

Вазорати маориф ва илми Ҷумҳурии Тоҷикистон  
Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи  
Садриддин Айни

Зафари Умар, Номвар Курбон

# АСОСҲОИ НАНОТЕХНОЛОГИЯ



Душанбе  
«Истеъдод»  
2015

Китоби «Асосҳои нанотехнология» аз тарафи Шӯрои илмӣ-методи Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи Садриддин Айни ба сифати дастури таълимӣ ба чоп тавсия шудааст.

**Зафари Умар, Номвар Қурбон.**

У-40. *Асосҳои нанотехнология (Дастури таълимӣ барои факултаҳои табишӯ техникаи макотиби олии)*. - Душанбе: «Истеъдод», 2015. - 116 с.

**Мухаррири масъул:** номзади илмҳои техникаӣ, дотсент,  
мудири кафедраи физикаи эксперименталии  
ДДОТ ба номи С.Айни **Қодиров Б.А.**

**Муқарризон:** номзади илмҳои физикаю математика,  
дотсенти кафедраи физикаи назариявии  
ДДОТ ба номи С. Айни **Шерматов М.Ш.,**  
номзади илмҳои физикаю математика,  
дотсенти кафедраи оптика ва спектроскопияи  
ДМТ **Муллоев Н.У.**

Дастури таълимии «Асосҳои нанотехнология» курси мухтасари нанотехнологияро дарбар гирифта, барои донишҷӯён, магистрон ва аспирантони ихтисосҳои физикаю техника, кимиёву биология ва дигар соҳаҳои улуми табиатшиносию дақиқи макотиби олии ҷумҳурӣ пешбинӣ гардидааст.

Китоби фавқ метавонад дар баланд бардоштани салиқа, тафаккури назариявӣ, ҷаҳонбинӣ ва андешаронии донишҷӯён, магистрон, аспирантон, омӯзгорон ва умуман дӯстдорони соҳаҳои мухталифи физикаю математика, техника ва асрори микроолам мусоидат намояд.

Инчунин, барои мукамал гардидани мавзӯот, дар китоби «Асосҳои нанотехнология» 2 ҷадвал ва 40 расм оварда шудаанд.

## Мундариҷа

<b>Пешгуфтор</b> .....	5
<b>Боби I. Нанотехнология</b> .....	8
§ 1.1. Наноматериалҳо ва таснифоти онҳо.....	8
§ 1.2. Фуллеренҳо.....	10
§ 1.3. Нанонайчаҳои карбонӣ .....	14
§ 1.4. Истифодаи амалии нанонайчаҳои карбонӣ.....	15
§ 1.5. Эффеќти капиллярӣ .....	16
§ 1.6. Методи тахлиявӣ-камонии ҳосил намудани нанонайчаҳо... ..	17
§ 1.7. Методи лазерии ҳосил кардани нанонайчаҳо .....	18
§ 1.8. Наноматериалҳои консолидӣ.....	19
§ 1.9. Фуллеритҳо. ....	20
§ 1.10. Кристаллҳои фотонӣ.....	21
§ 1.11. Нанокмпозитҳо .....	23
§ 1.12. Ҳосил намудани наноматериалҳо .....	24
§ 1.13. Нанхокаҳо .....	26
§ 1.14. Кластерҳои атомӣ .....	27
§ 1.15. Методи тадқиқи нанообъектҳо .....	28
§ 1.16. Микроскопи атомӣ-қуввагӣ. ....	30
§ 1.17. Микроскопи оптикӣ-сканерӣ. ....	31
<b>Боби II. Асосҳои физикаи квантӣ</b> .....	33
§ 2.1. Таърихи мухтасари физикаи квантӣ .....	33
§ 2.2. Гипотезаи Луи де-Бройл.....	35
§ 2.3. Функсияи мавҷӣ .....	36
§ 2.4. Муодилаи Шрёденгер.....	37
§ 2.5. Ҳаракати зарраи озод.....	38
§ 2.6. Ҷоҳи квантӣ.....	40
§ 2.7. Риштаҳои квантӣ.....	42
§ 2.8. Нуқтаҳои квантӣ .....	43
§ 2.9. Ҷараёни электрии тунелӣ .....	43
<b>Боби III. Нанотехнология - илми байнисоҳавӣ</b> .....	47
§ 3.1. Нанотехнология ва физика.....	47
§ 3.2. Нанотехнология ва кимиё .....	48
§ 3.3. Нанотехнология ва биология. ....	50
§ 3.4. Нанотехнология ва тиб.....	51
§ 3.5. Нанотехнология ва энергетика .....	51
§ 3.6. Нанотехнология ва экология.....	53
§ 3.7. Нанотехнология ва футурология .....	55
<b>Боби IV. Моделсозии наносохторҳо</b> .....	60
§ 4.1. Методҳои асосии моделсозии наносохторҳо.....	60
§ 4.2. Методи DFT.....	60
§ 4.3. Имкониятҳои пакети Quantum ESPRESSO .....	62
§ 4.4. Сохтори электрони кристалли MgO .....	63
§ 4.5. Моделсозии нанонайча бо пакет-барномаи Дячков .....	65
§ 4.6. Хронологияи нанотехнология.....	70

§ 4.7. Ояндабинии рушди нанотехнология.....	71
<b>Адабиёт</b> .....	73

## Пешгуфтор

Дар замони муосир нанотехнология дар баробари биотехнология ва технологияи иттилоотӣ яке аз равандҳои ҷадидтарини илми имрӯза ба шумор меравад. Ҳарчанд мафҳуми «нанотехнология» дар сарчашма ва адабиётҳои илмӣ ва таълимӣ борҳо ёдрас шуда бошад ҳам, вале то имрӯз таърифи ягонаю умумии он вучуд надорад. Илми нанотехнологияро ба таври мухтасар чунин шарҳ додан мумкин аст.

Нанотехнология - илми муосири фосолави бунёди, амали ва техникӣ буда, натиҷаҳои ба даст овардаи онро дар равандҳои атомӣ, электронӣ ва молекулавӣ тавассути усулҳои назариявӣ, амали, таҳлил ва синтез, ҷамбаст мекунамд ва дар ҳаёт татбиқ менамоянд. Ё бо иборати дигар, нанотехнология, ин маҷмӯи усулҳои мебошад, ки барои ҳосил, таҳқиқ ва истифодаи маводҳои сохторашон дар сатҳи атомӣ молекула қарордошта хобида, истифода мешаванд.

Вожаи «нанотехнология»-ро соли 1974 физики ҷопонӣ Норио Танигути (1912-1999) ба илм ворид намуд ва ин истилоҳро соли 1986 олими амрикоӣ, «падари нанотехнология» Ким Дрекслер (тав. 1955) ҳангоми навиштани китоби «Сохтани механизмҳо...» истифода кард. Дар консепсияи системаҳои нанотехнологӣ пеш аз ҳама асосҳои илмии наноробот, нанокомпютер, наномотор, нанофабрика, наноассамблер ва принс-технология истифода карда мешаванд. Масалан, ғояи наноробот хеле барвақт, яъне онро соли 1959 физики амрикоӣ, яке аз асосгузори электродинамикаи квантӣ Ричард Фейнман дар лексияҳои машҳури худ «Он ҷо дар поин ҷой фаровон аст» истифода карда буд, ба вучуд омад. Худи истилоҳи «робот» - ро бошад, бори нахуст соли 1927 нависандаи чехӣ Карел Чапек истифода намудааст.

Иловаи пешванди нано - пеш аз технология маънои аз миллиард як ҳиссаи метрро мефаҳмонад. Як нанометр (1 нм) ба як тақсими як миллиард метр ( $1/10^{-9}$  м) баробар мебошад. Ғафсии мӯи сари инсон 50000 нм ( $10^{-5}$  м), пардаи ҳуҷайра (тахмо) 5-10 нм, рибосома 30 нм, сафедаҳо 4 то 76 нм, дарозии кислотаи дезоксирибонуклеини (КДН) 2 нм, микронайчаҳои хунгарди одам 30 нм андоза доранд ва ғайра... Чашми одам бошад, зарраи хурдтарини андозааш то 10000 нм ( $10^{-4}$  м) дида метавонад.

Илми нано таҳқиқи нанозарраҳо, хусусиятҳои фундаменталӣ ва структурии молекулаҳои андозаашон дар фосилаҳои аз 1 то 100 нм ( $10^{-9}$  -  $10^{-7}$  м) бударо меомӯзад. Яъне нанотехнология бо ибора ва фаҳмишҳои нанозаррача, нанокомпозитҳо, нанонокилҳо, наноистехсолот, биоструктураи наноскопӣ, наносинтез, наноструктура, наносенсорҳо, нанонайчаҳо, нанонуктаҳо, нанофиристандаҳо, нанополиш ва ғайра алоқаманд мебошад. Бинобар ин, нанотехнология ҳамчун илми муосир, наноструктураҳоро дар дастгоҳҳо ва механизмҳои хурдтарин истифода карда, аз се самти асосӣ иборат мебошад:

а) *сохтани қолабҳои электроние, ки таркиби онҳо аз якчанд атомҳо иборатанд;*

б) сохтани наномеханизмҳо ва роботҳо, ки андозаашон бо молекулаҳо муқоисаишаванда аст;

в) бевосита бо атомҳо ва молекулаҳо кор кардан дар ҳолати ҷамъкунии механизмҳо.

Дар кишварҳои ҷудогонаи олам бо истифодаи нанотехнология истехсоли маводҳои анъанавиро, ки дорои наноструктураҳо мебошанд, мукамал кунонида, ба даромади иқтисодии калон ноил гашта истодаанд. Барои мисол, дар ИМА усули анъанавии ҳосил намудани бензинро аз нафт (усули крекингӣ), ки бо истифодаи катализатори оксиди алюминий ва оксиди силитсий коркард мешуд, бо роҳи хока кардани катализатор дар ин раванд то нанозарра ( $10^{-5}$  -  $10^{-9}$ ) тағйир дода, баромади бензинро ду баробар зиёд намудаанд. Акнун корхонаҳои нафтистехсолкунандаи ИМА бо истифода аз ин усул ҳар сол бо маблағи 400 миллиард доллар ғоида ба даст меоранд. Имрӯз барои бисёре аз давлатҳои пешрафта «нано» хубтарин тиҷорат ба ҳисоб меравад. Чанде қабл, Фонди илми ИМА пешгӯӣ карда буд, ки то соли 2015 маҳсулотҳои нанотехнологӣ ва хизматрасонӣ дар ин соҳа ба триллион доллар мерасад, бинобар ин фирмаҳои гуногун дар ИМА тарафдори пешрафти ин илми ҳозиразамон буда, маблағи калонро барои равнақи он ҷудо менамоянд. Тадқиқоти нанотехнологӣ фанҳои гуногунро ба монанди физика, химия, биология, тиб, муҳандисӣ ва барномасозӣ муттаҳид месозад.

Ҳамин тавр, дар баробари пешрафти илму техника ва талаботи ҳамарӯзаи инсонӣ боиси он гардид, ки нанотехнология ҳамчун илми бунёдии байнисоҳавӣ ба пайдоиш ва инкишофу ҳамкориҳои илмҳои ҳамрадифи худ: наноиника, нанокимиё, нанотиб, технологияи квантӣ ва ғайра заминаҳои устувори илмӣ гузорад. Имрӯз нанотехнология яке аз илмҳои муосир ва ҷавон буда, дар ояндаи наздик ба пешрафтатарин илми замонавӣ мубаддал хоҳад гашт. Аз ин рӯ, раванд, ташаккул ва пешрафти илмҳои табиаташиносию техникӣ нишон медиҳад, ки бо пешрафти соҳаҳои мухталифи ҷамъият андеша, мафкура ва шуури инсонӣ низ инкишоф ёфта, боиси пайдоиши илмҳои ҷадид мегардад. Ёдовар шудан ба маврид аст, ки баъд аз зуҳури Инқилоби илмӣ - техникӣ (ИИН) инсоният ба бузургтарин кашфиёту дастовард ва ихтироот ноил гардида, табиати сайёраи Замин ва ҳатто фазои берун аз атмосфераро низ тасхир ва тобеи худ гардонид, яъне ӯ ҳам ба дохили ядрои атом ворид шуду ҳам ба сайёраҳои Системаи офтобӣ роҳ ёфт. Аз ин ҷо, хулоса кардан мумкин аст, ки ивазшавии парадигмаҳо дар табиату ҷамъият боиси пайдоиши шоҳаҳои нави илмӣ гардида, баҳри пешрафти ҳаёти ҷамъиятӣ заминаҳои мусоид фароҳам меоранд. Дар ояндаи наздик ҷои микросхемаҳоро принцип ва усулҳои кории нанотехнологӣ иваз намуда, дар баробари пешрафти илму техника ҷои худро ба соҳаи дигар, ба монанди пикотехнология (шарҳи муаллифон) ва ғайра диҳад.

Китоби «Асосҳои нанотехнология» нахустин дастури таълимӣ бо забони давлатӣ буда, хонандагонро бо асосҳои нанотехнология ва вазъи имрӯзаи илми ҷаҳонӣ шинос менамояд. Дастури таълимии ғавқ аз 4-боб

иборат буда, боби якуми дар бораи таснифоти асосии наномаводҳо, аз ҷумла наномаводҳои гурӯҳи карбонӣ - фуллеренҳо ва нанонайчаҳо маълумот медиҳад. Боби дуюм асосҳои физикаи квантӣ ва сохтори электроники маводҳои нимноқилии гетеросохторӣ (нуқтаҳо, риштаҳо ва ҷоҳҳои квантӣ)-ро маънидод менамояд. Дар боби саввум оид ба нанотехнология ҳамчун илми байнисоҳавӣ, яъне робитаи он бо илмҳои физика, кимиё, биология, энергетика ва ғайра сухан рафта, инчунин ҷиҳатҳои футурологии нанотехнологияро нишон медиҳад. Дар боби чаҳорум усулҳои мухталифи моделсозии компютерӣ ва омӯзиши сохтори электроники наномаводҳо баён гардидаанд.

Муаллифон ба номзади илмҳои техникӣ, дотсент, мудири кафедраи физикаи эксперименталии ДДОТ ба номи С.Айнӣ Қодиров Б.А. барои таҳрири пурраи дастур; ба номзадҳои илмҳои физикаю математика, дотсенти кафедраи физикаи назариявии ДДОТ ба номи С. Айнӣ Шерматов М.Ш. вадотсенти кафедраи оптика ва спектроскопияи ДМТ Муллоев Н.У. барои бартараф намудани баъзе нуқсонҳои дастури таълимии мазкур миннатдорӣ баён менамоянд.

Албатта, китоби мазкур нахустин дастури таълимӣ бо забони тоҷикӣ аз ҷанни нанотехнология буда, аз камбудию норасоӣҳо холи нест. Муаллифони «Асосҳои нанотехнология» аз шахсоне, ки андешаҳои худро доир ба беҳтар гаштани мазмуну мундариҷаи дастури мазкур пешниҳод мекунанд, миннатдоранд.

*Муаллифон*

## Боби I. НАНОТЕХНОЛОГИЯ

### § 1.1. Наноматериалҳо ва таснифоти онҳо

«Наноматериал» - яке аз мафҳумҳои хеле васеъ паҳншудаи наноолам ба шумор меравад. Дар навбати худ мафҳуми «материал» бо мафҳуми «модда» алоқаи наздик дорад. Материалҳо инҳо моддаҳои мебошанд, ки онҳо дар ин ё он соҳа бо ин ё он мақсад амалан истифода мешаванд. Модда, бошад дар баробари майдон яке аз шаклҳои материя мебошад. Тавсифи асосии модда дар сохтор ва хосияти он зоҳир мешавад. Сохтори модда аз маҷмӯи элементҳои таркибии он, ки байни ҳамдигар робитаи устувор дошта яклухтии онро нигоҳ медоранд, иборат аст. Хосияти модда ин аломатҳои миқдорию сифатии он аст, ки ягонагӣ ё умумияти онро ҳангоми муқоиса бо моддаҳои дигар нишон медиҳад. Дар охир ҳамаи моддаҳо аз зарраҳои элементарӣ (электронҳо, протонҳо, нейтронҳо ва ғ.) таркиб ёфтаанд.

Фарқияти асосии материалҳо аз моддаҳо дар он аст, ки материалҳо дорои хосиятҳои функционалӣ мебошанд. Ин хосияти онҳоро омӯхта соҳаҳои истифодаи амалии онҳоро муайян мекунанд.

Наноматериалҳо - материалҳои мебошанд, ки андозаашон ё элементҳои ташкилдихандаи сохториашон ақалан дар як самти тирӣ координатӣ дар фосилаи наномасштабҳо (1-100 нм) меҳобанд. Чунин материалҳо хосиятҳои ғайримуқаррарии физикӣ, химиявӣ ва биологӣ доранд. Наноматериалҳои гуногун бо сохтор ва хосиятҳои хусусии худ аз ҳамдигар фарқ мекунанд.

Пешванди «нано» дар мафҳумҳои наноолам (наноматериал, нанотехнология, нанонайча ва ғ.) тағйирёбии масштабро  $10^9$  (миллиард) маротиба (мисол,  $1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$ ) ифода мекунанд. Одатан дар наноолам объектҳои андозаашон дар фосилаи 1-100 нм меҳобидаро қабул мекунанд. Зеро дар ин фосила объектҳо аз худ хосиятҳои махсус зоҳир мекунанд.

Ҳамин тавр, пешравӣ ва тарақиёти наноматериалҳо боиси рушду тарақиёти нанотехнология мегардад. Умуман дар назди нанотехнология се вазифаи бо ҳам алоқаманд меистад:

1. *Ҳосил намудани наноматериалҳои дорои сохтор ва хосиятҳои таъинотӣ.*

2. *Муайян намудани соҳаҳои истифодаи амалии наноматериалҳо бо дар назардошти сохтор ва хосиятҳои онҳо.*

3. *Назорат (контрол) ва тадқиқ намудани сохтор ва хосиятҳои наноматериалҳо чӣ ҳангоми истеҳсол ва чӣ ҳангоми истифода.*

Наноматериалҳоро мувофиқи дараҷаи мураккабии сохторашон ба *нанозарраҳо* ва *материалҳои наносохторӣ* ҷудо намудан мумкин аст (Ҷадвали 1).

*Ҷадвали 1. Синфбандии наноматериалҳо*

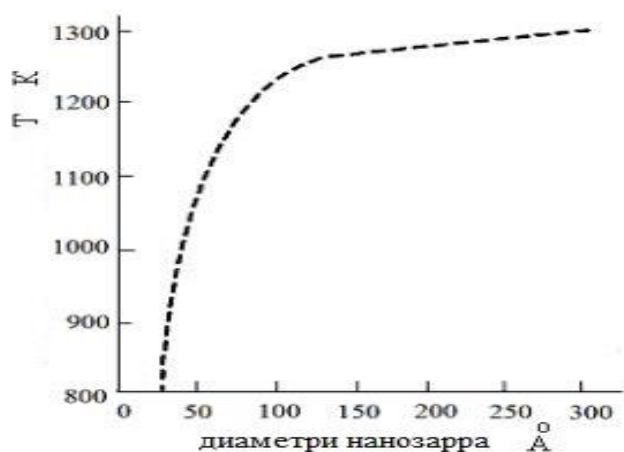




Ба *нанозарраҳо* - нанокластерҳо, нанокристаллҳо, фуллеренҳо, нанонайчаҳо, супермолекулаҳо, биомолекулаҳо ва липосомҳо дохил мешаванд. Материалҳои наносохторӣ аз ансамбли нанозарраҳо иборат мебошанд. Дар чунин материалҳо нанозарраҳо нақши элементҳои сохториро иҷро мекунанд. Материалҳои наносохторӣ бошад дар навбати худ ба наноматериалҳои консолидӣ ва нанодисперсӣ ҷудо мешаванд. Ба наноматериалҳои консолидӣ - материалҳои нанокристаллӣ, фуллеритҳо, кристаллҳои фотонӣ, нанокомпозитҳои қабатдор ва ба нанодисперсҳо-нанохокаҳо, наносузпензҳо, наноэмулсҳо, наноэрозолҳо дохил мешаванд.

Дар байни хосиятҳои хоси наноматериалҳо эффеќтҳои андозагӣ, аз он ҷумла эффеќтҳои квантии андозагӣ, аҳамияти калон доранд. Мисол, дар муқоиса бо материалҳои муқаррарӣ дар наноматериалҳо тағйирёбии хосиятҳои фундаменталии физикӣ, ба монанди модули чандирӣ, гармиғунҷоиии хос, ҳарорати ғудозиш, хосиятҳои магнитӣ ва электрикӣ ва ғ. мушоҳида мешаванд.

Тағйирёбии ҳарорати ғудозиш вобаста ба андозаи зарраҳо яке аз эффеќтҳои мебошад, ки дар наноматериалҳо ошкор шудааст. Ҳангоми ғузаштан ба ҳолати наноандозагӣ паст шудани ҳарорати ғудозиш  $T_g$  мушоҳида мешавад. Вобаста ба ҷинси материал ва андозаи элементҳои наносохторӣ пастшавии  $T_g$  метавонад садҳо ғрадуси шкалаи Келвинро ташкил диҳад. Масалан, ҳарорати ғудозиши тиллои муқаррарӣ 1340 К буда, ҳангоми ғузаштан ба ҳолати наноандозагӣ (ба 2 нм баробар будани андозаи зарраҳо) ҳарорати ғудозиш ба 400 К баробар мешавад, яъне тахминан  $T_g$  1000 К паст мешавад (Расми 1.1).



*Расми 1.1.*

Паст шудани ҳарорати гудозиш дар ҳолати наносохторӣ барои дигар металлҳо низ хос мебошад. Барои мисол,  $Su$ ,  $Pb$ ,  $Cu$ ,  $Al$  ва  $Bi$ .

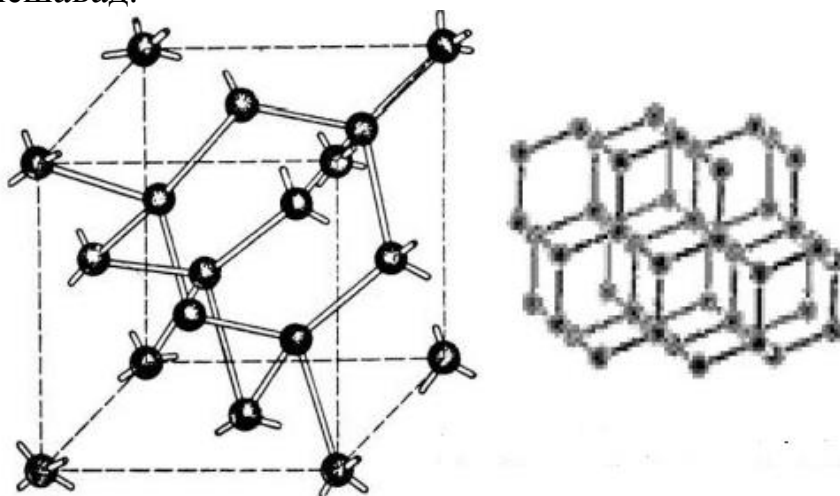
Доир ба хосиятҳои наноматериалҳои гуруҳи карбонӣ, ки дар олами нанотехнология «машҳур» мебошанд, маълумоти мухтасар пешниҳод мекунем.

