laboratoriyalarda sintezlanadi. Yangi magnit materiallarni yaratish uchun «qurilish g'ishtlari» sifatida katta qiziqish uyg'otadi.

Ba'zi magnit klasterlarining (Mn₂, Fe va b.) ajoyib xossalari biri molekulyar bistabillikdir. Bunda magnit molekula ma'lum yo'nalishda magnit momenti orientatsiyasi bilan farq qiluvchi ikki holatda bo'lishi mumkin. Mazkur holatlar orasidagi o'tish tashqi magnit maydoni bilan