## § 1.2. Фуллеренҳо

Карбон элементи химиявии бо рақами тартибии 6 ва массаи нисбии атомии 12 дар ҷадвали даврии элементҳои химиявии Д.И. Менделеев ҷойгир буда, дар ҳолати асосӣ бо конфигуратсияи электронии  $1s^2 2s^2 2p^2$  ифода мешавад.

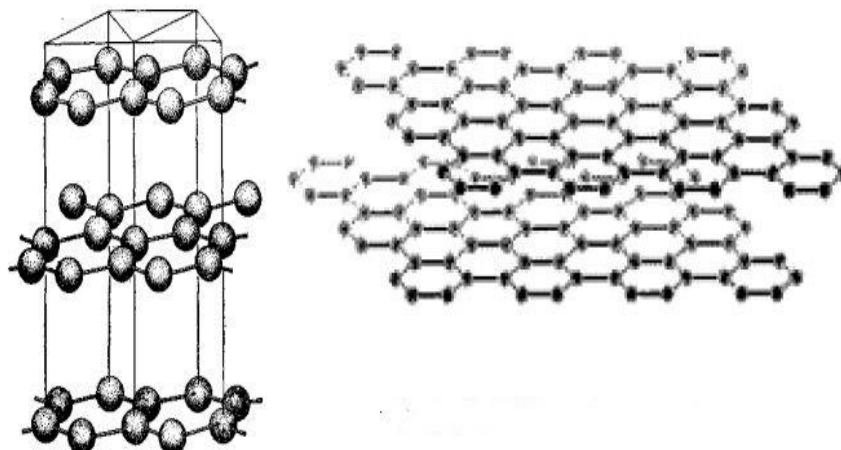
Солҳои зиёд чунин мешумориданд, ки дар табиат танҳо ду шакли аллотропии карбон-алмос ва графит вучуд дорад. Ҳоло бошад, шаклҳои нави аллотропии карбон-фуллерен ва нанонайчаҳо кашф шудаанд.

Бояд қайд намуд, ки сохтори алмос ин ба таври кубӣ модификатсия шудаи карбон мебошад. Ячейкаи элементарии алмос аз 18-то атомҳои карбон иборат буда, аз онҳо 8-тоаш дар қуллаҳои куб, 6-тоаш дар маркази рӯяҳои куб ва 4-тои дигараш дар гирехҳои бо ячейкаи оянда пайваस्तшаванда, ҷойгир шудааст. Дар расми 1.2 сохти кристаллии алмос пешниҳод мешавад.



*Расми 1.2*

Графит, ин ба таври гексагоналӣ модификатсия шудаи карбон мебошад, ки сохтори қабат-қабатро дорад. Дар расми 1.3 сохтори графит оварда шудааст.



Расми 1.3

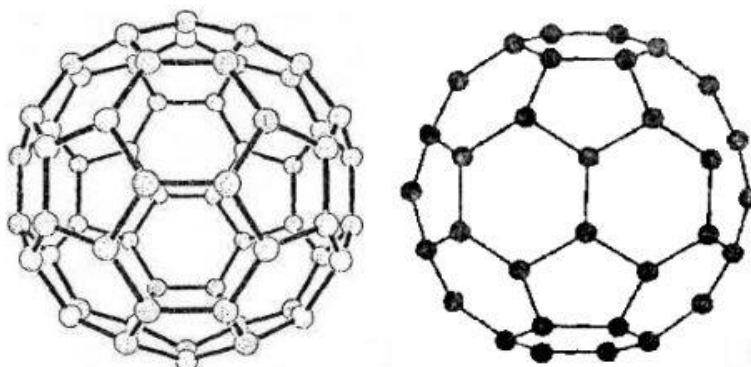
Дар графит масофаи байни қабатҳо 0,34 нм буда, масофаи байни атомҳо ба 0,14 нм баробар аст.

**Фуллерен** - шакли нави аллотропии карбон дар ибтидо мавриди тадқиқотҳои астрофизикии атмосфераи байни ситораҳо, баъдтар соли 1985 ҳангоми тадқиқи масс-спектрии буғи графит кашф карда мешавад.

Кашофони шакли нави аллотропии карбон - фуллерен Харлот Крото (Англия), Роберт Керл ва Ричард Смолли (ИМА) соли 1996 бо Ҷоизаи нобелӣ дар соҳаи химия қадрдонӣ шуданд.

Фуллерен ба шарафи ихтироъкор, меъмор, ороишгар ва муҳандиси амрикоӣ Ричард Фуллер (1895-1983) номгузори шудааст.

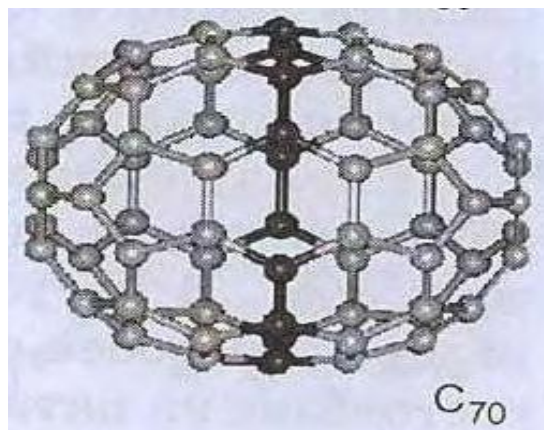
Фуллерени аз ҳама ҷиҳат устувор ва маъмулӣ фуллерени  $C_{60}$ , ки аз 60-атомҳои карбон иборат аст, чун сфераи диаметраш 1 нм (радиуси фуллеренибо методи рентгенӣ муайян карда шуда 0,357 нм) мебошад. Атомҳои карбон дар  $C_{60}$  аз 12-панҷкунҷаҳо ва 20-шашкунҷаҳо иборат буда, ба шакли тӯби футбол монанд аст (Расми 1.4).



Расми 1.4

Бинобар он фуллеренро баъзан «футболино» низ меноманд. Ҳар як атоми карбон дар фуллерени  $C_{60}$  ба ду шашкунҷа ва як панҷкунҷа тааллуқ дорад. Шакли молекулаҳои фуллерен на танҳо сферикӣ, балки

эллипсӣ низ шуда метавонанд. Дар расми 1.5 сохтори фуллерени C<sub>70</sub> оварда шудааст.



Расми 1.5

Дар замони муосир мафҳуми «фуллерен» ба синфи васеъи пайвастагиҳои карбонии бо формулаи умумии C<sub>n</sub> (n-адади бутуни аз 20 то 1840 (*гиперфуллеренҳо*)) ифодашаванда, дахл дорад. Шумораи атомҳои карбон-*n* дар молекулаи фуллерен ба қонунияти муайяни  $n = 20, 28, 42, 52, 58, 60, 72, 78, 80$  ва ғайра итоат мекунад.

Яке аз методҳои асосии ҳосил намудани фуллеренҳо, ки эффекивӣ ва содда ба шумор меравад, ин таҳлиии камони электрикии байни пораҳои аз ҷиҳати химиявӣ тозаии графит дар вакуум бо иштироки гази инертӣ мебошад. Усули мазкурро соли 1990 В.Кретчмеро ва Д.Хаффман рушд доданд.

Ҷадвали 1.2. Хосиятҳои фуллерен

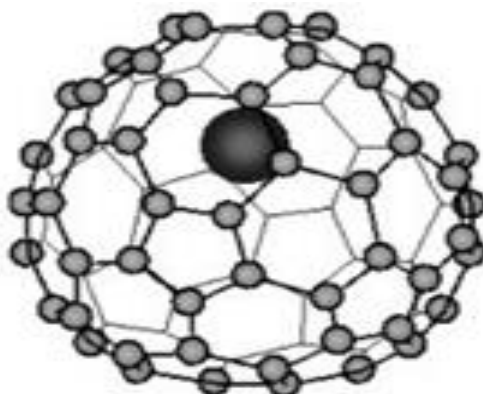
Шакли карбон	Зичӣ, г/см <sup>3</sup>	Гармиғунҷоиши хос, Ҷ/К кг	Гармигузаронӣ, кВт/К м	Муқовимати хоси электрикӣ, Ом, м
Графит	2,3	0,72	0,1	(3-5)10 <sup>7</sup> (1-5) 10 <sup>-2</sup>
Алмос	3,5	0,50	1,4	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>6</sup>
Фуллерен	1,7	0,68	0,4	10 <sup>14</sup>

Энергияи ионизатсияи фуллерен-7,58 эВ, гармиғунҷоишаш дар ҳарорати ҳонагӣ 0,68 Ҷ/(кг · К) ва изолятори хуби электрикӣ мебошад.

Фуллерен хосияти устувории худро дар муҳитҳои инертӣ то ҳароратҳои 1700 К нигоҳ медорад. Бо иштироки оксиген бошад, дар ҳароратҳои пастар - 500 К оксидшавии фуллерен, боҳосилшавии СО ва СО<sub>2</sub> мушоҳида мешавад.

Дар замони муосир ба тадқиқи амалии фуллерендиққати ҷиддӣ дода мешавад. Яке аз соҳаҳои муҳими истифодаи амалии фуллерен ин наноэлектроника ба шумор меравад. Ҳангоми ба дохили молекулаи фуллерен (дар ковокии фуллерен) дохил намудани атомҳои элементҳои «беғона» (металлҳо ё ғайриметаллҳо) хосиятҳои онро тағйир медиҳад. Чунин фуллеренҳоро эндофуллеренҳо ё фуллеренҳои легиронидашуда меноманд. Ба «ковокӣ»-и фуллерен дохил кардани атом ё молекулаи унсурҳои дигар хосияти электрикии фуллеренро тағйир дода, метавонад фуллерен-изоляторро ба ноқил (Расми 1.6) табдил медиҳад. Чунин

хосияти фуллеренҳо боиси рушди соҳаи наноэлектроника бо принципи нав гардид.



Расми 1.6

Фуллерени дар ковокиаш атомҳои элементҳои камёфт (ба монанди тербий, Tb), ки дорои диполи магнитӣ мебошад ва аз ин гуна хосияти фуллерен истифода бурда, маводҳои махсуси магнитии информатсионӣ бо ғунҷоиши информатсионӣ  $10^{12}$  бит/см<sup>2</sup> сохтан мумкин мебошад.

Ба истиснои эндофуллеренҳо боз экзофуллеренҳои вучуд доранд. Экзофуллеренҳо инҳо фуллуруенҳо, ки ягон гиреҳашон бо атом ва ё молекулаҳои элементҳои «беғона» пайвастагӣ доранд. Ин гуна фуллеренҳоро гетерофуллеренҳо низ меноманд. Мисол,  $C_{59}B$ ,  $C_{58}B_2$ ,  $C_{57}B_3$ ,  $C_{58}BN$ ,  $C_{59}N$  ва ғайра.

Дар фишорҳои баланд аз молекулаҳои алоҳидаи фуллеренҳо полимер ҳосил намудан мумкин аст. Полимерҳои дар асоси фуллеренҳо ҳосилшуда аз полимерҳои муқаррарӣ нисбатан мустаҳкам мебошанд. Онҳо дар фотодиодҳо ва батареяҳои офтобӣ тадбиқи амалӣ меёбанд.

**Фуллеренҳои ғайрикаרבонӣ.** Олимони нишон доданд, ки фуллеренҳои ғайрикаרבонӣ ҳам вучуд доранд. Барои мисол, чунин пайвастигиҳо аз атомҳои элементҳои кремний ҳосил намуданд. Истифодаи амалии фуллеренҳои кремний дар компютерҳои квантӣ, катализаторҳои химиявӣ ва ҳоказо пешбинӣ шуда буд.

Нахустин маротиба соли 2006 аз атомҳои тилло фуллерени металлӣ ҳосил карда шуд. Барои сохтани фуллерени хурдаандоза, 16-то атомҳои тилло лозим омад. Модели он дар расми 1.7 нишон дода шудааст.



Расми 1.7

Яке аз соҳаҳои дурнамои истифодаи фуллерени тиллоӣ ин соҳаи биотехнология ва тиб ба шумор меравад, мисол интиқоли КДН ба ҳуҷайраҳои зинда тавассути нанозарраҳои тиллоӣ мебошад.

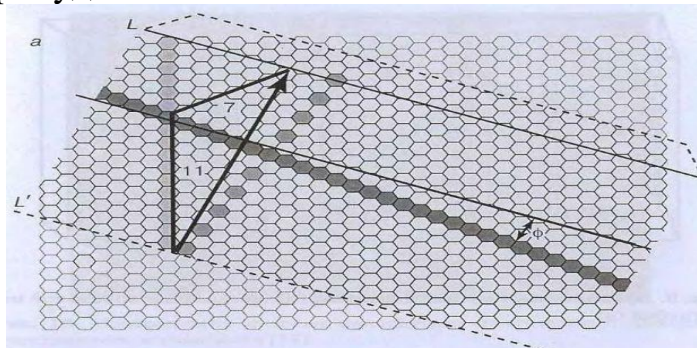
### § 1.3. Нанонайчаҳои карбонӣ

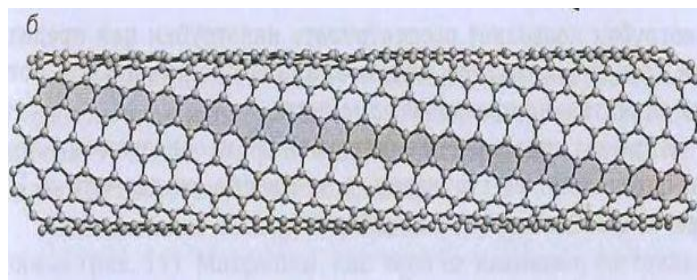
Дар замони муосирмафҳуми «нанонайчаҳои карбонӣ» дар олами маводшиносӣ маъмул гаштааст. Нанонайчаҳоро ҳамчун яке аз шаклҳои махсуси нанотехнология қабул кардан мумкин аст. Диаметри нанонайчаҳо аз ним нанометр ва дарозиашон бошад, то якчанд микронро ташкил медиҳанд. Нанонайчаҳоро соли 1991 олими ҷопонӣ Ииджима дар таҷриба мушоҳида мекунад. Нанонайчаҳо аз он сабабҷолиби диққатанд, ки онҳо дорои хосиятҳои ғайримуқарарии физикӣ-химиявӣ мебошанд. Масалан, вобаста ба сохти қабати графитиашон нанонайчаҳо метавонанд хосияти электрикии металлӣ, изоляторӣ ё нимноқилӣ дошта бошанд.

Маълум аст, ки электрноқилияти ноқилҳои муқаррарӣ ба дарозии ноқил мутаносиби чаппа буда, ба масоҳати арзии он мутаносиби роста аст. Электрноқилияти нанонайча бошад, аз дарозӣ ва диаметри ноқил вобастагӣ надоранд.

Барои шарҳ додани сохти геометрии нанонайчаҳо ба қабати графинӣ вектори  $C = (na_1, ma_2)$ -ро ҷой медиҳем, ки дар он  $a_1$  ва  $a_2$  векторҳои базисӣ ва  $n, m$  ададҳои бутун мебошанд. Аз нуқтаҳои аввал ва охири ин вектор ду хатти рости  $L$  ва  $L^1$ -ро мегузаронем. Қабати графиниро то ҳамчоя шудани  $L$  ва  $L^1$  тоб медиҳем. Он гоҳ  $L$  дарозии давраи ҳосил шударо ташкил медиҳад. Ҳамин тариқ, мо сохти геометрии нанонайчаи карбонии идеалии як қабатаро ҳосил мекунем (Расми 1.9).

Дар ҳолати умумӣ нанонайчаҳо нисбат ба тири аз маркази силиндириашон гузаранда дорои симметрия мебошанд, ки чунин хосияти нанонайчаҳоро хираллӣ меноманд. Нанонайчаҳои шакли  $(n, 0)$  ва  $(n, n)$ -ро ғайрихираллӣ меноманд. Дар чунин шакли нанонайчаҳо атомҳои шашкунҷаи карбон нисбат ба тири аз маркази цилиндр гузаранда параллел ва ё перпендикуляр ҷойгиранд. Сохти геометрии нанонайча дар расми 1.8 тасвир шудааст.





Расми 1.8

Нанонайчаҳои шакли (n 0)-ро «хати шикаста» («zigzag») ва шакли (n n)-ро «курсӣ» («armchair») меноманд. Нанонайчаҳо аз як ё ду тараф кушода ё пӯшида мешаванд. Ишораи (n m)-ро индексҳои хираллӣ низ меноманд. Ин гуна индексҳо бо бисёре аз параметрҳои нанонайчаҳо вобаста аст. Аз он ҷумла бо диаметри нанонайча чунин вобастагӣ дорад.

$$d = \frac{d_0 \sqrt{3}}{\pi} \sqrt{n^2 + m^2 + nm}$$

дар ин ҷо  $d_0 = 0,142$  нм масофаи байни атомҳои карбон дар қабати графинӣ.

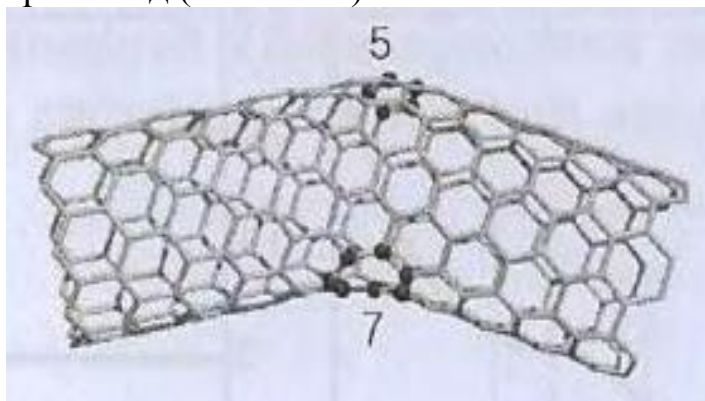
Нанонайчаҳои якқабатаро асосан бо методи тахлиявӣ-камонӣ ва лазерӣ ҳосил мекунанд. Нанонайчаҳои бисёрқабата шаклашон «лӯлапеч» («рулонӣ») ва ё «андарунӣ» («матришка») мешаванд. Нанонайчаҳои андарунӣ аз якҷанд нанонайчаҳои дохилӣ якдигар иборатанд. Нанонайчаҳои лӯлапеч аз як қабати графинӣ ки ба таври лӯлапеч печонида шудаанд иборат аст.

Дар ковокии нанонайчаҳо ба монанди фуллеренҳо атомҳои элементи «бегона»-ро ҷойгир намудан мумкин аст.

#### § 1.4. Истифодаи амалии нанонайчаҳои карбонӣ

Нанозлектроника яке аз соҳаҳои истифодаи амалии нанонайчаҳои карбонӣ ба шумор меравад.

Диодҳои дар асоси нанонайчаҳои карбонӣ сохта шударо дида мебароем. Чунин намуди диодҳо бо методи тағйир додани сохти геометрии нанонайча сохта мешавад. Нанонайчаи карбонии якқабатаи идеалӣ, аз ҳалқаҳои карбонии шашкунҷаи ба таври цилиндрӣ мураттаб шуда, иборат мебошад. Ва аз мобайни нанонайча ду ҳалқаи шашкунҷа ба як панҷкунҷа ва як ҳафткунҷа иваз карда шавад, шакли геометрии нанонайча тағйир меёбад (Расми 1.9).



Расми 1.9

Баъди тағйир додани сохти геометрии нанонайча, нанонайчаи қатшуда ҳосил мешавад, ки ин аз чап нанонайчаи (5 5)-и шакли металл ва аз рост (10 0) шакли нимноқил ҳосил мешавад. Бояд қайд кард, ки нанонайчаҳои шакли (n n) - новобаста аз n ҳамеша металл мебошанд, агар n ба 3 бебақия тақсим шавад, нанонайчаҳои шакли(n 0) нимноқил мебошанд. Дар чунин системаи молекулавии ҳосилшудаи металл-нимноқил ҷараёни электрикӣ танҳо ба як самт ҷорӣ мешавад. Ин бо он вобаста аст, ки энергияи электронҳои дар ду тарафи нанонайчаи қатшуда ҷойгиршаванда нисбат ба сатҳи энергияи Ферми пасту баланд ҷойгир мебошанд (Расми 1.10).



*Расми 1.10*

Яктарафа ҷорӣ шудани ҷараёни электрикӣ аз нанонайчаҳои қатшуда барои сохтани диодҳои росткунанда истифода мешавад.

Дар асоси пайваст намудани ду нанонайчаҳои мухталиф нанорезисторҳо низ сохтан мумкин аст. Масалан, ҳангоми пайваст намудани ду нанонайчаҳои металлӣ бо муқовиматҳои 56 ва 101 кОм ҳарчанд диоди росткунанда ҳосил нашавад ҳам, аммо нанонайчаи муқовиматаш калони 608 кОм ҳосил мешавад. Зиёд шудани муқовимат аз ҳисоби монечай дар натиҷаи пайвастшавии нанонайчаҳо пайдошуда маънидод карда мешавад.

**Нанотарозу дар асоси нанонайчаҳо.** Тадқиқи хосиятҳои электромеханикии нанонайчаҳо ба ақидаи сохтани нанотарозу дар асоси онҳо овард. Чунин нанотарозу метавонад ҳатто массаи вирусҳо ва зарраҳои субмикрониро ҳис кунад. Принципи кори нанотарозу ба он асос карда шудааст, ки ҳангоми ба нӯги он часпондани ягон объект басомади резонансии вай хурд мешавад. Чандирии нанонайчаро маълум ҳисобида аз рӯи лағжиши басомади резонансӣ массаи зарраро ёфтан мумкин аст. Масалан, чунин нанотарозуро истифода намуда массаи зарраи графитиеро чен намудаанд, ки он ба 22 фемтограмм ( $22 \cdot 10^{-15}$  г) баробар аст. Бо ёрии нанотарозу зарраҳои массаашон дар диапозони  $10^{-12}$ - $10^{-15}$  г-ро чен намудан мумкин аст.

### § 1.5 Эффеќти капиллярӣ

Барои мушоҳидаи эффеќтҳои капиллярӣ дар нанонайчаҳои карбонии аз ду тараф пӯшида бояд қисми болоии - «сарпӯши» нанонайчаро кушод. Яке аз роҳҳои кушодани «сарпӯши» нанонайча ин



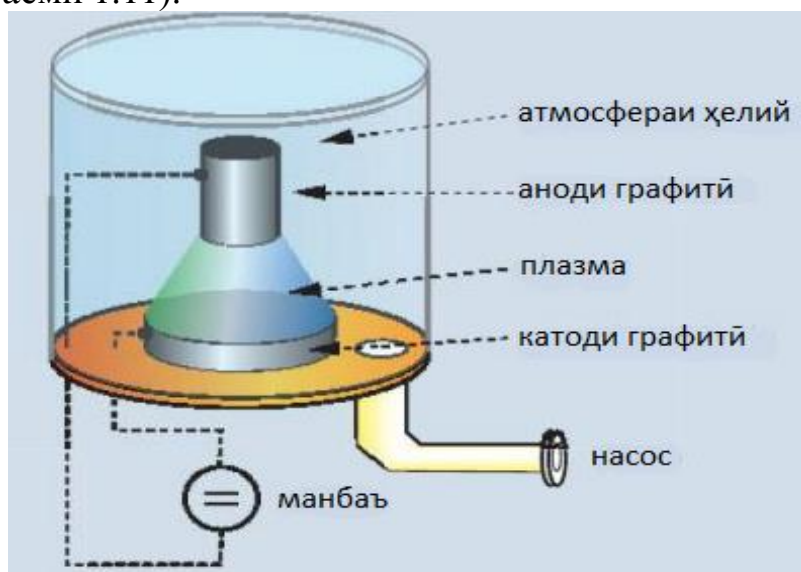
гарм кардани он дар ҳарорати  $850^{\circ}\text{C}$  дар муҳити гази оксиген мебошад. Дар натиҷаи оксидшавӣ қариб 10%-и нанонайча кушода мешавад.

Таҷрибаҳо нишон доданд, ки моеъҳое ба канали нанонайча дохил шуда метавонанд, ки бузургии кашиши сатҳиашон аз  $200 \text{ мН/м}$  зиёд набошад. Аз ин сабаб барои ба канали нанонайча дохил намудани ягон зарраҳои элементҳои бегона, аввал аз онҳо бо моеъҳои кашиши сатҳии кам дошта, маҳлул тайёр мекунанд баъдан ба канали нанонайча раван мекунанд. Мисол, барои дохил намудани зарраҳои ягон металл ба дохили канали нанонайча аз он бо кислотаи нитрат (кашиши сатҳиаш -  $43 \text{ мН/м}$ ) маҳлул тайёр намуда ба канали нанонайча раван мекунанд. Баъдан то ҳароратҳои  $400^{\circ}\text{C}$  онро дар муҳити гази гидроген давоми 4 - соат гарм мекунанд, ки дар натиҷа нанонайчаи дар «бағалаш» (қовоқиаш) металл ҳосил мешавад. Бо ҳамин тарз нанонайчаҳои кобальтдор, никелдор ва оҳандор ҳосил карда шудаанд.

### § 1.6. Усули тахлиявӣ-камони ҳосил кардани нанонайчаҳои карбонӣ

Методи тахлиявӣ-камони ҳосил намудани нанонайчаҳо, ки Иидҷма (кашофи нанонайча) пешниҳод карда, буд то имрӯз аҳамияти худро гум накарда, баръакс истифодаи васеъ дорад.

Мувофиқи ин усул раванди ҳосилшавии нанонайча дар камераи бо гази гелий пур карда шудаи тахти фишори 500 Торр қарордошта, мегузарад (Расми 1.11).



Расми 1.11

Дар ин камера катод ва аноде, ки масофаи байни нӯгҳои охирашон 1-2 мм аст, шиддати байни электродҳо ба 15-25 В, ҷараёни тахлия бошад, ба даҳҳо ампер баробар мешавад. Дар ин маврид қариб 90 %-и массаи анод ба сатҳи катод такшин мешавад ва шаклгирии аз ҳама бештари нанонайча ҳангоми ба  $100 \text{ А/см}^2$  баробар шудани зичии ҷараёни плазма ба вуҷуд меояд.

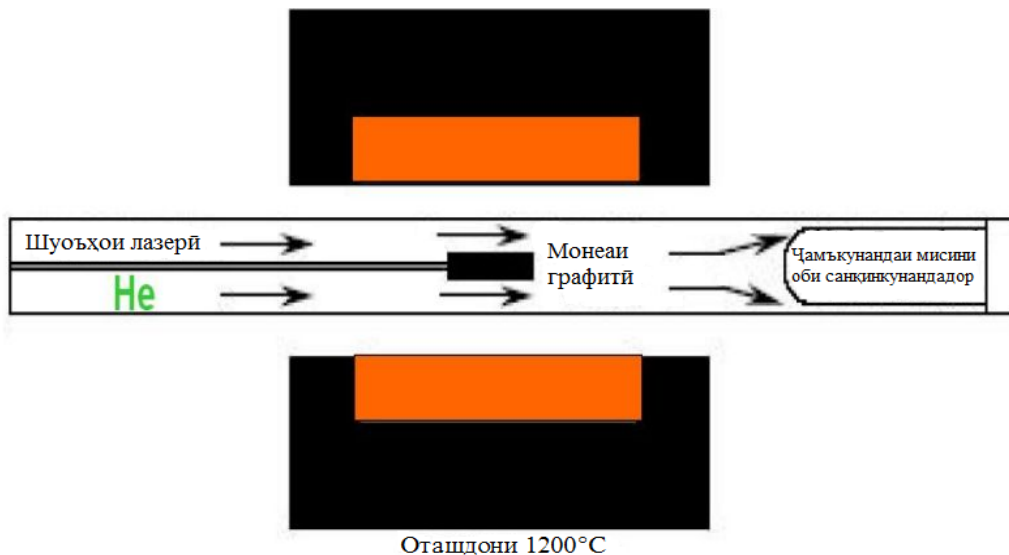
Нанонайчаҳои нисбат ба сатҳи катод перпендикуляр ҳосил шуда, дорои дарозии 40 мкм мебошанд. Фазои байни нанонайчаҳо бо

нанозарраҳои бетартиб хобида ва нанонайчаҳои «гумрохшуда» пур мебошанд. Умуман қариб 60%-и карбони аз анод ба катод омада, ба масолеҳи нанонайча мубаддал мешавад. Баъдан бо ёрии оксидкунандаҳо (методи химиявӣ) нанонайчаи холис аз дигар омехтаҳои карбонӣ чудо карда мешавад.

### § 1.7. Методи лазерии ҳосил намудани нанонайчаҳо

Бори нахуст соли 1939 физики шӯравӣ В.А. Фабрикант собит намуд, ки муҳитеро ба даст овардан мумкин аст, то дар он рӯшноӣ аз ҳисоби нурафкании маҷбурӣ пурқувват карда шавад. Физикони дигари шӯравӣ Н.Г. Басов, А.П. Прохоров ва новобаста аз онҳо олими амрикоӣ Ч.Таунс соли 1953 генератори молекулиеро ихтироъ карданд, дар ҳудуди мавҷҳои сантиметрӣ қор менамуд ва асбоби сохтаи эшон номи мазерро касб кард. Истилоҳи «MASER» аз ҳарфҳои аввали Micromave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (*Тақвияти микромавҷҳо бо ёрии афканишоти маҷбурӣ*) гирифта шудааст. Соли 1960 бошад, физики амрикоӣ Мейман асбоберо сохт, ки дар ҳудуди мавҷҳои рӯшноӣ қор мекард ва онро лазер номид. Вожаи «LASER» аз нахустҳарфҳои Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (*Тақвияти рӯшноӣ бо ёрии афканишоти маҷбурӣ*) гирифта шуда, баъзан лазерро генератори оптикӣи квантӣ низ меноманд. Лазерҳо дар соҳаҳои мухталиф истифодаи васеъ доранд: буридан ва гудохтани металлҳо, кафшергарӣ, дар тиб - қорди ҷарроҳӣи беҳунравӣ ва ғ. Дар астрономия палмосиши (локатсия) лазерӣ имкон медиҳад, ки суръати гардиши сайёраҳо чен карда шавад. Инчунин, лазерҳоро дар баланд бардоштани ҳарорати плазма, ки барои ба амал омадани реаксияҳои термоҳастай зарур аст, истифода мебаранд.

Дар методи лазерии ҳосил намудани нанонайчаҳо лавҳаи графитии диаметраш 1,25 см ба дохили лӯлаи (трубкаи) диаметраш 2,5 см ва дарозияш 50 см, ки он дар навбати худ ба дохили печи ҳарораташ 1200 °C аст, гузошта мешавад. Муҳити лула (трубка) бо гази инертии фишораи 500 Торр пур карда шудааст. Лавҳа бо лазерӣ дарозии мавҷаш 532 нм, басомади импулсаш 10 Гс ва давомнокии импулсаш 10 нс нурборон карда мешавад. Маҳсулоти ҳосилшуда дар сатҳи коллектори мисини дар нӯги лӯла сахткардашуда, ки бо об хунук карда мешавад, такшин мешавад (Расми 1.12). Нанонайчаҳои бисёрқабатаи ҳосилшуда шумораи қабатҳояшон аз 4 то 24 ва дарозияшон то 300 нм мерасад. Ҳангоми ҳарорати печро аз 1200°C то 900°C паст кардан дар сохтори нанонайчаҳои ҳосилшуда дефектҳо (норасогихо) пайдо мешаванд. Дар ҳарорати 200°C ҳосилшавии нанонайчаҳо дида намешавад. Истифодаи катализаторҳои металлӣ (Ni, Co) боиси баланд шудани сифати истеҳсоли нанонайча ва зиёд шудани миқдори он дар маҳсулоти ниҳой мегардад. Дар ин ҳолат ба ҷои нанонайчаҳои бисёрқабатаи нанонайчаҳои якқабата (50%-и маҳсулот), ки диаметрашон аз якдигар хеле кам фарқ мекунанд (1,3-1,4 нм) ҳосил мешаванд.



Расми 1.12

Якбора бо ду лазерӣ дарозии мавҷҳои гуногун (532 ва 1064 нм) нурборон кардани лавҳаи графитӣ (бо иштироки катализатор) миқдори нанонайчаҳои якҷабатаи ҳосилшуда то 90% мерасад. Тағйир додани ҳарорати печ аз 780 то 1050 °C бо зиёдшудани диаметри нанонайчаҳо (аз 0,8 то 1,51 нм) сабаб шуд.

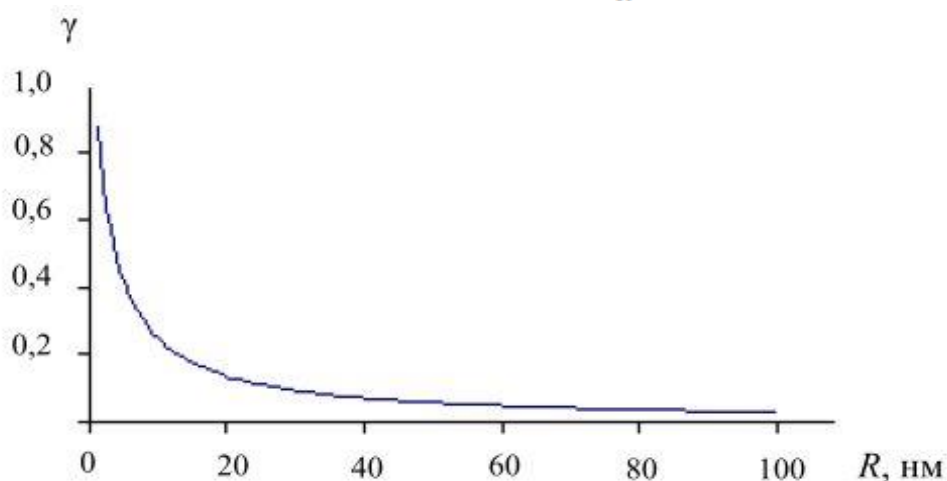
### § 1.8. Наноматериалҳои консолитӣ

Ба наномаводҳои консолитӣ маводҳои компактӣ (дар фазаи сахт), ки аз нанозарраҳои дар тамоми ҳаҷми мавод бо тартиби муайян ҷойгир буда, байни якдигар алоқаи устувор доранд, дохил мешаванд. Аз шаклҳои нисбатан васеъ паҳншудаи наномаводҳои консолитӣ нанокристаллҳо, кристаллҳои фотонӣ, фуллеритҳо мебошанд. Шакли дигари маъмул гаштаи маводҳои консолитӣ ин нанокмпозитҳои қабатдор ва нанокмпозитҳои матрисавӣ ба ҳисоб мераванд.

Маводҳои нанокристаллиро ҳамчун маводҳои поликристаллии элементҳои сохториашон дар масшави наной мехобида қабул намудан мумкин аст. Элементи сохтори дилҳо маводи поликристаллӣ аз донаҳои поликристаллӣ (кристаллитҳо) ва ҳудудҳои байни донагӣ ташкил меёбад. Яъне сохтори маводро дар яклухтӣ сохтори дона ва ҳудудҳои байни донагӣ муайян мекунад. Гузаштан аз ҳолати макрокристаллӣ ба ҳолати нанокристаллӣ бо хурдшавии ҷуссаи дона ва мутаносибан зиёдшавии доли ҳудудҳои байни донагӣ дар тамоми ҳаҷми мавод меоварад.

Аввалин маротиба консепсияи маводҳои нанокристаллиро соли 1981 Г. Глейтер пешниҳод намуда, буд. Мувафиқи ҳамин консепсия ҳудудҳои байни донагӣ дар сохтори маводҳои нанокристаллӣ ҳамчун фактори тағйирдиҳандаи хосият маънидор шуда буданд. Барои мисол, девори хиштинеро тасавур мекунем, ки дар он нақши донаҳоро хиштҳои алоҳида ва нақши ҳудудҳои байни донагиро қабати сементӣ иҷро мекунад. Бигузур хиштҳои шакли геометрии кубии дарозии рӯяҳои R ва

ғафсии қабаи сементи  $h$  бошад. Ҳангоми хурд кардани  $R$  ва бетағйир мондани  $h$  барои ҳудуд қонунияти  $\gamma = 1(1 + \frac{h}{R})^{-3}$  ҷой дорад.



Расми 1.13

Ҳангоми  $h=1$  нм ва  $R=100$  нм будан  $\gamma = 3\%$ ,  $R=10$  нм  $\gamma = 25\%$  ва  $R=5$  нм  $\gamma = 43\%$  мешавад. Дар расми 1.13 вобастагии ҳиссаи сарҳади байнидонаҳо  $\gamma$  дар ҳаҷми нанокристаллҳои материал аз андозаи дона  $R$  нишон дода шудааст.

Дар маводҳои нанокристаллӣ андозаи донаҳо одатан 5-20 нм ва (аз 100 нм хурд) ва ҳудудҳои байнидонаагӣ 0,4-1 нм мебошанд. Муррабабияти ҷойгиршави ва зичии атомҳои байни ҳудудӣ (20-40%) кам аст. Дар расми 1.14 модели дученакаи сохтори атомии материали нанокристаллӣ оварда шудааст.



Модели дученакаи сохтори атомии материали нанокристалли

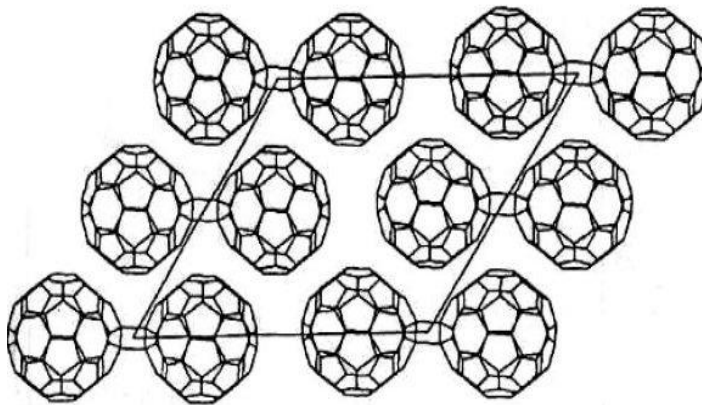
○ атомҳои доначаҳо ● атомҳои байнисарҳадии доначаҳо

Расми 1.14

Дар истеҳсоли материалҳои аз технологияи компакткунонидаи наноҳокаҳо, деформатсиякунондани пластикӣ ва кристаллизатсия аз ҳолати аморфӣ васеъ истифода мешавад.

## § 1.9. Фуллеритҳо

Фуллеренҳои сохторашон устуворро фуллеритҳо ё кристаллҳои фуллеренӣ меноманд. Раванди ҳосилшавии фуллеритҳо бо параметрҳои физикӣ (фишор ва ҳарорат) вобастагии зиҷ дорад. Дар ҳарорати муътадил ҳангоми ба 1,5 ГПа баробар будани фишор, аз фуллеренҳои  $C_{60}$  ҳосил шудани димерҳои  $C_{60} = C_{60}$  мушоҳида мешавад. Афзоиши ҳарорат сабаби шаклгирии панҷараи кристаллии воҳиди сохтораш димерро ба вучуд меорад (Расми 1.15).



Расми 1.15

Боз ҳам афзудани ҳарорати система сабаби вайроншавии димер ва ба ҳосилшавии сохтори полимери фуллеренӣ меорад. Бояд қайд кард, ки шаклгирии сохтори полимерӣ метавонад дар натиҷаи реаксияи фотохимиявӣ низ ба вучуд ояд.

Фуллерени  $C_{60}$  (инчунин фуллеренҳои  $C_{70}$ ,  $C_{78}$ ,  $C_{80}$  ва ғ.) конденсиронидашуда ба кристаллҳои шакли молекулавӣ дохил мешаванд. Дар чунин кристаллҳо банди химиявии сусти Ван-дер-Ваалсӣ мушоҳида мешавад. Фарқияти асосии кристаллҳои фуллеренӣ аз дигар кристаллҳои моддаҳои органикӣ дар он аст, ки дар онҳо фазаи моеъгӣ мушоҳида карда намешавад. Ин бо он вобаста аст, ки дар ҳарорати гузариш ба ҳолати моеъгӣ (барои фуллерити  $C_{60}$  -1200К) сохти сферикӣи фуллеренҳо ба вайроншавӣ (деструктсия) оғоз намуда, ба ҳамвории якҷабатай графитӣ мубадал мешаванд.

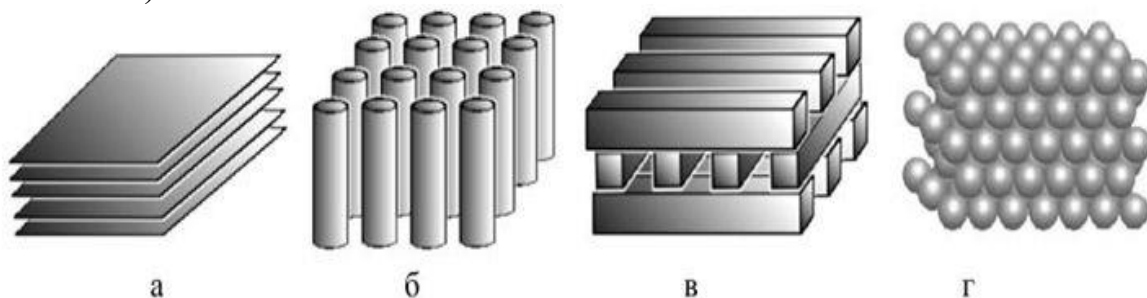
Далелҳои таҷрибавӣ тасдиқ мекунанд, ки фуллерити дар ҳарорати муътадил кристаллизатсияшуда сохти панҷараи кристаллии рӯяи марказонидашударо (доимии панҷарааш - 1,417 нм) дорад. Масофаи байни маркази ду фуллерени ҳамсоя ба 1,002 нм баробар буда, дар ҳаҷми  $1 \text{ см}^3$   $1,44 \cdot 10^{21}$  фуллерен ҷой гирифта аст. Яъне, зичии фуллерен дар чунин сохтори кристаллӣ ба  $1,72 \text{ г/см}^3$  баробар аст.

### § 1.10. Кристаллҳои фотонӣ

Тассавуротҳо дар бораи сохтори зонагии нимноқилҳо (Band theory of semiconduction) ақидаи сохтани маводҳои шакли нав - кристаллҳои фотониро ба вучуд овард. Яъне, мувофиқи ин назария барои электронҳои дар потенциали даврии панҷараи кристаллӣ қарор дошта, ҳолатҳои энергетикӣ муайяни «манъ нашуда» ва «манъ буда» қарордоранд. Дар солҳои 70-уми асри гузашта ақидае пешниҳод шуд, ки мувофиқи он имконияти сохтани маводҳо бо сохтори зонагии оптикӣ,

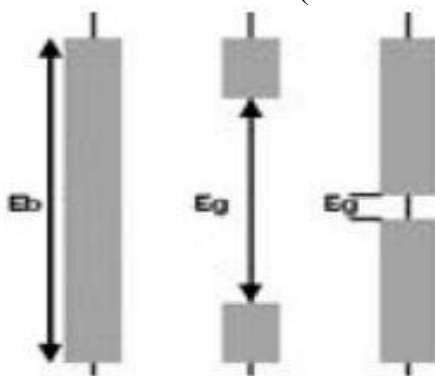
ки дар онҳо ҳолатҳои энергетикӣ «манънашуда» ва «манъбуда»-и муайян барои фотонҳо вуҷуд дошта бошад. Дар чунин маводҳо нақши потенциалҳои даврии панҷараҳои кристаллиро ба таври даврии тағйирёбандаи қобилияти шуоъшиканӣ ё нуфузпазирии диэлектрикӣ ( $n \approx \sqrt{\epsilon}$ ) иҷро мекунад.

Соли 1987 қорманди компанияи Bell Communications Research Э. Яблонович концепсияи мукаммали кристаллҳои фотониро пешниҳод мекунад. Аз рӯи назарияи Яблонович зонаҳои манъбудаи кристаллҳои фотонӣ, ин ҳамон зонаҳоеанд, ки рушнӣ дар онҳо бо дарози мавҷи муайян мавҷуд буда наметавонад. Андозаҳои элементҳои сохтори кристаллҳои фотонӣ бо нимдарозии мавҷи рушнӣ (дар диапозони намоён - 200-400 нм) бояд муқоисашаванда бошанд. Ҳамин тавр, кристаллҳои фотонӣ инҳо аз маҷмӯи элементҳои мурағабӣ (қабатҳо, нахҳо, зарраҳо)-и андозаҳояшон дар як, ду ё се самтҳо бо нимдарозии мавҷи рушнӣ муқоисашаванда мебошанд. Мувофиқан кристаллҳои фотониро ба намудҳои якченака, дученака ва сеченака ҷудо мекунанд (Расми 1.16).



Расми 1.16

Кристаллҳои фотониро низ ба монанди кристаллҳои муқаррарӣ ба ноқилҳо, изоляторҳо ва нимноқилҳо ҷудо мекунанд. Ба ин ё он шакл таалуқ доштани кристаллҳои фотонӣ ба васеъгии зонаҳои «манъшуда» ва «манънашуда»-и фотонӣ вобаста аст (Расми 1.17).



Расми 1.17

Кристаллҳои фотонии ноқил (расми 1.17) дорои зонаҳои васеъи «кушода» мебошанд. Ин гуна қисмҳо, қисми шаффофе мебошанд, ки дар онҳо рушнӣ қариб бепешхӯрӣ паҳн мешавад. Кристаллҳои фотонии изолятор (расми 1.18) дорои зонаҳои васеъи «пӯшида» мебошанд. Чунин кристаллҳо монанди қисмҳои ношаффофе ҳастанд, ки дар фарқият аз қисмҳои ношаффофи муқаррарӣ, ки дар онҳо рушнӣ зуд хомӯш шуда, ба

гармӣ мубадал мешавад, дар ингуна кристаллҳои фотонӣ рӯшноӣ фурӯъ бурда намешавад.

Кристаллҳои фотонии нимноқил (расми 1.17) бошад, дорои зонаҳои нисбатан камтари «манъ шуда» мебошанд.

Намояндаи маъмули кристалли фотонии табиӣ ОПАЛ ба шумор меравад.

Барои ҳосил намудани кристаллҳои фотонӣ аз технологияи ҳосил намудани материалҳои нимноқиллии муқаррарӣ истифода намудан мумкин аст. Фирмаи технологияи ҷопонии NEC ҳосил намудани кристаллҳои фотониро аз  $\text{SiO}_2$  пешниҳод намуда буд.

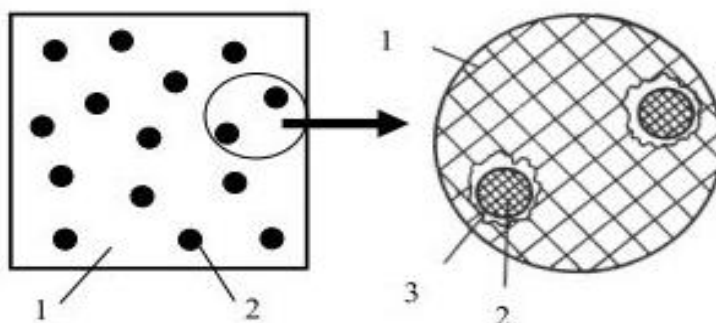
Соҳаҳои дигари рушди нанотехнология, ин нанооптикаи информатсионӣ ба ҳисоб меравад. Наносистемаҳои оптикӣ чун наносистемаҳои электронӣ функсияи коркард, нигоҳдорӣ ва интиқоли информатсияро ба воситаи сигналҳои оптикӣ (на сигналҳои электронӣ) доранд. Аз ҳама бештар қисми нанофотоникаи нанооптика преспективӣ ба ҳисоб меравад, ки масолеҳи базавии он кристаллҳои фотонӣ мебошанд.

Таърихи сохтани компютерҳои оптикӣ, ки аз солҳои 1980 оғоз мешавад, бо рушди нанофотоника робитаи зич дорад. Узви қорӣи чунин модели компютерҳо протсессори оптикӣ мебошад, ки дар он иҷрои амалиётҳои мантикӣ ба раванди ҳамтаъсири маҷҳҳои рӯшноӣ бо модда вобаста аст. Аввалин дастоварди нанофотоника бо сохтани механизмҳои оптикӣ - рақамӣ, ки имконияти иҷрои амалиётҳои мантиқиро бо параметрҳои баланди қорӣ ва сарфаи энергия дошт, дар лабораторияи фирмаи америкоии «Bell» дар соли 1990 сохта мешавад.

### § 1.11. Нанокөмпозитҳо

Системаҳои гетерогени аз ду ё зиёда компонентҳои бо таркиби химиявӣ ва хосиятҳои физикишон фарқкунанда иборат мебошанд, материалҳои композитӣ номида мешаванд.

Дар бисёр ҳолат компонентҳои нанокөмпозитҳо бо нишонаҳои геометрияшон фарқ мекунанд. Одатан яке аз онҳо дар тамоми ҳаҷми композит бефосила (компоненти матрисавӣ ё матрисаҳо) ва дигарӣ дар фазои ҳаҷми композит «дона-дона» тақсим шудаанд. Дар сарҳади байни компонентҳо пардаи тунуки гузариш пойдо мешавад. Дар расми 1.18 схемаи композити бо нанозарраҳо армиронидашуда оварда шудааст: 1) матриса, 2) нанозарраи армиронидашуда ва 3) сарҳади байни фазоҳо.



**Расми 1.18**

Матриси композит асосан зичӣ, хосиятҳои гармофизикавӣ, механикӣ, электрӣ ва ғайра муайян мекунад. Нақши пуркунанда дар мақсаднок тағйир додани хосиятҳои дар боло гуфта шуда айён мешавад. Пуркунандаҳо аз рӯи андозаҳои ба нулченака (зарраҳо), якченака (нахҳо) ва дученака (қабатҳо) ҷудо мекунад. Мувофиқан композитҳои зарраҳо армиронидашуда, композитҳои нахӣ вақабатдорро фарқ мекунад.

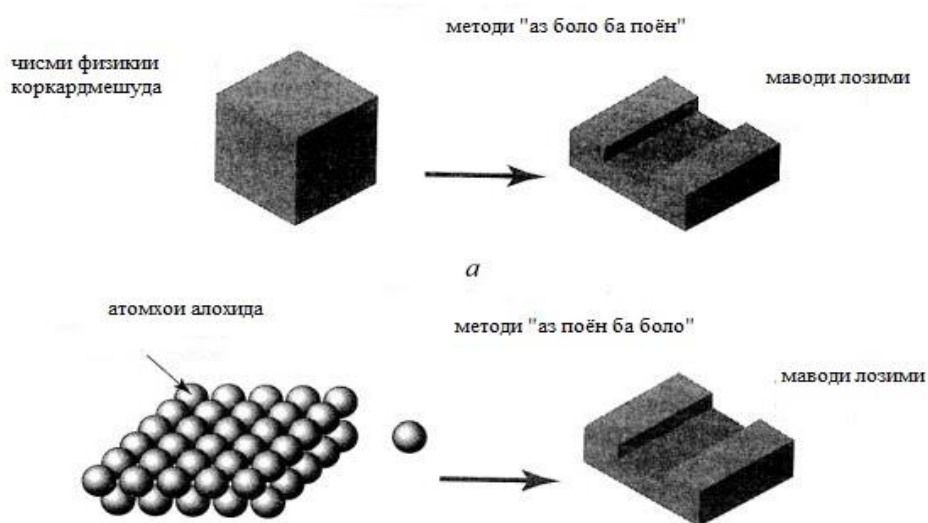
Композитҳои металлӣ, яке аз намудҳои нанокompозитҳои дар олами техника зиёд истифода шаванда мебошанд. Ин гуна композитҳо дорои сохтори поликристаллӣ буда, дар матрисиашон мунтазам нанозарраҳои оксидҳо, карбидҳо, нитридҳо ва ғайра паҳн шудаанд. Барои мисол, нанокompозити матрисиаш Al ки бештар бо оксидҳо армиронида мешавад, амалан дар техникаи авиатсионӣ истифода мебаранд, ё нанокompозити матрисиаш аз элементи Ni, ки бо оксидҳои ThO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub> армиронида мешавад барои металлургияи ҳароратҳои аз 1000°C зиёд пешбинӣ шудааст.

Композитҳои полимерӣ, чунин нанокompозитҳо мебошанд, ки матрисиашон дар асоси полимерҳои органикӣ, яъне пайвастиҳои молекулие, ки дар таркиби сохтораш (на дар таркиби химиявиаш) атомҳои элементҳои карбон, гидроген, нитроген, оксиген ва ҳоказо ҷой гирифтаанд.

### § 1.12. Ҳосил намудани наномаводҳо

Маҷмӯи усулҳои барои ҳосил намудани наноматериалҳо истифодашавандаро шартан ба ду гурӯҳ ҷудо мекунад. Инҳо технологияҳои «аз боло ба поён» (top-down) ва «аз поён ба боло» (bottom-up) номида мешаванд.

Дар технологияи «аз боло ба поён» андозаи объекти физикӣ то мавриди параметрҳои нанӣ, шудан хурд карда мешавад. Яъне, чунин навъи методи ҳосил намудани наномаводҳо тавсифи физикӣ доранд (Расми 1.19).



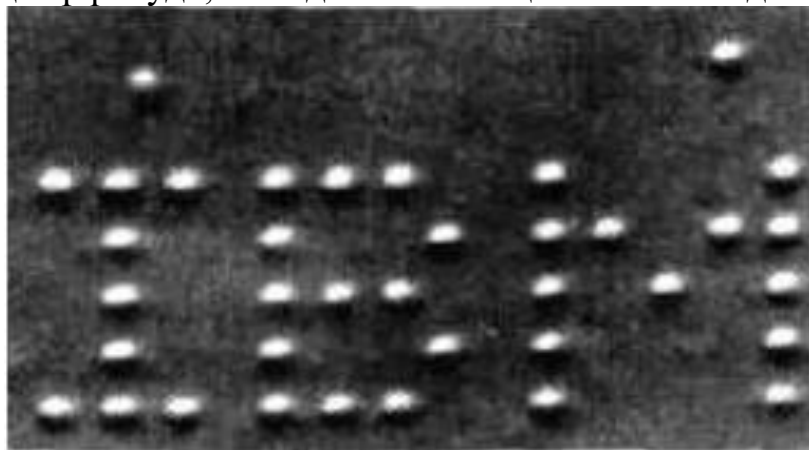
**Расми 1.19**



Дар технологияи «аз поён ба боло» бошад, объекти ҳосил мешударо аз атомҳо, молекулаҳо ва ҳуҷайраҳои алоҳида «чамбоварӣ» мекунад. Ин навъи ҳосил кардани наномаводҳо характери химиявӣ доранд, яъне бо иштироки реаксияҳои гуногуни химиявӣ мегузаранд.



Имконият ва аҳамияти методи «аз поён ба боло»-ро ҳанӯз соли 1959 физики амрикоӣ, яке аз бунёдгузори электродинамикаи квантӣ, ислоҳотгари усули тадриси физика дар макотиби олӣ ва барандаи Ҷоизаи нобелӣ Ричард Ф. Фейнман (1918-1988) - пешниҳод карда буд. Вале коркарди амалии он баъди сохтани микроскопҳои зондӣ (солҳои 80-уми асри ХХ) амалӣ шуд. Кормандони ширкати IBM аз 35 атомҳои элементи ксенон дар сатҳи монокристалли никелӣ номи фирмашонро менависанд (Расми 1.20), ки ин воқеа ҳамчун аввалин дастоварди амалии методи «аз поён ба боло» ҳисоб мешавад. Аз тарафи дигар камбудии ин метод дар он аст, ки дар он вақти зиёд сарф шуда, маводи хело кам ҳосил мешавад.

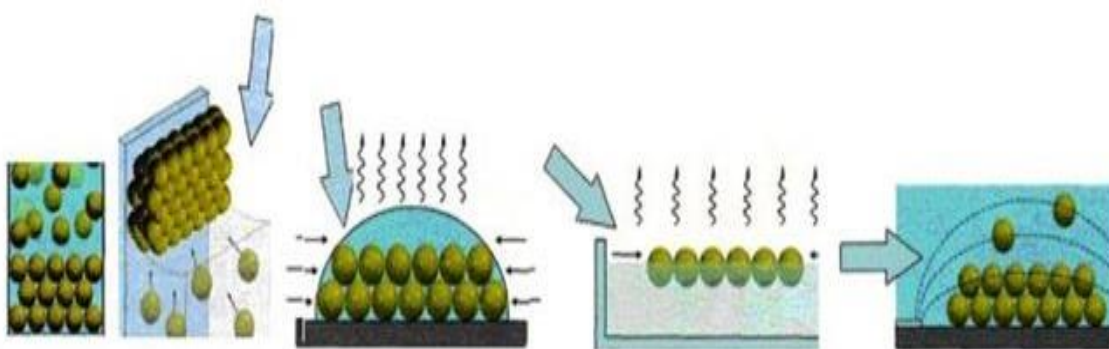


Расми 1.20

*Худташкилшавӣ ва худмуттаҳидшавӣ.* Дар айни замон ҷустуҷӯи методҳо, принципҳо ва технологияҳои навро, ки имконияти сохтани наносохторҳоро то зинаи истехсолӣ дар бар гиранд, идома дорад.

Дар ин самт технологияи сохтани нанообъектҳо бо принципи «аз поён ба боло», ки ба ҳодисаи худмуттаҳидшавӣ бо принципи худташкилшавӣ асос карда шудааст, аз аҳамият дур нест.

Зери мафҳуми худмуттаҳидшавӣ (self-assembly) қобилияти бо ҳамдигар пайвастшавии атомҳо ва молекулаҳоро дар шароити муайяни физикӣ, ки дар ин мавридсохтори молекулавии (умуман системаи) ҳосилмешуда ба ҳосиятҳои таъинотӣ аст, мефаҳманд. Худмуттаҳидшавии ба принципи худташкилшавӣ асос карда шуда, намунаи идеалии сохтани материалҳо дар сатҳи атомию молекулаӣ, ба ҳисоб меравад. Аҳамияти ин метод дар он аст, ки дар фарқият аз методи зондӣ - сканерӣ, ки дар он атомҳо, молекулаҳо (ва ё умуман нанозарраҳо) «дона-дона» ба ҷои лозимӣ кӯчонида мешаванд, дар ин ҷо таъсири ба система гузошташуда, якуякбора ба ҳамаи зарраҳои системаҳо «даҳолат» намуда дар натиҷа ин зарраҳо ихтиёран худашон ҷои лозимиро интихоб мекунад (Расми 1.21).



*Расми 1.21*

Худмуттаҳидшавӣ дар табиат ба таври васеъ паҳн шудааст (сабзиши кристаллҳо, эмали дандон, опал ва ғ.) мисол шуда метавонанд. Агар сохтори ҳамаи бофтаҳо аз худмуттаҳидшавии ҳуҷайраҳо муайян карда шавад, сохтори ҳуди ҳуҷайраҳо бошад аз худмуттаҳидшавии атомҳо ва молекулаҳои таркибии онҳо муайян карда мешавад. Ба мисоли худташқилшавии табиӣ бошад, «шашкунчаҳои орухона» ва рафтори коллективии мӯрчаҳо мисол шуда метавонанд. Механизми худмуттаҳидшавӣ ва худташқилшавии наносистемаҳо дар табиат олимонро ба он водор намуд, ки ин механизмҳо дар сохтани наносохторҳои сунъӣ истифода баранд.

### § 1.13. Нанохокаҳо

Дар муқоиса бо металлургияи хокаҳои анъанавӣ, ки дар он хокаҳои андозаи зарраҳояшон аз 0,5 то 500 мкм истифода мешаванд, андозаи зарраҳои нанохокаҳо аз 100 нм хурд мебошад.

Айни замон нанохокаҳои таркибашон гуногуни дар асоси оҳан, никел, кобалт, мис, нукра, тилло, волфрам, молибден, оксидҳо, карбидҳо ва нитридҳои элементҳои гуногун ҳосил карда шуда, ҳосиятҳои онҳо омӯхта шудаанд. Махсусияти нанохокаҳо дар он аст, ки онҳо аз як тараф агар ҳамчун гурӯҳи мустақили наноматериалҳо рафтор кунанд аз тарафи дигар ҳамчун маводи хом барои ҳосил кардани материалҳои ҳаҷмӣ (компактӣ) хизмат мекунанд.

Нанохокаҳои металлҳои гуногун, карбидҳо, нитридҳо ва дигар материалҳо бо методҳои механикӣ, физикӣ, химиявӣ ва инчунин биологӣ (умуман зиёда аз 20 метод) ҳосил мекунанд. Методҳои ҳосил намудани нанохокаҳо бо методҳои ҳосил намудани хокаҳои муқаррарӣ дар бисёр ҳолат монанд мебошанд. Интихоби метод дар ҳосил намудани нанохокаҳо соҳаҳои истифодаи он ва маҷмӯи ҳосиятҳои онҳо муайян мекунад. Ҳамон як навъи нанохокаи бо методҳои гуногун ҳосил шуда, метавонад шакли геометрии гуногунро дошта бошад.

Дар методи механикӣ маводи аз он хока истифодашаванда бо роҳи механикӣ «реза» карда шуда, бетағйир додани таркиби химиявии онҳо коркард мешавад. Ҷиҳати мусбии методи механикии истифодаи хока дар он аст, ки технологияи он сода ва имконияти ба миқдори зиёд ҳосил намудани хока мавҷуд аст.

Методи физико химиявӣ ҳосил намудани нанохокаҳоро шартан ба методи физикавӣ ва химиявӣ ҳосил намудани нанохокаҳо ҷудо мекунанд. Методи физикавӣ технологияи «буғ-конденсатсия» преспективӣ ва серистеъмол ҳисоб мешавад. Дар ин технология буғронкунии материал бо роҳҳои нурборонкунии лазерӣ ё электронӣ ва ғ. ба амал оварда мешавад. Шартҳои асосӣ дар ҳама ҳолат ин ба таври ногаҳонӣ хунук кардани муҳит, яъне паст кардани ҳарорати муҳит  $10^5$ - $10^7$  дараҷа дар ҳар як сония мебошад. Дар натиҷаи ногаҳон сард кардани муҳит кристаллизатсияи мавод дар шакли нанозарра ба вуҷуд меояд. Айни замон барои аз металлҳо ҳосил намудани нанохокаҳо методи махсус - электрикӣ тарқондани ноқил (электротарқиши ноқил) коркард карда шудааст. Дар ин метод ба порчаи ноқили металии диаметраш 0,1 - 1мм импулси қувваи ҷараёнаш қалон -  $10^4$  -  $10^6$  А/мм<sup>2</sup> равона карда мешавад, ки зери таъсири он ноқили металии пора-пора шуда бо суръати қалон ҳаракат мекунад. Маводи дар натиҷаи тарқишҳои махсус сард карда мешаванд ва нанохокаҳои шаклашон сферӣ ҳосил мешавад. Бо ҳамин метод нанохокаҳои андозаашон 5-100 нм аз металлҳои гуногун (Ti, Co, W, Te, Mo, Cu, Ag, Al, Ni ва ҳоказо) ҳосил карда шудаанд.

#### § 1.14. Кластерҳои атомӣ

Нанокластерҳо (аз вожаи англисии *cluster* - даста, гурӯҳ, анбӯҳ) наносохторҳои аз миқдори наонқадар зиёди ( аз як то садҳо ҳазор) атомҳо, ки дорои андозаҳои нанӣ дар ҳар се самтҳо буда, ҳамчун воҳидҳои мустакил, аз худ хосиятҳои хос зоҳир мекунанд.

Синтези наноматериалҳо аз кластерҳоро бо методи худташқилшавию хутмуттаҳидшавӣ ва ё бо роҳи зичкунонидан (компактиронидан) тавасути фишорҳои баланд ба роҳ мондан мумкин аст. Кластерҳоро ба сифати элементҳои асосҳои электронӣ, катализатори реаксияҳои химиявӣ, дар тиб, косметология ва ғ. амалан истифода мебаранд.

Хосиятҳои кластерҳоро, бомақсадона бо дохилкунии атомҳои элементҳои «бегона», тағйир додан мумкин аст. Кластерҳо вобаста ба табиати атомҳои тарқибиашон метавонанд металлӣ ва ё нимноқилӣ бошанд.

Нанозарраҳои металлӣ одатан шакли дурусти геометрии октаэдр, кубооктаэдр, икосаэдр (расми 1.22) ва ғайра доранд.

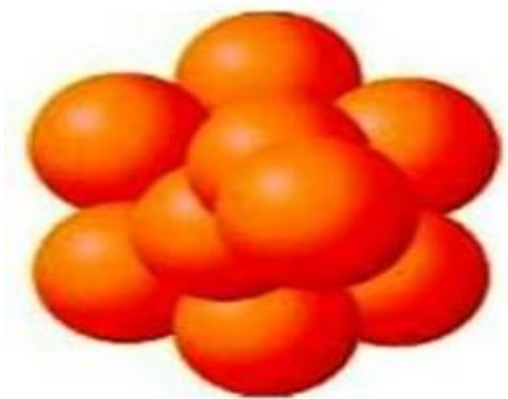


Расми 1.22

Дар чунин сохторҳо бандҳои химиявии ковалентӣ ё металлӣ мушоҳида карда мешавад. Яке аз хосиятҳои фарқкунандаи кластерҳои металлӣ аз материалҳои муқаррарӣ ин хело паст будани ҳарорати гудозиши онҳо мебошад. Мувофиқ наомадани нуқтаи гудозиш бо нуқтаи яхкунӣ мушоҳидаи гармиғунҷоиши манфӣ (ҳангоми интиқоли ягон миқдори гармӣ ҳарорати онҳо паст мешавад) қобилияти баланди ба реаксия дарӣ ва ғ. низ ба хосиятҳои хоси кластерҳо марбутанд.

Хосиятҳои физикӣ-химиявии кластерҳо аз миқдори атомҳои онҳо ро ташкилдиҳанда вобаста аст. Аз шумораи атомҳо ба таври даврӣ вобаста будани хосиятҳои кластерҳо истифода намуда, олимони кӯшиши сохтани қадвали геометрӣ ва электронии кластерҳо ба монанди қадвали даврии Менделев намуданд.

Ба ғайр аз кластерҳои металлӣ боз кластерҳои аз атомҳои газҳои инертӣ - аргон, криптон, ксенон таркибёфта, мавҷуданд. Дар расми 1.23 кластери аз 16 атомҳои элементи аргон иборат буда, оварда шудааст.



*Расми 1.23*

Дар қатори кластерҳои металлӣ, боз кластерҳои нимноқилиро низ ҷудо намудан мумкин аст. Кластерҳои нимноқилӣ низ дорой хосиятҳои ғайриодӣ мебошанд. Масалан, ҳангоми бо нури лазерӣ таъсир намудан, дар сохтори онҳо фрагментатсия (тақсимшавӣ) ба вуҷуд меояд, ки андозаи фрагментҳои дар ин вақт пайдо шуда, аз андозаи кластерҳои ибтидоӣ, ба интенсивият ва дарозии мавҷи афканишоти лазерӣ вобаста аст.

Дар чунин сохторҳо бандҳои химиявии ковалентӣ ё металлӣ мушоҳида карда мешавад. Яке аз хосиятҳои фарқкунандаи кластерҳои металлӣ аз материалҳои муқаррарӣ ин хело паст будани ҳарорати гудозиши онҳо мебошад. Мувофиқ наомадани нуқтаи гудозиш бо нуқтаи яхкунӣ мушоҳидаи гармиғунҷоиши манфӣ (ҳангоми интиқоли ягон миқдори гармӣ ҳарорати онҳо паст мешавад, қобилияти баланди ба реаксия дарӣ ва ғайра низ ба хосиятҳои хоси кластерҳо марбутанд.

### **§ 1.15. Методҳои тадқиқи нанообъектҳо**

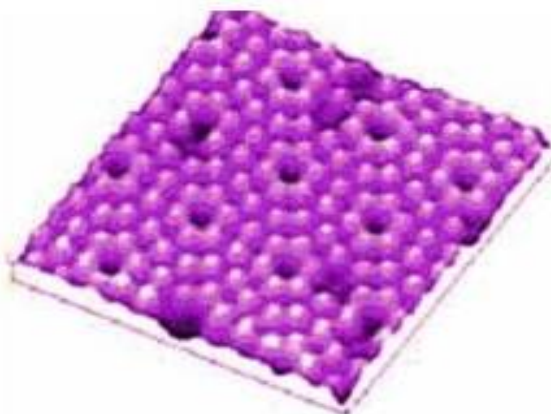
Барои таҳқиқ ва тадқиқи наноматериалҳо методҳои гуногуни ба монанди: дифраксияи электронӣ, методи микроскопи сканерӣ - зондӣ, спектроскопияи рентгенӣ, спектроскопияи электронӣ, спектроскопияи

оптикӣ, резонанси электронӣ-парамагнитӣ, нейтронография ва ғайра истифода мешаванд. Дар замони муосир, олимон методҳои нави тадқиқи нанообъектҳо коркард карда истодаанд.

**Методи микроскопияи зондӣ - сканерӣ.** Методи микроскопияи зондӣ - сканерӣ методи анъанавии тадқиқоти нанообъектҳо буда, бо сохтани микроскопҳои навӣи зондӣ - сканерӣ алоқаманд мебошад. Намудҳои зерини микроскопҳои шакли зондӣ - сканерӣ мавриди истифода қарор доранд:

- зонди тунелӣи сканерӣ;
- зонди атомӣ-қуввагӣ;
- зонди-оптикӣ;
- зонди магнитӣ-қуввагӣ;
- зонди электросатикӣ-қуввагӣ;

**Микроскопи тунелӣ - сканерӣ.** Микроскопи навӣи тунелӣ - сканерӣ (МТС, Scanning Probe Microscopy) - ро соли 1982 Г. Бинниг ва Г. Рорер ихтироъ намудаанд. Онҳо бо ёрии МТС якумин маротиба тасвири сатҳи элементи тилло ва баъдтар тасвири сатҳи элементи кремниро мегиранд (Расми 1.24), ки дар ин тасвир атомҳои алоҳида хеле хуб мушоҳида мешаванд. Барои ин ихтироъ муаллифон соли 1985 бо Ҷоизаи нобелӣ қадрдонӣ шуданд. Принсипи кори МТС ба туннелонидани электронҳо ба воситаи монетарии вакуумӣ асос карда шудааст, ки он ба қонунҳои физикаи квантӣ итоат мекунад.



**Расми 1.24**

Узви кори асосии МТС ин зонд мебошад, ки ҳамчун сӯзани металии интиқолдиҳандаи ҷараёни электрӣ (ҳамчун ноқил) хизмат мекунад. Зонд ба сатҳи тадқиқшанда (намуна) то ба 0,5 нм наздик карда мешавад ва ҳангоми ба он гузоштани шиддати доимӣ ( $U=0,01...10V$ ) байни зонд ва сатҳ ҷараёни тунелӣ ҳосил мешавад, ки қимати ҷараёни тунелӣ ба таври экспоненсиалӣ аз масофаи байни зонд ва намуна вобастагӣ дорад (Дар боби II дар ин бора сухан меравад). Яъне, ҳангоми зиёд кардани масофаи байни зонд ва намуна ба андозаи 0,1 нм ҷараёни тунелӣ тахминан 10 маротиба кам мешавад. Маҳз чунин эффект имконият медиҳад, ки МТС қобилияти баланди тасвир ҳосилкунӣ дошта бошад. Аз қимати бузургии ҷараёни тағйирёбанда бо ёрии барномаҳои

намоишдиҳӣ (визуалӣ) дар компютер тасвири сатҳи намуна ҳосил карда мешавад.

Вобаста ба речаи сканеронидан ду варианти кори МТС вучуд дорад.

1. Зонд дар баландии муайян аз сатҳи намуна доимӣ нигоҳ дошта шуда, дар ҳамвориҳои уфуқӣ намуна ҳаракат мекунад, дар ин маврид ҷараёни тунелӣ тағйир меёбад.

2. Дар речаи дигар, баръакс ҷараёни тунелӣ доимӣ нигоҳ дошта мешавад. Яъне зонд дар сатҳи намуна ҳаракат дода мешавад.

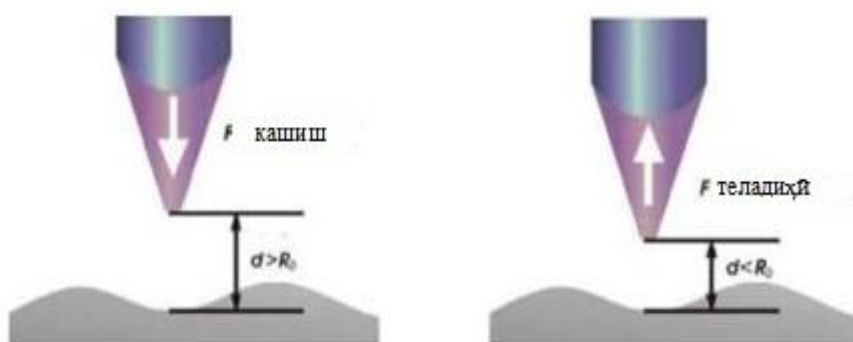
Ҷузъи муҳими кори микроскопи тунелӣ - сканерӣ ин манипулятори механикӣ мебошад, ки вазифаи он ба ҳаракат даровардани зонд дар рӯи сатҳ, бо саҳеҳияти аз ҳазорҷақ ҳисаи нанометр иборат мебошад. Истифодаи МТС имконият медиҳад, ки тадқиқотҳо барои атомҳо ва молекулаҳои алоҳида, нанокластерҳо ва мушоҳидаи протсессҳои сатҳӣ, дар сатҳи атомҳо гузаронида шаванд. МТС метавонад барои сохтани сатҳҳои сунъӣ бо методи ҳаракат додани атомҳо аз як нуқта ба нуқтаи дигар, истифода шавад.

Бо вучуди ҳамаи ин методи МТС, дорои маҳдудиятҳо мебошад. Ин методи тадқиқотӣ, асосан барои материалҳое, ки ҷараёни электрро хуб мегузаронанд истифода мешавад ва барои дигар материалҳои ҷараёни электрро бадгузаронанда ва ё умуман нагузаронанда, истифода намешавад.

### § 1.16. Микроскопи атомӣ - қуввагӣ

Камбудии микроскопи навъи зондӣ - тунелӣ сабабгори сохтани микроскопҳои шакли нав атомӣ - қуввагӣ (МАК) шуд (1986). Принсипи кори микроскопи атомӣ - қуввагӣ, ба микроскопӣ зондӣ - тунелӣ монанд буда, ба истифодаи қувваи бандҳои байни атомӣ асоснок карда шудааст.

Дар масофаҳои кӯтоҳ (қариб 1 нм) байни атомҳои дохили қувваҳои талафӣ ва дар масофаҳои чанде калонтар қувваи кашиш (қозиба) таъсир мекунад (Расми 1.25).



Расми 1.25

Дар микроскопҳои навъи атомӣ-қуввагӣ, ба сифати чунин ҷисмҳо - сатҳи тадқиқшаванда ва зонди нӯгтези дар рӯи сатҳ ҳаракаткунанда, яъне зонд ба ҳисоб меравад. Ба сифати зонд дар микроскопҳои шакли атомӣ - қуввагӣ, алмоси сӯзаншакл истифода мешавад. Ҳангоми ҳаракати зонд дар рӯи сатҳ, аз ҳисоби тағйирёбии қувваи байни атомии сатҳ ва зонд

пружинае, ки ба он зонд мустаҳкам карда шудааст, ба ҳаракат мебарояд ва онро ҳисобкунак (датчик) ба қайд мегирад. Бузургии тағйирёбии дарозии пружина дар бораи релефи сатҳ, маълумот медиҳад.

Дар расми 1.26 хати қач вобастагии қувваи байни атомиро аз масофаи байни зонд ва намуна нишон медиҳад. Бо наздик кардани зонд ба намуна атомҳои зонд бо атомҳои намуна ҷазб мешаванд ва боз дар идома наздиктар кардани зонд боиси аз ҳисоби қувваҳои электростатикӣ суст шудани қувваи кашиш мешавад.



Расми 1.26

Дар масофаҳои  $2$  нм ин қувваҳо ҳамдигарро компенсатсия мекунанд. Қимати адади қувваи ба қайд мегирифтаи МАҚ дар шакли математикии

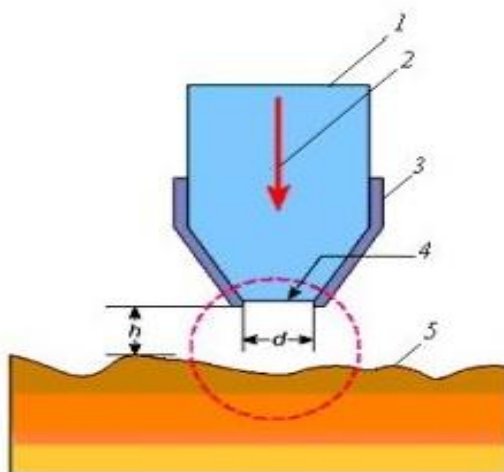
$$F = \frac{C_1}{R^{13}} + \frac{C_2}{R^7}$$

аст, дар он  $C_1$  ва  $C_2$  бузургиҳои доимӣ, аъзои яқум қувваи теладиҳандаи аз наздик таъсиркунанда ва аъзои дуҷум қувваи кашиши аз дуртаъсиркунандамебошанд.

### § 1.15. Микроскопи оптикӣ-сканерӣ

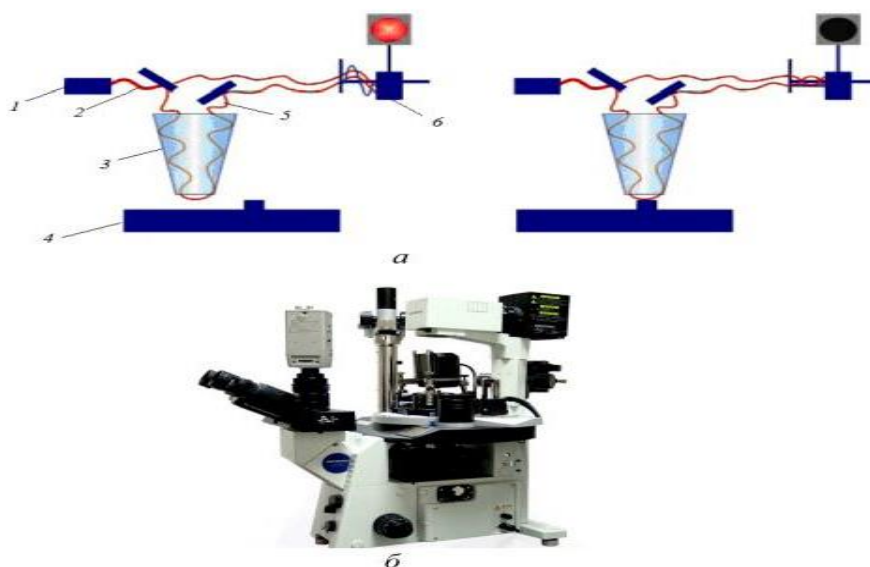
Принсипи таъсири микроскопи оптикӣ - сканерӣ (МОС) ханӯз соли 1928 ба таври назариявӣ пешниҳод шуда, конструксияи аввалини он 1956 ва нахустин таҷрибаҳо дар соли 1972 ба амал бароварда шуда буданд.

Принсипи таъсири МОС ба микроскопҳои типии зондӣ - тунелӣ монанд буда, дар он ба сифати зонд «сӯзани шаффоф»-и хело борики аз нахи оптикӣ истифода мешавад. Ба ҷои ҷараёни тунелӣ тағйирёбии характеристикаҳои нури лазерии аз вай гузаранда ба қайд гирифта мешавад. Дар расми 1.27, схемаи шаклгирии сигнал дар микроскопи оптикӣ - сканерӣ нишон дода шудааст: 1) тори оптикӣ, 2) нури (афканишоти) аз зонд гузаранда, 3) рӯпӯши металлӣ, 4) апертуари бароматдгоҳи зонд:  $d \ll \lambda$  ва 5) сатҳи намунаи тадқиқшаванда:  $h -$  масофаи байни намуна ва апертуар:  $h \ll \lambda$



**Расми 1.27.**

Зонди МОС сӯрохии (диафрагмаи) диаметраш 10....100 маротиба аз дарозии мавҷ хурдро дорад, ки он қобилияти ҷудокунии асбобро муайян мекунад. Зонд ба сатҳи намунаи омӯхташаванда то масофаҳои аз дарозии мавҷ хурд наздик карда мешавад гӯё ки сатҳро «ҳис» мекарда бошад. Яъне принципи кори МСО бо он алоқаманд аст, ки дар масофаҳои бисёр кӯтоҳ аз сатҳ мавҷҳои рӯшноии пурра инъикос шуда пайдо мешаванд, ки интенсивнокии чунин мавҷҳо бо каме зиёд шудани масофа ногаҳон хурд мешавад. Ин тағйирёбиро қабулкунак (приёмник) ба қайд мегирад ва барои сохтани тасвири релефи сатҳ истифода мешавад.



**Расми 1.28.**

Дар расми 1.28 (а) принципи кори МСО нишон дода шудааст: 1) лазер, 2) нури лазер, 3) тори оптикӣ (оптоволокно), 4) намуна, 5) рӯшноии инъикосшуда, 6) фотоприёмник ва расми 1.28. (б) намуди умумии МОС.

Бартарии МОС дар он аст, ки истифодаи мавҷи рӯшноӣ ба объект (дар муқоиса микроскопи атомӣ-қуввағи, ки метавонад ба он зарари механики расонад) «осеб» намерасонад. Аз ин ҷиҳат МОС барои омӯختани биообъектҳо хизмати идеалӣ мекунад.



## Боби II. АСОСҲОИ ФИЗИКАИ КВАНТӢ

### § 2.1. Таърихи мухтасари физикаи квантӣ

Оид ба табиати рӯшноӣ ханӯз дар асри XVIII ду назарияҳои гуногун вучуд доштанд, ки онҳоро назарияҳои корпускулавӣ ва мавҷии рӯшноӣ номиданд. Ин назарияҳо хосиятҳои мухталифи рӯшноиро дар муҳитҳои гуногун тавсиф медиханд. Поягузори назарияи корпускулавии рӯшноӣ олими англис И.Нютон ва бунёдгузори назарияи мавҷии рӯшноӣ физики ҳолландӣ Х.Гюгенс мебошад ва мувофиқи тадқиқоти Ч.Максвелл рӯшноӣ мавҷи электромагнитӣ аст.

Мувофиқи назарияи корпускулӣ рӯшноӣ сели зарраҳоест, ки аз манбаъ ба ҳама тараф паҳн мешавад ва мутобиқи назарияи мавҷӣ рӯшноӣ хангоми паҳн гаштан чун мавҷ рафтор мекунад. Бояд қайд кард, ки ҳодисаҳои тасдиқунандаи хосияти дуалистии рӯшноӣ баъд аз пайдоиши ин фарзияҳо кашф гардиданд. Ба ин гурӯҳи ҳодисот интерферансия, дифраксия, поляризация, дисперсия, фотоэффект, комптонэффект, пароканиши афканишоти ренгенӣ ва ғ. тааллуқ доранд. Омӯзиши ҳодисаҳои интерферансия, дифраксия, поляризация ва дисперсия ғалабаи назарияи мавҷии рӯшноиро таъмин намуданд. Дар натиҷаи омӯзиши таркиби дастаи рӯшноӣ ва таъсири он ба муҳитҳои мухталиф ҳодисаҳои фотоэффект, комптонэффект ва пароканиши афканишоти ренгенӣ кашф гардиданд. Маънидоди чунин ҳодисаҳо ба воситаи муодилаҳои электромагнитии Максвелл имконнопазир буда, дар фаҳмиши умумӣ онҳо ба ҳодисоти тасдиқунандаи хосияти мавҷии рӯшноӣ зид мебошанд.

Чунин зиддиятро соли 1900 фарзияи пешниҳод намудаи физики олмонӣ М.Планк бартараф кард. Мувофиқи фарзияи Планк рӯшноӣ аз модда бифосила не, балки ба таври фосиланок ё дискретӣ (бо порсия (квант) - ҳои алоҳида) афканда мешавад. Мавриди зикр аст, ки истилоҳи квант аз калимаи латинии «quantum» гирифта шуда, маънояш «порсия», «ҳисса» мебошад ва сониян квантҳои рӯшноиро фотонҳо номиданд. Фотон зарраи махсусест, ки ҳамеша дар ҳаракат мебошад. Энергияи кванти рӯшноӣ ё фотон (E) бо басомади лапиш ( $\nu$ ) мутаносиб аст:

$$E = h \cdot \nu$$

дар ин ҷо  $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Ҷ·с доимии Планк аст. Импулси фотон (P) бошад, аз рӯи формулаи зерин муайян карда мешавад.

$$P = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}$$

дар ин ифода  $\lambda$  - дарозии мавҷ ва  $c$  - суръати паҳншавии рӯшноӣ дар вакуум ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с) мебошад.

Фарзияи Планкро Эйнштейн инкишоф дода, соли 1905 назарияро пешниҳод намуд, ки мувофиқи он рӯшноӣ на танҳо бо квантҳо афканда мешавад, балки бо квантҳо фуру бурда мешавад ва инчунин, ба ҳамон гуна квантҳо низ густариш меёбад. Соли 1909 Эйнштейн раванди

афканишотро тадқиқ карда, дар як вақт ҳам хосияти корпускулавӣ ва ҳам хосияти мавҷӣ доштани рӯшноиро (хосияти дуалистии рӯшноӣ) собит намуд. Баъдтар маълум гардид, ки тавсифдиҳандагони хосияти корпускулавию рӯшноӣ энергияву импульс ва параметрҳои хосияти мавҷии рӯшноӣ басомаду дарозии мавҷ мебошанд.

Ҳамин тариқ, доираи объектҳои омӯзиши микролам васеъ гардида, дар натиҷаи ҷустуҷӯҳои зиёди физикӣ тасдиқ шуд, ки ҳамаи микрозарраҳо ҳам хосияти корпускулӣ ва ҳам хосияти мавҷӣ дошта, вобаста ба шароитҳои беруна метавонанд ҳам зарра ва ҳам мавҷ бошанд.

Баъд аз якҷояшавии модели ядроии атом бо назарияи квантии рӯшноӣ, дар пешрафти илми физикаи муосир як қатор кашфиёт ва дастоварҳои назаррас ба вучуд омаданд. Дар баробари чунин пешравию дастоварҳо, инчунин дар физика як қатор проблемаҳои ҳалталаб низ арзи вучуд карданд, ки барои ҳалли онҳо механикаи классикии Нютон, назарияҳои электростатикии Кулон ва электродинамикии Максвелл очиз мемонданд. Сипас, олимони соҳаи физикаро лозим омад, ки барои баргараф намудани чунин мушкилот назарияи ҷадиду мукамалтареро тарҳрезӣ намоянд.

Ва ҳамин тавр механикаи мавҷӣ (механикаи квантӣ) ба миён омад. Дар механикаи квантӣ мафҳуми масир (роҳи ҳаракат, троектория) - и ҳаракат вучуд надорад ва ба ҷои он истилоҳи эҳтимолият дохил карда шудааст. Дар ин қисми физика мафҳуми эҳтимолияти микрозарраҳо дар ин ё он нуқтаи фазо дар лаҳзаи дилхоҳи вақт бештар истифода бурда мешавад, ки ин бесабаб нест. Ду мисоле, ки дар поёни параграф дар бораашон маълумот медиҳем ба ин суҳанон тақвият башида, сабабҳои пайдоиши механикаи квантиро ҳамчун илм шарҳу эзоҳ медиҳанд.

Қадами аввалинро барои бунёди илми нав физики олмонӣ В.Гейзенберг ва олими австриягӣ Э.Шредингер гузоштанд. Онҳо солҳои 1925-1926 назарияи навро пешниҳод намуданд, ки он ҳаракати микрозарраҳоро ифода мекард. Дар асоси ҳамин назарияи пешниҳод намудаи онҳо, соли 1933 илми нав - механикаи квантӣ мавриди омӯзиши ҳамачониба қарор гирифт. Мафҳуми механикаи квантӣ аз мафҳуми механикаи классикӣ ба кулӣ фарқ мекунад. Гейзенберг соли 1927 имконияти ҷенкунии координата ва импульси электронҳоро таҳлил намуда, ба хулосае омад, ки дар механикаи квантӣ имконияти дар як вақт ҷен кардани координата ва импульси зарраҳои бунёдӣ ҷой надорад. Ин маҳдудият ба дуализми корпускулӣ - мавҷии зарраҳо алоқаманд буда, баъдтар номи таносуби номуайянии Гейзенбергро гирифт ва навишти математикии он чунин аст:

$$\Delta x \cdot \Delta P_x \geq \hbar/2$$

дар ин ҷо  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Ҷ·с буда, доими нави Планк ном дорад.

Аз рӯи ин ифода маълум аст, ки агар дар фазо координатаи мавҷи микрозарра ҷӣ қадар аниқ муайян карда шавад, он гоҳ номуайянии импульси он ҳамон миқдор зиёд мегардад ва баръакс. Аз ин сабаб, таносуби номуайянии Гейзенберг чунин маъноро ифода мекунад: «Ҳеҷ гоҳ дар як вақт координата ва импульси зарраҳо аниқ муайян кардан

мумкин нест». Таносуби номуайянии мазкур меъёр (критерия) -и татбиқи механикаи классикӣ дар ифодаи микрозарраҳо ба шумор меравад. Ҳамон як микрозарраро дар як маврид ҳамчун зарраи классикӣ ва дар мавриди дигар чун зарраи квантӣ дида баромадан мумкин аст. Барои мисол, рафтори электронро дар лӯлаи электроншӯи телевизор бо ёрии қонуниятҳои механикаи классикӣ ифода кардан мумкин аст, чун ки номуайянии координатаи электрон ҳангоми афтидан дар экрани лӯла ба сифати тасвир таъсир намерасонад. Аммо рафтори электронро дар атом механикаи классикӣ ифода карда наметавонад, чун ки дар дохили атом ҳангоми калон будани номуайянии импульси электрон, номуайянии координатаи он ба андозаи ҳуди атом баробар аст. Дар чунин ҳолат масири ҳаракат маънои физикии худро гум мекунад.

Концепсияи дуализми корпусулавӣ - мавҷии микрозарраҳо дар физикаи муосир масъалаи умумӣ гардид, чун ки ҳамаи объектҳои маводӣ ҳам хосияти корпусулавӣ ва ҳам хосияти мавҷӣ доранд. Қонунҳои механикаи квантӣ ташкилдиҳандаҳои асосӣ барои омӯзиши сохтори моддаҳо ба ҳисоб мераванд. Қонуниятҳои мазкур имконияти фаҳмонидани сохти атомҳо, барқарор кардани робитаҳои химиявӣ, маънидод намудани ҷойгиршавии элементҳои системаи даврӣ, сохтори ядрои атомҳо, омӯзиши хосиятҳои зарраҳои бунёдӣ ва ғайраро фароҳам меоваранд.

## § 2.2. Гипотезаи Луи де-Бройл



Қадами навбатӣ ва устуворро дар инкишофи концепсияи дуализми корпусулӣ - мавҷии рӯшноӣ соли 1924 физики фаронсавӣ Луи де Бройл гузошт. Де Бройл фарзияро пешниҳод намуд, ки мувофиқи он на танҳо фотон, балки электрон, протон, нейтрон ва дигар зарраҳои бунёдӣ низ дорои хосиятҳои корпусулавӣ ва мавҷӣ ҳастанд. Мувофиқи фарзияи де Бройл ба ҳар як микрообъект ҳам тавсифдиҳандаҳои корпусулӣ ( $E$  ва  $P$ )

ва ҳам параметрҳои хосияти мавҷӣ ( $v$  ва  $\lambda$ ) хос мебошад. Айнан ҳамин тавр, ҳамаи зарраҳои бунёдӣ, ки соҳиби массаи доимӣ ва ҳаракат ҳастанд, дарозии мавҷҳои мувофиқро доро мебошанд.

Соли 1927 физикҳои амрикоӣ К.Дэвиссон ва Л.Чермер дар таҷрибаи худ дурустии фарзияи де Бройлро исбот карданд. Онҳо дар таҷрибаи хеш инъикоси электронҳоро аз монокристаллҳои гуногун тадқиқ карданд. Ин физикдонҳо манзараи дифраксионии электронҳои инъикосгардидаро ба қайд гирифта, мушоҳида намуданд, ки электронҳои инъикосшуда хосияти мавҷиро зоҳир менамоянд. Баъди ин ҳодиса дар таҷрибаҳои мухталиф хосияти мавҷии атом ва молекулаҳо ба қайд гирифта шуданд.

Физики фаронсавӣ, барандаи Ҷоизаи нобелӣ (1929), узви Академияи илмҳои Фаронса (1933) ва яке аз поягузори механикаи квантӣ Луи де Бройл (1892-1987) муаллифи бисёр корҳо дар бораи масъалаҳои бунёдии назарияи квантӣ буда, гипотезаи хосиятҳои мавҷии зарраҳои модда

(мавчи де Бройл)-ро, ки ба рушди механикаи квантӣ замина гузошт, пешниҳод намуд. Де Бройл идеяро пешниҳод мекунад, ки мувофиқи он на ин ки танҳо рӯшноӣ, балки дигар ҷисмҳои маводӣ, низ дорои хосияти мавҷӣ мебошанд. Мувофиқи ақидаи  $\bar{u}$  мавҷи зарраи озод ҳаракаткунанда, мавҷи ҳамвори монохроматӣ мебошад:

$$\psi(r, t) = A \exp i(kr - \omega t)$$

дар ин ҷо параметрҳои мавҷӣ-басомад ва дарозии мавҷро бо параметрҳои механикӣ - импульс ва энергияровобастагии зерин доранд:

$$\omega = \frac{E}{\hbar}, k = \frac{P}{\hbar}$$

Ҳарчанд гипотезаи де Бройл табиати мавҷӣ доштани зарраҳо шарҳ диҳад, вале дар бораи табиати худ мавҷ маълумот намедиҳад. Дар ҳақиқат ҳеч гоҳ хосияти мавҷҳои де Бройлро бо хосияти мавҷҳои ягон муҳити маводӣ монанд пиндоштан мумкин нест. Баъзе хосиятҳои мавҷҳои де-Бройлро дар зер дида мебароем.

Соли 1926 М.Борн ақидае пешниҳод мекунад, ки мавҷҳои де-Бройл худ ба худ ҳеч мазмуни физикӣ надошта, танҳо квадрати модули вай  $|\psi(r, t)|^2$  зичии эҳтимолияти ҷойгиршавии зарра дар ин ҷо он нуқтаи фазои координатааш -  $r$ , дар ягон моменти вақти -  $t$  ифода мекунад.

### § 2.3. Функцияи мавҷӣ

Ҳангоми дида баромадани гипотезаи де-Бройл мо пай бурдем, ки ҳангоми омӯштани хосиятҳои физикӣ микрозарраҳо, қонуниятҳои физикаи классикӣ истифода намешаванд. Яъне, барои физикаи квантӣ ҳамчун бахши нави физика зарур шуд то апарати математикӣ нав бунёд карда шавад. Дар инҷо мо бо яке аз мафҳумҳои аввалиндараҷаи механикаи квантӣ-функцияи мавҷӣ ё функцияи ҳолат шинос мешавем.

Функцияи мавҷӣ ин модели математикӣ мебошад, ки тавассути он дар майдони мавҷӣ ба ҳар як зарра алоқаманд карда мешавад. Мисол, мувофиқи гипотезаи де-Бройл ба зарраи озод ҳаракаткунанда мавҷи ҳамвори монохроматӣ вобаста карда мешавад. Дар ҳолати умумӣ функцияи мавҷӣ шакли мурракабро дорад.

Бигзор  $\psi(r, t)$ , функцияи мавҷии маълум бошад. Эҳтимолияти мавҷудияти зарра дар лаҳзаи вақти  $t$  дар элементи ҳаҷми  $dV$  бо формулаи

$$dW = |\psi(r, t)|^2 dV \quad (2.1)$$

муайян карда мешавад. Аз формулаи (2.1) истифода намуда, ҳосил кардан мумкин аст:

$$\frac{dW}{dV} = |\psi(r, t)|^2 = w \quad (2.2)$$

дар ин ҷо  $w$  - зичии эҳтимолиятро ифода мекунад. Ҳамин тавр функцияи ҳолат функцияи комплексие аст, ки квадрати модули он ба

$$|\psi|^2 = \psi^* \psi$$

баробар аст. Дар инҷо  $\psi^*$  - функсияи мавҷии ҳамроҳкардашудаи комплексӣ номида мешавад. Аз тарафи дигар функсияи ҳолатро ҳамма вақт дар намуди

$$\psi = K(x, y, z, t)e^{i\alpha(x, y, z, t)} \quad (2.3)$$

ифода намудан мумкин аст, ки дар он  $R(x, y, z, t)$  - модули функсия,  $e^{i\alpha(x, y, z, t)}$  - зарбшавандаи фазавӣ номида мешавад.

Аз формулаи (2.1) истифода намуда,  $\psi$  - ро маълум дониста, дар ҳаҷми ихтиёри  $V$  эҳтимолияти мавҷудияти зарраро доништан мумкин аст.

$$W = \int_V |\psi|^2 dV \quad (2.4)$$

Интеграл аз тамоми ҳаҷм ба як баробар мешавад, яъне

$$\int_V |\psi|^2 dV = 1 \quad (2.5)$$

Баробарии (2.5)-ро шартҳои нормиронидани функсияи мавҷӣ меноманд.

## § 2.4. Муодилаи Шрёденгер

Муодилаи мазкур ба шарафи номи физики австриягӣ, барандаи Ҷоизаи нобелӣ (1933), узви хориҷии Академияи илмҳои ИҶШС (1934), яке аз бунёдгарони механикаи квантӣ ва кашшофи ҳамин муодила Эрвин Шрёденгер (1887-1961) номгузорӣ шудааст.



Шрёденгер дар соҳаи механикаи мавҷӣ, ки он дар асоси назарияи квантӣ ва механикаи матритсавӣ ташаккул ёфта, ба рушди назарияҳои муосири физикаи имрӯза заминаи муосид фароҳам овардааст, ба як қатор натиҷаҳои назаррас ноил гардид ва усулҳои ҳалли як қатор масоили муҳталиф, аз ҷумла муодилаҳои мавҷӣ (муодилаи статсионарии аз вақт вобастаи Шрёденгер)-ро нишон дод.

Маълум аст, ки дар механикаи классикӣ ҳолати механикии нуқтаи материалӣ дар ҳар як лаҳзаи вақти  $t$  бо ёрии муодилаи кинематикии  $r = r(t)$  ифода карда мешавад. Дар механикаи квантӣ бошад вазифаи муодилаи  $r = r(t)$  - ро функсияи мавҷии  $\psi = \psi(r, t)$  иҷро мекунад.

Ҳадафи асосии механикаи классикӣ, ин ҳалли муодилаи кинематикии нуқтаи материалӣ, ки таҳти таъсири қувваи гузошта шуда дар ҳаракат аст, яъне дар ин ҳолат муодилаи қонуни дуҷуми Нютон ҳал карда мешавад. Айнан ҳамин тарз дар механикаи квантӣ, функсияи ҳолати микроразраи дар майдони қуввагии додашуда ҳаракаткунанда, бо ёрии муодилаи Шрёденгер ҳал карда мешавад, ки он шакли математикии зеринро дорад:

$$i\hbar \frac{d\psi}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\psi + U(x, y, z, t)\psi \quad (2.6)$$

Муодилаи Шрёденгер муодилаи дифференсиалии якҷинса бо ҳосилаҳои хусусӣ мебошад, ки дар он  $\mathbf{i}$  - адади мавҳум,  $\Delta$  - оператори Лаплас,  $m$  - массаи зарра,  $\psi$ -функсияи мавҷӣ,  $U(x, y, z, t)$  - энергияи потенциалии зарра дар майдони беруна. Барои ҳалли умумии муодилаи Шрёденгер шартҳои ибтидоии  $\psi(x, y, z, 0) = f(x, y, z)$  - дохил карда мешавад.

**Ҳолати статсионарӣ.** Ҳаракати зарраро дар майдони потенциалии статсионарӣ дида мебароем. Яъне дар ҳолати статсионарӣ энергияи потенциалӣ аз вақт вобаста нест:  $U = U(x, y, z)$ . Мавриди иҷро шудани ин шарт, муодилаи Шрёденгерро ба ду муодилаҳои алоҳида ҷудо намуда, ҳал намудан мумкин аст. Барои ин функсияи мавҷиро дар шакли

$$\psi(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z)f(t)$$

навишта ва онро ба муодилаи (2.6) гузошта ҳосил мекунем: дар ин ҷо  $\psi(x, y, z, t)$  - функсияи мавҷии аз координат ва  $f(t)$  - функсияи мавҷии аз вақт вобаста буда, мебошанд.

$$i\hbar\varphi \frac{df}{dt} = f\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + U\right)\varphi \quad (2.7)$$

(2.7) - ро ба  $\varphi f$  тақсим намуда,

$$\frac{i\hbar}{f} \frac{df}{dt} = \frac{1}{\varphi} \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + U\right)\varphi \quad (2.8)$$

ҳосил мекунем. Дар қисми ростии баробарии (2.8), ишораи

$$\frac{i\hbar}{f} \frac{df}{dt} = E \quad (2.9)$$

ворид мекунем. Аз сабаби он, ки дар қисмҳои чап ва ростии (2.8) тағйирёбандаҳои бо ҳам новобаста истодаанд, пас қисми рост низ ба

$$\frac{1}{\varphi} \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + U\right)\varphi = E \quad (2.10)$$

баробар мешавад. Ҳамин тавр муодилаи (2.8) ба ду муодилаҳои новобаста ҷудо шуд. Ҳалли умумии муодилаи (2.9) шакли  $f = Ce^{-i\omega t}$  - ро дорад, ки дар он  $\omega = \frac{E}{\hbar}$ . Муодилаи (2.10) муодилаи стационарии Шрёденгер номида мешавад. Онро одатан башакли

$$\Delta\varphi + \frac{2m}{\hbar^2}[E - U]\varphi = 0$$

оварда менависанд. Он гоҳ, функсияи мавҷӣ дар ҳолати статсионарӣ

$$\psi(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z)e^{-\frac{i}{\hbar}Et}$$

мешавад.

## § 2.5. Ҳаракати озоди зарра

Дар ҳолати содда ҳаракати зарраро дар як самти тири координатӣ дида мебароем, ки ба он майдони доимии  $U(x) = U_0 = \text{const}$  таъсир мекунад.

Дар ин ҳолат муодилаи Шрёденгер шакли зеринро мегирад.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = (E - U_0) \psi(x) \quad (2.11)$$

Ҳалли ин муодила дар ҳолати  $E \geq U_0$  будан чунин мешавад:

$$\begin{aligned} \psi(x) &= \cos(kx) \\ \psi(x) &= \sin(kx) \end{aligned} \quad (2.12)$$

ки дар ин ҷо  $k = \sqrt{\frac{2m(E - U_0)}{\hbar^2}}$

Дар ин маврид энергияи зарра бо формулаи

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + U_0 \quad (2.13)$$

муайян карда мешавад.

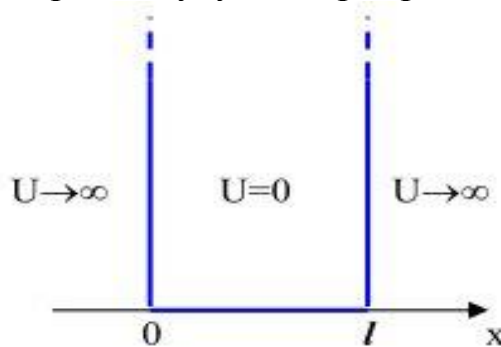
Аз формулаи  $\exp(iax) = \cos(ax) + i\sin(ax)$  истифода бурда, системаи муодилаҳои (2.12)-ро якҷоя мекунем, он гоҳ,  $\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(ikx)$ -ро мегирад.

Муодилаи аз вақт вобаста будани функсияи мавҷӣ дар шакли

$$\psi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp[i(kx - \omega t)] \quad (2.14)$$

навишта мешавад ва дар ин ҷо  $\omega = \frac{E}{\hbar}$  мебошад.

**Ҷоҳи потенциалӣ.** Ҳаракати зарраро дар ҷоҳи потенциалии беохир чуқур дида мебароем (Расми 2.1). Дар ҳолати якченака будани ҷоҳ, энергияи потенциалӣ шартҳои худудии зеринро



Расми 2.1.

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0 \\ 0, & 0 \leq x \leq a \\ \infty, & x > a \end{cases}$$

қаноат мекунонад.

Аз шартҳои худудии гузошта шуда, чунин бармеояд, ки зарра наметавонад берун аз ҷоҳи потенциалӣ қарор дошта бошад. Барои муайян кардани энергияи зарра муодилаи статсионарии Шрёдингерро истифода мебарем:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = (E - U_0) \psi(x) \quad (2.15)$$

Барои зарраи дар дохили ҷоҳ ҳаракат кунанда:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + k^2 \psi = 0 \quad (2.16)$$

дар ин чо  $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$  аст.

Барои функсияи мавҷӣ шартҳои ҳудудии

$$\psi(0) = 0, \quad \psi(l) = 0 \quad (2.17)$$

мебошад.

Ҳалли умумии (2.15) ин

$$\psi = C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx} \quad (2.18)$$

Аз шarti ҳудудии якуми (2.17) ба формулаи (2.18)  $x = 0$ , гузошта  $C_1 + C_2 = 0$ , аз инчо  $C_1 = -C_2 = C$  ва

$$\psi(x) = C \sin kx \quad (2.19)$$

ҳосил мекунем. Барои он, ки шarti ҳудудии дуюм иҷро шавад

$$k = \frac{n\pi}{a}, \quad n = 1, 2, \dots \text{ қабул мекунад.}$$

Ҳамин тавр ҳалли муодилаи (2.14), ки шартҳои ҳудудии (2.15)-ро қаноат мекунонад, ёфта шуд:

$$\psi(x) = C \sin \frac{n\pi}{a} x \quad (2.20)$$

Барои энергия ифодаи

$$E = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2ml^2} \quad n=1, 2, 3, \dots$$

ҳосил карда мешавад.

Аз шarti нормиронии функсияи мавҷи  $\int_0^a |\psi(x)|^2 dx = 1$  бо истифодаи (2.17) барои доимии интегронӣ  $C = \sqrt{\frac{2}{a}}$ -ро ҳосил мекунем. Ва дар охир барои функсияи мавҷии зарра

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi}{a} x \quad (2.21)$$

ҳосил карда мешавад.

## § 2.6. Ҷоҳи квантӣ

Риштаҳо, ҷоҳҳо ва нуқтаҳои квантӣ аз маводҳои шакли наносохторӣ мебошанд.

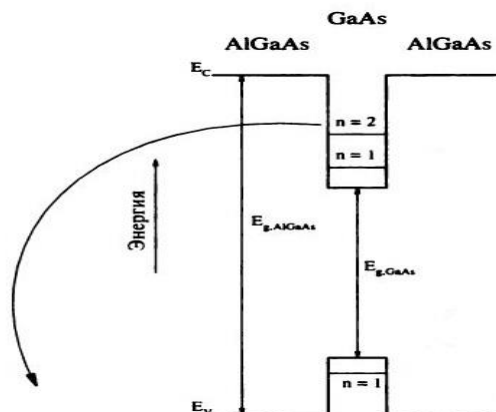
Сохторҳои, ки дар онҳо ҳаракати барандагони зарядҳо дар яке аз самтҳо маҳдуд буда, спектри энергетикӣ бо ҳаракати дар ҳамин самт вобаста буда, дискретӣ аст ҷоҳи квантӣ номида мешавад. Дар чунин сохторҳо барандагони зарядҳоро ҳамчун гази электронии дученака дида баромадан мумкин аст. Ҷоҳи квантӣ номи худро аз он гирифтааст, ки барандагони зарядҳо дар ҷоҳи потенциалии якченака ҳаракат мекунанд.

Яке аз сохторҳои васеъ истифодашавандаи нимноқилӣ ин пардаҳои сеқабатаи GaAs-и ғафсии қабатҳои наноандазагӣ дошта мебошад. Пардаҳои GaAs аз ду тараф бо ягон нимноқилӣ паҳноии зонане «манъшуда»-аш нисбатан калонтар ихота карда мешавад. Мисол, бо алюминати арсенати галӣ, ки хангоми зоннаи «манъшуда»-аш ба 2 эВ



баробар будан, зоннаи «манъшуда»-и пардаи GaAs ба 1,4 эВ баробар аст. Дар натижа профили энергияи потенциалии шаклаш росткунҷаи баландии монетааш 0,4 эВ (барои электронҳо) ҳосил мешавад.

Аз расми 2.2 дида мешавад, ки ҳаракати барандагони зарядҳо дар самти тири z - и ба ҷоҳ перпендикуляр гузошта шуда, маҳдуд буда, дар ду самтҳои дигар (x ва y) озод мебошад. Ҳолати электрон дар чунин системаҳо моро ба масъалаи кванто-механикии ҳаракати зарра дар ҷоҳи потенциалӣ меорад.



Расми 2.2

Аз механикаи квантӣ маълум аст, ки функцияи мавҷӣ ва савияҳои энергетикӣ бо ҳаракати электрон алоқаманд буда, ҳангоми беохир чуқур будани ҷоҳ бо формулаҳои

$$\psi_n(z) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi}{a} z \quad (2.22)$$

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* a^2} n^2 \quad n=1,2,\dots$$

муайян карда мешавад. Дар инҷо  $m^*$  массаи эффективии электрон ҳангоми ҳаракат дар самти тири z, а - паҳноии ҷоҳи потенциалӣ.

Функцияи мавҷии электронро дар шакли ҳосили зарби ба тирҳои алоҳида мувофиқ меомада  $\Psi = \psi_x \psi_y \psi_z$  қабул мекунем. Функцияҳои  $\psi_x$  ва  $\psi_y$  ҳалли муодилаи Шрёдингер барои зарра (электрон) озод ҳаракаткунанда буда,  $\psi_z$  ҳалли ҳамон муодила барои зарраи дар ҷоҳи потенциалӣ росткунҷа қарор дошта мебошад. Энергияи пурраи электрон:

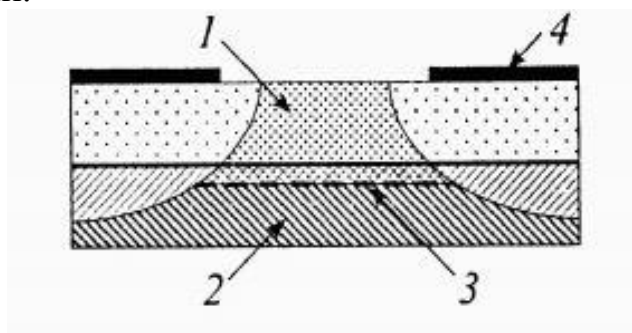
$$E(k_x, k_y, n) = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) + E_n =$$

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* a^2} n^2, \quad n=1,2,3,\dots$$

мешавад.

## § 2.7. Риштаҳои квантӣ

Сохторхое, ки дар онҳо ҳаракати барандагони зарядҳо дар як самт озод буда, дар ду самти дигар маҳдуд аст, риштаҳо ё торҳои квантӣ номида мешаванд. Ҳамин тавр спектри энергетикӣ бо ҳаракати барандагони зарядҳо алоқаманд буда, нисбати буриши арзии тор дискретӣ аст ва бо ҳаракати ҳамсамти тор алоқаманд буда, бефосила аст. Барандагони зарядҳо дар ингуна сохторҳо ҳамчун гази электронии якченака дида баромадан мумкин аст, ки он дар расми 2.3 тасвир ёфта, аз қисмҳои зерин иборат мебошад: 1) AlGaAs, 2) GaAs, 3) гази электронӣ ва 4) затвори металлӣ.



Расми 2.3.

Дар фарқият аз сохтори дар боло дида баромада шуда, ҳаракати барандагони зарядҳо дар риштаҳои квантӣ дар самтҳои  $x$  ва  $y$  маҳдуд буда, дар самти тири  $z$ , ки ба ҳамвории  $(x, y)$  перпендикуляр мебошад озод ҳисобида мешавад. Чунин мешуморем, ки потенциали маҳдудкунандаи ҳаракати электрон ин функсияи  $U = U(r)$ ,  $r = (x, y)$  мебошад мебошад. Функсияи мавҷӣ дар шакли

$$\psi(r) = e^{ik_z z} u(r)$$

навишта шуда, функсияи мавҷии  $u(r)$  аз ҳалли муодилаи Шрёдингер

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m_e} \left( \frac{d}{dx^2} + \frac{d}{dy^2} \right) + U(r) \right] u_{n_1 n_2}(r) = E_{n_1 n_2} u_{n_1 n_2}(r)$$

$n_1, n_2 = 1, 2, 3, \dots$  муайян карда мешавад.

Энергияи пурраи электронҳо дар риштаҳои квантӣ бо формулаи зерин

$$E_{n_1 n_2}(k_z) = E_{n_1 n_2} + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m_e^*} \quad (2.23)$$

ифода карда мешавад.

Ба сифати мисоли конкретӣ мо чоҳи потенциалии дученакаи беохир чуқури андозаҳои  $a_x, a_y$ -ро дида мебароем. Потенциал шакли

$$V(x, y) = 0 \quad 0 < x < a_x, \quad 0 < y < a_y$$

$$V(x, y) = \infty, \quad x \leq 0, x \geq a_x, y \leq 0, y \geq a_y$$

-ро дорад

Аз ҳалли муодилаи боло истифода намуда, энергияи квантонидашудаи электронро меёбем.

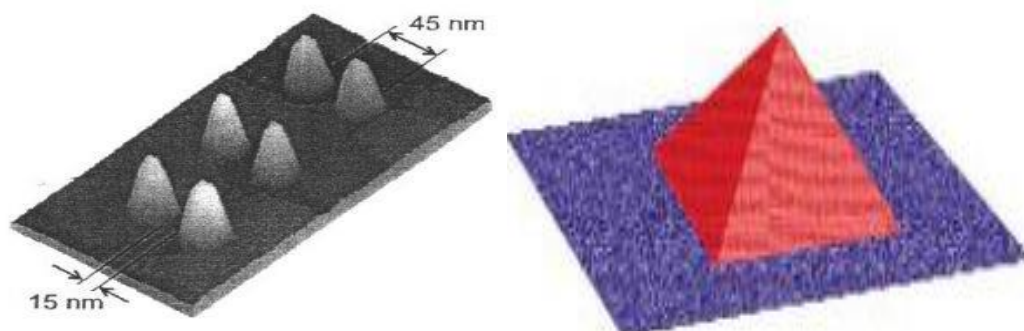
$$E_{n_1 n_2} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e^*} \left( \frac{n_1^2}{a_x^2} + \frac{n_2^2}{a_y^2} \right), \quad n_1, n_2 = 1, 2, 3, \dots$$

Дар мавриди лӯлашакл будани риштаи квантӣ муодилаҳои боло дар системаи координатаи цилиндри дар шакли функцияи Бессел ёфта мешавад.

### § 2.8. Нуқтаҳои квантӣ

Сохторҳое, ки дар онҳо ҳаракати барандагони зарядҳо дар ҳар се самтҳои тирҳои координатӣ маҳдуд карда шудааст нуқтаҳои квантӣ номида мешаванд. Яъне, дар ин гуна сохторҳо барандагони зарядҳо дар ҷоҳои потенциалии сеченака ҳаракат мекунанд.

Нуқтаҳои квантӣ сохторҳое мебошанд, ки онҳо аз шумораи зиёди ( $10^4$ - $10^6$ ) атомҳо иборат буда, андозаҳои онҳо дар ҳар се самтҳои координатӣ дар масштаби нанӣ (1-100 нм) мебошанд (Расми 2.4).



Расми 2.4

Спектри энергетикӣ барандагони зарядҳо дар нуқтаҳои квантӣ дар ҳар се самтҳо квантонида мешавад. Ва бо формулаи

$$E_{n_1 n_2 n_3} = \frac{h\pi^2}{2m_e^*} \left( \frac{n_1^2}{a_x^2} + \frac{n_2^2}{a_y^2} + \frac{n_3^2}{a_z^2} \right) n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3, \dots$$

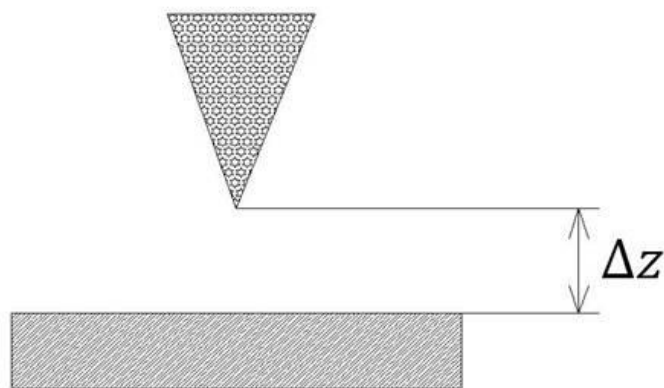
ифода карда мешавад.



Физики маъруфи рус ва сардори Раёсати Маркази илмӣ Санкт-Петербургии Академияи илмҳои Россия Жорес Алферов (зод. 1930), соҳаи корҳои тадқиқотиаш ба омӯзиши равандҳои шаклгирию хосиятҳои гетеросохторҳо бо нуқтаҳои квантӣ ва дар асоси онҳо сохтани лазерҳо ва ташаккули босуръати компонентҳои оптоэлектронӣ микроэлектронӣ равона шуда, соли 2000 бо Ҷоизаи нобелӣ машарраф гардид.

### § 2.9. Ҷараёни электрикӣ туннелӣ

Дар боло қайд карда шуд, ки принсипи кори микроскопи тунелӣ - сканерӣ ба ҳодисаи тунелонидани электрон аз монеаи потенциалии байни ду ноқил - зонд ва намуна, бо иштироки майдони берунаи электрӣ асос мешавад (Расми 2.5).

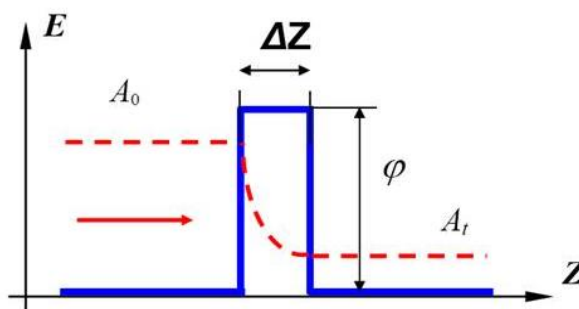


Расми 2.5

Дар микроскопи тунелӣ - сканерӣ зонд ба намуна ба масофаи  $\Delta z \approx 1 \text{ нм}$  наздик оварда мешавад. Дар ин ҳолат монсаи потенциалии паҳноиаш  $\Delta z$  (расми 2.6) ҳосил мешавад. Баландии монса қимати кори бароварди электронҳоро аз материали зонд  $\varphi_{\text{зонд}}$  ва намуна  $\varphi_{\text{намуна}}$  муайян мекунад. Дар ҳолати сода монса ро росткунҷаи баландиаш ба қимати миёнаи кори бароварди материалҳо,

$$\varphi^* = \frac{\varphi_{\text{з}} + \varphi_{\text{н}}}{2}$$

қабул мекунад.



Расми 2.6

Барои монсаи росткунҷаи якченака муодилаи Шреденгерро мо дар боло ҳал намудаем. Эҳтимолияти тунелзании электрон аз монсаи росткунҷаи якченака бо формулаи

$$W = \frac{|A_t|^2}{|A_0|^2} = e^{-k\Delta z}$$

ифода мешавад. Дар ин ҷо  $A_0$  - амплитудаи функцияи мавҷии электрони ба сӯи монса ҳаракат мекарда,  $A_t$  - амплитудаи функцияи мавҷии электрони монса ро гузашта,  $k$  - коэффисиенти хомӯшшавии функцияи мавҷӣ, ки ба

$$k = \frac{4\pi}{h} \sqrt{2m\varphi^*}$$

баробар аст,  $m$  - массаи электрон,  $\varphi^*$  - кори баромади миёнаи электрон,  $h$  - доимии Планк.

Ифодаҳои аналитикиро барои эҳтимолияти гузариши электронҳо  $W(E_z)$  тавассути монсаи потенциалии баландиаш  $V = \eta + \varphi^*$ , ки дар ин чо  $\eta$  - савияи энергияи Фермӣ аст, бо методи ВКБ (Вентсел-Крамерс-Бриллюэн) муайян намудан мумкин аст.

$$W(E_z) = \exp \left( -\frac{4\pi}{h} \sqrt{2m} \int_0^{\Delta Z} (\eta + \varphi^* - E_z)^{\frac{1}{2}} dz \right) \quad (2.20)$$

Баъди интегронидан аз (2.20) ҳосил мекунем,

$$W(E_z) = \exp \left( -\frac{4\pi\Delta Z}{h} \sqrt{2m} (\eta + \varphi^* - E_z)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (2.21)$$

Эҳтимолияти тунелзании электронҳоро тавасути монсаи потенциали доништа, миқдори электронҳои аз электроди якум  $N_1$  ба электроди дуюм гузаштара ёфтан мумкин аст.

$$N_1 = \int_0^{E_m} \vartheta_z n(\vartheta_z) W(E_z) d\vartheta_z = \frac{1}{m} \int_0^{E_m} n(\vartheta_z) W(E_z) dE_z \quad (2.22)$$

Дар ин чо  $E_z = \frac{m\vartheta_z^2}{2}$  компоненти энергияи элетрон ба самти тири  $z$ ,  $E_m$  - энергияи максималии электронҳо дар электрод,  $n(\vartheta_z) d\vartheta_z$  - шумораи электронҳои дар воҳиди ҳаҷм бо суръати  $\vartheta_z$ , ва  $\vartheta_z + d\vartheta_z$  дар ҳаракат буда.

Аз формулаи маълуми

$$n(\vartheta) d\vartheta_x d\vartheta_y d\vartheta_z = \frac{2m^4}{h^3} f(E) d\vartheta_x d\vartheta_y d\vartheta_z$$

истифода мебарем. Дар ин чо  $f(E)$ -функсияи тақсимои Фермӣ-Дирак.

Аз ин чо ифодаи

$$n(\vartheta_z) = \frac{2m^4}{h^3} \iint_{-\infty}^{+\infty} f(E) d\vartheta_x d\vartheta_y = \frac{4\pi m^4}{h^3} \int_0^{\infty} f(E) dE_r \quad (2.23)$$

$$E_r = \frac{m\vartheta_r^2}{2}, \quad \vartheta_r^2 = \vartheta_x^2 + \vartheta_y^2$$

Пайдо мешавад. Ифодаи (2.23)-ро ба (2.22) гузошта ҳосил мекунем.

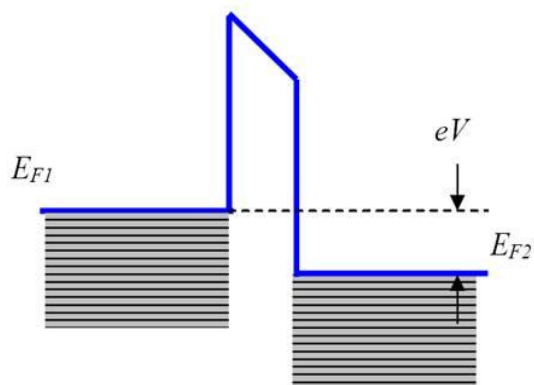
$$N_1 = \frac{4\pi m^2}{h^3} \int_0^{E_m} W(E_z) dE_z \int_0^{\infty} f(E) dE_r$$

Дар ҳолати набудани майдони электрии беруна эҳтимолияти тунелзани аз зонд ба намуна ба эҳтимолияти тунелзани аз намуна ба зонд баробар мешавад ва дар натиҷа он қимати миёнаи ҷараёни тунелӣ ба сифр баробар мешавад. Дар ҳолати баръакс, яъне ба  $V$  баробар будани фарқи потенциали байни зонд ва намуна ҷараёни тунелӣ пайдо мешавад (Расми 2.7), ки фарқи шумораи электронҳои тунелзадара аз электроди якум ба дуюм ва аз дуюм ба якум муайян мекунад.

$$J = e(N_1 - N_2) =$$

$$e r \left( \frac{4\pi m^2}{h^3} \right) \left[ \int_0^{E_m} W(E_z) dE_z \int_0^{\infty} f(E) dE_r - \int_0^{E_m} W(E_z) dE_z \int_0^{\infty} f(E + eV) dE_r \right] \quad (2.24)$$

$f(E + eV)$ -функсияи тақсимои Фермӣ-Дирак барои электроди дуюм.



Расми 2.7

Гузориши (2.21) ба (2.24) ба формулаи зерини

$$J = \frac{e}{2\pi h(\Delta z)^2} \left[ \varphi^* e^{-\frac{4\pi\Delta z}{h}\sqrt{2m\varphi^*}} - (\varphi + eV) e^{-\frac{4\pi\Delta z}{h}\sqrt{2m(\varphi^* + eV)}} \right] \quad (2.25)$$

меоварад. Формулаи вобастагии зичии ҷараёни тунелиро аз баландии монеа аввалин бор дар соли 1963 Ҷ.Г. Симонс ҳосил намуда буд.

Агар шиддат хело хурд бошад, яъне  $\varphi \ll eV$  ифода барои зичии ҷараёни электрии тунелӣ шакли нисбатан соддаро мегирад.

$$j_t = \frac{e^2 \sqrt{2m\varphi^*}}{h^2} \frac{V}{\Delta z} e^{-\frac{4\pi\Delta z}{h}\sqrt{2m\varphi^*}} \quad (2.26)$$

Барои шиддатҳои калонтар ( $\varphi \gg eV$ ) аз формулаи (2.24) формулаи

$$j = \frac{e^3 V^2}{16\pi^2 h \varphi (\Delta z)^2} e^{-4\sqrt{\frac{2m\varphi^3}{3e\hbar V}} \Delta z} \quad (2.25)$$

ҳосил карда мешавад. Формулаи (2.25) Фаулер-Нордгейм номида мешавад.

## Боби III. НАНОТЕХНОЛОГИЯ - ИЛМИ БАЙНИСОҲАВӢ

### § 3.1. Нанотехнология ва физика

Дар шароити имрӯз заминаи бунёди барои рушди нанотехнология пеш аз ҳама физика мебошад. Аз курси мактаби миёна ба ҳамагон маълум аст, ки зарраҳои асосии дохили атом электрон (-), протон (+) ва нейтрон (0) мебошанд, яъне электрон заряди манфӣ, протон заряди мусбат ва нейтрон заряд надорад. Зарраҳои зарядашонгуногун ҳамдигарро ҷазб мекунанд.

Вақте ки атомҳо бо ҳамдигар пайванд мешаванд, молекуларо ба вучуд меоваранд. Атомҳо се намуд мешаванд: атомҳои безаряд, заряди мусбат ва заряди манфӣ дошта ( $a^0$ ,  $a^+$ ,  $a^-$ ). Дар табиат 92 - хел атомҳои гуногун мавҷуд аст (92 - элемент). Ҳар кадоми ин атомҳо дар ҳастаашон миқдори гуногуни зарядҳо доранд, масалан атоми элементи аз ҳама вазнин уран 92 -заряди мусбат (протон) дорад. Атомҳои дорои заряди (+) ва (-) ионҳо ном доранд. Атомҳои манфизаряд миқдори электронашон зиёд мебошад, бинобар ин онҳо анионҳо ном доранд, акси онҳо, катионҳо (+) ном гирифтаанд, ки миқдори электронҳои онҳо каманд. Ҳамин тавр, ҳамаи ҷисмҳои дар табиат вучуд дошта, аз «ғиштча»-ҳои ҳаррангаи хурди атомҳои гуногун сохта шудаанд. Нанотехнолог бо 92 навъи чунин атомҳо (элементҳои химиявӣ) сарукор дорад, ки ҳар кадоми он шакли тақрибан курачаро дорад. Миллионҳо молекулаҳои гуногун маълум мебошанд, ки онҳоро мо модда меномем ва андозаи молекулаҳо аз як нанометр калонтар мебошад. Атомҳо дар молекулаҳо бо бандҳои химиявӣ пайванд мебошанд.

Рӯшноӣ низ яке аз омилҳои пешрафти нанотехнологӣ мебошад. Мисол, рӯшноӣ ба материя чигуна таъсир мерасонад? Рангҳои рангкунандаҳои алоҳида тавассути механикаи квантӣ метавонанд исбот карда шаванд. Масалан, молекулаҳои калони рангкунанда метавонанд газворро бо ранги кабуд ранг кунанд, ҳангоми тағйир додани сохтори ранг, вай ба ранги дигар табдил меёбад ва матоъро, масалан ранги сабз ё бунафш диҳад. Чунин модификатсия (тағйирот) андозаи нури квантиро порча - порча тағйир медиҳад ва ранги кабуд метавонад ба дигар ранг табдил ёбад. Ҳамин тавр, лампаҳои флуоресцентӣ як чанд ранг медиҳанд, чунки дар найчаи нурбароваранда тағйироти молекулаҳо ё ки наносохторҳо ба вучуд меоянд. Ҳатто аз ситораҳо равшанӣ ба мо бо рангҳои гуногун меоянд. Сабаб дар он аст, ки онҳо аз ситораҳо бо ҳарорати ҳархела ва элементҳои гуногун, ки дар атмосфераи ситораҳо месӯзанд ҷорӣ мешаванд. Ҳангоми хурд шудани объектҳои металлӣ, энергияи квантии ба онҳо истифодашаванда зиёд мешавад. Барои намуна, чӣ қадар зангула хурд бошад, энергия ва овози он баланд мешавад. Чунин тағйирот аз сохти наносохтории вай вобаста мебошад.

Имрӯз яке аз сабаби болоравии илми нанотехнология дар он аст, ки асбобҳои ба вучуд омаданд, ки бо ёрии онҳо метавон дар сатҳи наноскопӣ моддаро дид, чен намуд ва манипулятсия кард. Вобаста ба ин

чунин дастовардҳо дар соҳаҳои гуногуни саноат барои сохтани чузъҳои электронӣ ва оптикӣ, дисплейҳо, композитсияҳои полимерӣ, сенсорҳо актуаторҳо истифода мешаванд.

Транзисторҳои (асбоби нимноқилӣ, тавқиятдиҳандагони сигналҳои электрикӣ, лампаҳои электрониро ивазкунанда) бо ёрии нанотехнология аз наносохторҳои элементҳои кремний ва германий сохта шуда, дар сохтани компютерӣ нақши асосиро мебозанд. Миқдори бениҳоят зиёди чунин транзисторҳои микроскопӣ, микрочипро ба вуҷуд меоваранд. Нанотехнология чипҳои бениҳоят хурд (микросхемаҳо) ва компонентҳои онҳоро сохта метавонад (аз 100 нм хурдтар). Бори нахуст микропротсессор Intel - 4004 масоҳати аз як нохун камтарро ишғол мекард, ки 2300 транзистор дошт. Барои кори муътадили компютерҳои ҳозиразамон зиёда аз 250 ҳазор чунин микропротсессорҳо лозим меояд. Компютери Пентиум бошад, 4,42 млн транзистор дошта, Интерпентиум-3 низ бо 28 млн транзистор таъмин гаштааст. Ин нанотранзисторҳо бо схема p-p-n электронӣ сохта шудаанд. Ҳоло бошад, нанотранзисторҳои ҳамвор бо тартиби электрони p-n-p дар асоси фосфиди индий ва арсениди галлий сохта шуда, қувваи 604 ГГц - ро доранд ва аз ҳама зудфаъолияткунанда ба ҳисоб мераванд. Дар асоси онҳо микропротсессорҳои зудкоркунанда сохта шуда, компютерҳои пуриктидори эффективӣ истехсол карда мешавад. Компанияҳои нанопротсессор ва компютер бароварандаи Чопон ва ИМА 214 млрд доллари ИМА дар соҳаи наноэлектроника ғоида ба даст оварданд ва мувофиқи қонуни Мур<sup>1</sup> ин ғоида дар ҳар 1,5 сол мунтазам зиёд шудан мегирад ва соли 2016 компютерҳои электронӣ бо хурдтарин микропротсессорҳо таъмин мегарданд.

### § 3.2. Нанотехнология ва химия

Натиҷаи кандашавии бандҳои кимиёвӣ дар моддаҳо, ҷудошавии атомҳо бо зарядҳои гуногун (+ ва -) ва зинаи пайваستшавии онҳо ба моддаҳои мухталиф ба ҳосилшавии моддаҳои нав бо хусусиятҳои гуногун, реаксияҳои химиявӣ мебошад. Масалан, намаки ошӣ дар натиҷаи пайвастшавии ду атоми захрнок - металли натрий ва гази хлор ҳосил мегардад. Худи намаки ошӣ безарар мебошад ва дар шакли молекула аз ин ду атомҳои захрнок ҳосил шудааст. Бандҳои химиявӣ калиди асосии нанотехнология ҳисоб мешаванд. Ба мисли атомҳо, молекулаҳо байни худ метавонанд таъсири мутақобила дошта бошанд. Молекулаҳо дар якҷоягӣ метавонанд бо атомҳои дигар ионҳо,

---

<sup>1</sup> Қонуни мазкурро асосгузори ширкати «Intel» Гордон Мур (тав. 1929) кашф намудааст. Мур соли 1965 хангоми таъсиси ширкати «Intel» андешаи худро оид ба пешрафти сохти МЭХ ба таври мухтарсар изҳор намуд: «Бояд шумораи транзисторҳо дар чип ҳар соле ду - се маротиба зиёд карда шавад». Ин пешниҳоди Мур на танҳо дар соҳаи техникаи ҳисоббарор, балки дар тамоми соҳаҳои табиташиносӣ, техникӣ ва ҷомеашиносӣ бо номи «қонуни Мур» машҳур гардид. Асоси пешрафти қонуни Мурро камкунии доимии арзиши ҳисоббарориро ташкил медиҳад, яъне дар муддати вақти кӯтоҳ бо ҳисобкунии камтарин кори бисёр ба сомон расонида шавад. Ҳамин тавр, сарчашмаи оянданигарии оптимистона, имконияти бо роҳи сунъӣ сохтани «зеҳни сунъӣ» («artificial intelligence») ва андешидани чораҳои қатъӣ оид ба бехтаркунии тамоми технологияҳои оянда қонуни Мур номида мешавад.



молекулаҳо таъсир расонанд - ин ҳодиса бо воситаи зарядҳои электрикӣ тавассути қонуни Кулон баррасӣ мегардад. Мисол, молекулаҳои алоҳидаи об дар ҳарорати хона дар шакли газ вомехӯранд. Як чанд ва зиёда молекулаҳои обҷоя шуда, қатраи обро (моеъ) ба вучуд меоранд. Агар ин молекулаҳо хунук карда шаванд ( $0^{\circ}\text{C}$ ), об ба ях табдил меёбад, яъне саҳт мешавад. Об дар ҳолатҳои газӣ, моеъ ва ях (ҳолатҳои агрегатӣ) таркиби якхела, массаи якхела дошта (18 г), вале бо бандубаст фарқ мекунад. Дар ду мисоли овардашудаи боло молекулаҳои об дар шакли моеъ ва ях қутбҳои (+ ва -) доранд ва бо қувваҳои Кулонӣ бо ҳам пайванд мешаванд, яъне ҳамдигаро мешиносанд.

Ҳамдигарро «шинохтан»-и молекулаҳо хосияти хоси онҳоро нишон медиҳад. Равандҳои сенсории моддаҳо, ки системаи моддаҳо ба назар гирифта, хабари параметрҳои онро ба ҷои лозимӣ мерасонанд, масалан ба системаи асаб. Ҳисси шоммаи мо тавассути биосенсорҳои дар пиёзаки шоммаи димоғ ҷойгир шуда, моддаҳо аз рӯи бӯяшон мешиносанд. Ин биосенсорҳо бӯи гул, алафи нав даравидашуда, бӯи себ, дуд, бӯи маводҳои сухтаистодаро ҳис мекунанд, яъне хабари бӯро ба асаб мебаранд ва асаб ин хабарро коркард намуда, ба вай ҷавоб мегардонад ва мо чигунагии бӯро ва фарқияти онро ҳис мекунем. Сафедҳо ҳамдигарро шинохта, якҷоя шуда барои бунёди хучайра хизмат мекунанд. Онҳо элементҳои асосии нанотехнология мебошанд. Ҳамдигарро шинохтани молекулаҳо ҳамчун «чашм» барои ҷо ба ҷо гузории молекулаҳо, бунёди сатҳи болоии моддаҳо аз ҳисоби молекулаҳо (металл, пластик...), инчунин барои ҳосил намудани наноструктураҳо кӯмак мерасонанд.

Яке аз соҳаҳои муҳими нанохимия истехсоли моддаҳо бо таркиби муайяни молекулавӣ мебошад. Аксарияти нанокорҳо дар сатҳи синтези молекулавӣ барои истехсоли маводҳои тиббӣ гузаронида мешавад. Барои мисол, маводҳои тиббии пенсиллин, липитор, таксол ва ғайра маҳсулотҳои мураккаби синтези химиявианд. Дар технологияи молекулавӣ худбастакории наносохторӣ ҷой дорад ва асосаш аз он иборат аст, ки молекулаҳо дар ҳар маврид ҳаракат мекунанд, то ба сатҳи аз ҳама хурди энергетикӣ ба электронҳо муяссар гузаранд. Агар ин баррасӣ гардад, самтгардонии молекулаҳои бо ҳам пайвастгашта ба вучуд меояд. Масалан, нанозарраҳои кобалт бо ҳам пайваст гашта наноҳалқаро ба вучуд меоваранд, ки ҳамчун магнитчаҳои хурд рафтор мекунанд ва дар ду тарафи ҳалқа зарядҳои мусбату манфӣ пайдо мешаванд. Дар дохили ҳалқа майдони магнитии бузург пайдо гашта, дар беруни он бошад, ин майдон вучуд надорад. Чунин ҳалқаҳо ҳамчун элементи дарозмудати зудистифодабарандаи хотир кор мефармоянд. Ба воситаи худбастакорӣ василаи компютерҳои бахотиргиранда ва зуд ҷавобдиҳандаҳо месозанд.

Дар нанохимия полимерҳо ҷои лозимиро ишғол намуда, аз ҷиҳати массаи молекулаҳои калон мебошанд. Дар таркиби молекулаҳои метавонад миллионҳо атомҳо ҷойгир намоянд. Дар полимерҳо қисмҳои алоҳида, ки мономер ном доранд, пай дар пай пайваст шуда,

молекулаи дарози полимерро ҳосил мекунад. Ин ақсуламалро полимеризатсия меноманд, ки барои ҳосил намудани модаҳои наноандоза дошта, истифода мешаванд. Бо ҳамин роҳ полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид, зифти эпоксидӣ ва ғайраҳо истехсол карда мешаванд.

### § 3.3. Нанотехнология ва биология

Яке аз муваффақиятҳои ба даст овардаи олимон дар соҳаи бионаносенсорҳо татбиқи намудани онҳо дар стоматология мебошад. Луобии даҳони одам гулуру ғимоя ва тоза намуда, дандонҳоро муҳофизат мекунад. Дар таркиби он сафедаҳои бисёре, гормонҳо, антиҷисмҳо ва дигар модаҳои химиявӣ вучуд доранд. Нанотехнология ақсарияти касалиҳоро тавассути таҳлили луобии даҳон муайян карда метавонад.

Олимони хориҷӣ якҷанд усули ҳосил намудани порчаҳои кислотаи дезоксирибонуклеиниро (КДН, КРН) коркард намудаанд. Ин порчаҳо олигонуклеотидҳо (олиго - якҷанд) номида мешаванд (мономер - якто, олигомер-якҷандто, полимер бисёр). Дар мошинаҳои генӣ (ҳамин тавр ифода ёфтааст) барои сохтани пайдарпайии КДН (қисмҳои он) реаксияҳои химиявиро истифода мекоранд. Сохтани занҷирчаҳои КДН ин дар биотехнология барои бунёди сохторҳои нав (медикаментҳо, маводҳо, сафедаҳо) тавассути бактерияҳо амалӣ карда мешавад. Қисми синтез кардашудаи (шаблон-ген) КДН-ро ба КДН-и бактерия мечаспонанд, ки дар он нусхаи синтези сафедаи ба эҳтиёҷ мувофиқ дохил карда шудааст. Бактерия бошад, нусхаи бисёри беохири чунин сафедаро синтез мекунад. Бо чунин роҳ, ки усули биотехнологияи муҳандисӣ ном дорад, гени инсулини одамро ба КДН-и бактерия мечаспонанд, дар натиҷа бактерия гармони инсулин истехсол мекунад. Инсулин барои паст намудани миқдори қанд (глюкоза) дар хуни одам истифода бурда мешавад. Диабетикҳо наметавонанд сатҳи инсулинро дар хун идора кунанд, чунки сатҳи глюкоза дар хун тағйир ёфтани мегирад. Агар ин сатҳ хело баланд гардад, глюкоза дар хун баланд ё паст шавад, ин хатаре барои ҳаёт мегардад. Яке аз усулҳои сатҳи қандро қайд намудан, детектеронидани глюкоза (қайд намудан) мебошад. Барои ин корро амалӣ намудан наносохторҳоро истифода менамоянд ва миқдори қандро дар хун тавассути компютер муайян мекунад. Дар расми 33 сохти молекули КДН оварда шудааст.

Бадани инсон аз рӯи маълумотҳои нишондодашуда, компютери эффе́ктивӣ буда, барои интиқол ва коркарди ахбори КДН ва биохимия мураккабро истифода мекорад. Дар оянда КДН компютерҳои дорои 100 мегабайт дар ҳаҷми хурд сохта мешавад. КДН то 1 млрд. ахбори барои организм зарурро дар худ ҷой кардааст. Ҳамин тавр ӯ метавонад ҳамин миқдор хабарҳоро низ дар компютери худ ҷой намояд. Компютерҳое, ки дар асоси наноайчаҳои карбонӣ, фуллеренҳо (60, 70, 80,...) сохта мешаванд, ҳаҷман хурд буда, ҳазорҳо маротиба аз компютерҳои муқаррарӣбартарӣ доранд. Бо ёрии чунин компютерҳо ва истифодаи биосенсорҳо, зондҳо, визуализатсияи молекулавӣ ва чипҳо дар тиб

диагностикуми касалиҳо чунон авҷ мегирад, ки дар муддати кӯтоҳ то ҳазор намуди касали муайян карда мешавад ва табобати онҳо дар муддати кӯтоҳ бо усулҳои нанотехнологӣ низ баррасӣ мегардад.

### **§ 3.4. Нанотехнология ва тиб**

Нанотехнологияро барои сохтани нанозараҷаҳо, ки барои доруи муолиҷавиро ба ҷои даркорӣ бадан бурда расонидан, ки ин бо ёрии методҳои анъанавӣ номумкин аст, истифода кардан мумкин. Ҷи тавре, ки маълум аст, ҳангоми тугмаҷаи доруро фуру бурдани шахси маҷруҳ, дору ба муҳити агрессивии кислотагии хуроқалқунандаи меъда дохил мешавад, дар он ҷо вай коркард мегардад ва миқдори зиёди вай ба тағйиротҳои химиявӣ ва ферментативӣ дучор мегардад, гумон аст, ки ин дору ҳатто ба миқдори хело ками мондаш ба ҷои касали рафта мерасад ё на? Албатта миқдори доруро зиёд намудан мумкин, лекин дорухое ҳастанд, ки захрнок ҳисоб меҳуранд, бинобар ин онҳоро бо миқдори зиёд истеъмол намудан хатарнок мебошад.

Дар ин сурат истифодаи нанотехнология зарур меояд. Барои мисол, бисёри касалиҳо дохилиҳучайравӣ буда, дору бояд ба даруни ҳучайра дохил шавад, аммо дору ба ҳучайраи яклухт, ки хосияти нейтралӣ дорад ба мағзи ҳучайра тавассути пардаи он дохил шуда наметавонад. Азбаски дорухо хосияти қутбӣ доранд аз девори ҳучайра гузашта наметавонанд. Яке аз роҳҳои дохил намудани дору ба ҳучайра бо капсула ҷилд додани вай мебошад, ки дар натиҷа дору дар шакли ҷилди нейтралӣ ба ҳучайра дохил мегардад. Ҳамчун моддаи ҷилдофаранда холестерин ё наномаводҳоро истифода мебаранд.

Нанозараҷаҳои магнитӣ низ дорухоро то ҷои лозимии касалӣ мебаранд. Бо роҳи шинохтани молекулавӣ наномагнит бо дору алоқаманд карда шуда, ба бемор дода мешавад. Табиб метавонад нанодоруи магнетишударо то баҷои даркорӣ ба воситаи ба ҳаракат даровардани магнит бурда расонад, масалан тавассути ғечондани он бо ёрии металл ё бо ёрии майдони сунъии магнитӣ тавассути компютер. Нанодорухои андозаи 70 нм дошта метавонанд ба шуш, 50 нм дошта ба ҳучайра, 30 нм дошта ба хун ва ҳучайраҳои майна дохил карда шаванд.

Дар хун наносохтор бо глюкозаи хун ба реаксия дохил шуда, моддаи нав ҳосил мекунад. Биосенсори биологӣ ин моддаро қапида онро ба сигнали электрикӣ табдил медиҳад, ки онро тавассути компютер сабт мекунад ва сатҳи қандро дар хун нишон медиҳад.

Микророботҳои нанотехнологӣ ба рағҳои хунгард фиристода мешаванд, то ки онҳоро тоза кунанд, дар мағзи сар ва торҳои асаб ворид шуда, ба нейронҳо мепайванданд ва бемориҳоро скан мекунанд. Онҳо метавонанд ҳучайраҳое, ки функцияҳои онро дуруст иҷро намекунанд, иваз намоянд. Соли 1960 ин усулро Манфред Клайнс ва Натан Клайн бо истилоҳи «киборг» ҳамчун имконияти мутобиқати ҷисм ба ҳаёт дар кайҳон ба воситаи имплантҳои механикӣ пешниҳод карда буданд.

### **§ 3.5. Нанотехнология ва энергетика**

Дар соҳаи энергетика ҷорӣ намудани методҳои нанотехнологии истехсоли энергия хело муҳим буда, тахмин шудааст, ки то соли 2050 дар соҳаи энергетика тағйиротҳои кулӣ рӯй медиҳанд. Қариб ҳамаи захираҳои нафт ва газ сарф мешаванд ва инсоният рӯй ба захираҳои боқимондаҳои ангишт медиҳанд. Вале истеъмоли ангишт ҳамчун сузишворӣ ҳаворо бо моддаҳои заҳарнок омехта мекунад. Сатҳи об дар укёнусҳо ва баҳрҳо зиёд шуда, ба масофаи 80 м болои сатҳи заминро ихота мекунад. Аз ҳисоби баланд шудани ҳарорат, миллиардҳо одамон аз ҷои зисташон кӯч мебаранд. Аҳолии рӯи замин аз 6,5 миллиард ба 8 - 10 миллиард афзуда, камбағалӣ ва касалиҳо аз ҳисоби норасоии энергия зиёд мешаванд. Чунки энергия яке аз омилҳои асосии пешрафти ҷамъияти инсонӣ ҳисоб менамояд. Агар имрӯз мо фикри бартараф намудани ин мушкилиҳоро накунам, фардо дер мешавад. Дахҳо масоили ҷиддӣ имрӯз ҷомеаро ба ташвиш овардааст: норасоии энергия, ифлосии об, норасоии озӯқа, экологияи муҳити атроф, афзоиши демографӣ, касалиҳо, ҷанг ва терроризм, камбизоатӣ, бесаводӣ, беқувватӣ ва харобшавии хок...

Роҳҳои гуногуни ҳал намудани ин монегӯҳо, оид ба пайдо намудани энергия муҳокимаи умумичаҳонӣ гашта истодааст. Дар навбати аввал энергияи офтобро бояд истифода намуд. Агар андозаи Офтобро ба андозаи тӯби футбол баробар тасавур кунем, андозаи Замин нисбат ба андозаи вай нахутро менамояд. Акнун тасавур кунед, ки чи қадар фарқият дар байни онҳо дида мешавад. Ҳар рӯз 165000 тераватт ( $165 \cdot 10^{15}$  Вт) энергия аз Офтоб ба сатҳи Замин фиристода мешавад. Аз ҳамин миқдор 10 тереватташ барои эҳтиёҷ сарф мегардад. Акнун бояд фикр кард, ки чӣ тавр аз ин энергияи боқимонда истифода кард? Албатта, дар навбати аввал бояд фикри пурра истифода намудани захираи энергияи табииро андешид. Агар эҳтиёҷ ба энергияи Офтоб бимонад, бояд роҳҳои ба даст овардани онро бо истифодаи технологияи муосир бояд ҷуст. Яке аз роҳҳои қонеъ намудани талаботи аҳоли аз энергияи Офтоб истифода намудани батареяи офтобӣ мебошад. Вале вай онқадар амалишаванда намебошад. Чунки нури Офтоб болои Заминро як хел таъмин намекунад. Бинобарин мақоми истифодабарии энергияи Офтобро дар ториқӣ ё ҳавои абр ёфтани лозим меояд. Аз ин лиҳоз диққати асосӣ ба элементҳои фотоэлектрӣ дода мешавад, онҳое ки бевосита нури офтобро ба энергияи электрӣ табдил медиҳанд. Дар ин соҳа нимноқилҳо истифодаи худро меёбанд аз ҷумла нанокремний роли муҳим мебошад. Фотоэлементи кремний дар сохтумонҳои истиқоматӣ, саноати истехсоли, бозичаҳои кудакона, равшан намудани хонаҳо, калкуляторҳои дастӣ ва ғайраҳо истифода мешаванд. Нимноқил энергияро аз Офтоб қабул намуда, барангехта шуда, электронҳоро ба як тараф ва сурохиҳоро (протонҳоро) ба тарафи муқобили элемент ҷудо мекунад. Дар натиҷа онҳо регенератсия шуда, ҷараёни электрикиро ба вучуд меоваранд. Ин ҷараёни электрӣ метавонад барои эҳтиёҷ истифода бурда шавад. Механизми ҳосил намудани энергияи офтобӣ ва шамоли ҷунин аст: лавҳаи нимноқилӣ ба дараҷае тунук сохта мешавад, ки нури

равшани тавассути он дида шавад. Хангоми аз лавҳа гузаштани рушноӣ вай ҳамчун генератори хурд хизмат намуда, энергияи нури Офтобро ба энергияи электрӣ бармегардонад. Ин энергияро метавон истифода кард ва изофаашро дар аккумулятор чамъ карда, хангоми набудани рушноии Офтоб онро ҳамчун манбаи энергия истифода бурд. Неругоҳҳои шамоли низ ҳамин тавр тавассути генератор истифода мешаванд.

Дар табиат равандҳои мавҷуданд, ки рӯшноиро ба вучуд меоранд. Масалан, бактерия ва организмҳои люминесентӣ (нурафканӣ) барои коркарди рӯшноӣ сохторҳои молекулавии муайяно истифода мекоранд. Ин равшани барои равшан намудани хонаҳо дар торикӣ хело қулай мебошад, нанотехнология бошад дар ин ҳода светодиодно истифода менамояд. Светодиод шакли мухталифи фотоэлемент мебошад. Ҳоло светодиодно ихтироъ гаштаанд, ки андозаи нанозарачаҳо мекоранд ва ҳазорҳо маротиба қувваи чараёно зиёд менамоянд. Чунин нурафканҳо манбаҳои хурди электрикӣ буда, бениҳоят пурқуватанд. Онҳо барои равшан намудани хона ва воситаҳои техникаи рузгор, дисплейҳо, телефонҳои дастӣ, экранҳои ҳамвор, равшан намудани панелҳои автомобилҳо, асбобҳои электронӣ ва ғайра истифода мешаванд. Дар ин соҳа низ нанонайчаҳо истифода мекоранд, онҳо хело пуриқтидор мебошанд.

Хангоми садамаи неругоҳҳои барқтаъминкунӣ (обӣ ва атомӣ) оилаҳо бояд манбаи захиравии энергетикиро дошта бошанд, ки ақалан давоми як ҳафта тавонанд онро истифода баранд. Ҳоло ба ин мақсад батареяҳои аз литий сохта истифода мешаванд, вале онҳо дар хонаҳо ҳама бисёрро талаб мекоранд ва қиммат мебошанд (50-60 000 доллар). Ҳоло бо ёрии нанотехнология андозаи чунин батареяҳо то андозаи машинаҳои либосшуи хурд карда шуда, арзиши онҳо то ба 1000 доллар фароварда шудааст, онҳо чараёни электрикиро муддати туллони таъмин менамоянд.

### § 3.6. Нанотехнология ва экология

Тавассути нанотехнология инсон метавонад муҳити зистро аз таъсири зарарноки вобаста ба афзоиши ҳарорати атмосфераи Замин, қабати озонӣ, ифлосшавии муҳити зист аз оксиди карбон ва боронҳои кислотагӣ ҳимоя мекоранд. Ҳарорати миёнаи Замин танҳо дар 40 соли интиҳои гузашта  $0,5^{\circ}\text{C}$  баланд шудааст. Пешбинӣ шудааст, ки дар асри имрӯза ҳарорати миёнаи  $3^{\circ}\text{C}$  зиёд хоҳад шуд. Оқибатҳои бисёр нохушиҳо ҳастанд, ки ба башарият таҳдид менамоянд, аз ҷумла болоравии сатҳи баҳр аз 65 см (зери об мондани манотиқи наздизоҳили аз бисёр кишварҳо). Дар чунин ҳолат дар иқлим тағйироти ҷиддӣ ба амал омада, имконияти паст кардани таъсири гармӣ ба атмосфераи Замин ба ёрии нанотехнология аз рӯи се самт вучуд дорад:

- *ҷустуҷӯи манбаҳои алтернативии энергия,*
- *баланд бардоштани коэффисиенти кори ғоиданоки батареяҳои офтобӣ,*
- *кам кардани ғилзати карбон (IV) дар атмосфера.*

Тамомшавии қабати озон зери таъсири ба таври васеъ истифода намудани маводҳои саноатию рӯзгори маишӣ (аэрозолҳо), метавонад ба таври назаррас ба касалиҳои саратони пӯст ва сафедхунӣ тасир расонад. Аз ин рӯ, оид ба пешгирии хатари моддаҳо ва маводҳои ферионмонанд пеш аз ҳама омӯзиши усулҳои нанотехнологӣ зарур аст. Ифлосшавии муҳити зист аз ҳисоби ғилзати карбон ба пайвастагиҳои хлордори (карбогидриди хлордор ва ғ.) бо мақсадҳои саноатӣ истифодашаванда алоқаманд буда, бо ёрии нанотехнология маводҳои, ки метавонанд полимерҳои хлордорро синтез намоянд пешгирӣ карда шаванд.

Истифодаи ҳарчи бештари инсоният аз имкониятҳои техникаву технологӣ дар замони муосир боиси ифлосшавии муҳити зист гардида, масъалаҳои глобалии экологиро ба вучуд овардааст. Аз тарафи дигар олимони аз дастовардҳои нанотехнология истифода намуда, мехоҳанд онро дар ҳалли масъалаҳои экологӣ равона намоянд. Дар ин раванд чунин самтҳо роҷудо намудан мумкин аст:

- назорати вазъияти иқлимӣ бо ёрии сенсорҳои бисёрфункционалие, ки тағйирёбии параметрҳои иқлимӣ ва экологиро ба қайд мегирад;
- тоза намудани об аз моддаҳои гайр ва хатарнок;
- ҷустуҷӯ ва истифодаи сарчашмаҳои энергетикӣ аз ҷиҳати экологӣ тоза ва барқароршаванда;
- мубориза бо эффекти парникӣ;
- ҳимояи қабати озон;
- коркарди маводҳои аз ҷиҳати экологӣ тоза;
- мубориза бо боронҳои ба ном «кислотагӣ» ва ғ.

Муҳаққон аз Донишгоҳи Лехай (ИМА) барои тоза намудани оби дар истеҳсолот ва саноати кӯҳи истифода шуда, аз наноҳокаҳои оҳан истифода намуданд. Яъне онҳо қобилияти ба зудди оксидшавии оҳанро ба эътибор гирифтанд.

Яке аз масъалаҳои муҳими экологӣ ин баланд шудани ҳарорати миёнаи атмосфераи Замин мебошад, ки сабаби асосиаш зиёд шудани ҳаҷми партовҳои сӯзишвории аз ҳисоби саноат, ҳаракати ҳаргуна техника (аз ҷумла мошин) ба атмосфера мебошад. Яъне, баландшавии ҳарорати миёнаи атмосфера (эффекти парникӣ) натиҷаи ҳамтаъсири нурҳои офтоб бо маҳсули маҳсулоти сӯзишворӣ (дуоксиди карбон, метан ва ғайра) мебошад. Дар робита бо ин ҷустуҷӯи манбаҳои алтернативии энергия, коркарди методҳои эффективии нигоҳдорӣ ва интиқоли энергия (мисол, сохтани батареяҳои офтобӣ ва ғайра) ва бо ҳамин роҳ кам намудани ҳаҷми партов ба атмосфера аз вазифаҳои муҳими илмӣ-техникӣ гардидааст. Дар ин самт истифодаи наноҷаҳои карбонӣ метавонад коэффисиенти кори фойданоки табдилдиҳандаҳои офтобиро баланд бардорад.

Масъалаи дигари экологӣ ин ҳимоя ва ҳифзи қабати озон мебошад. Қабати озони атмосфера тақрибан дар баландии 20 км аз сатҳи Замин ҷойгир буда, дар ҳимояи Замин аз нурҳои ултрабунафши афканишоти офтоб нақши асосӣ дорад. Дар протсессии вайроншавии қабати озон

фреон, ки махсулоти сунъии дар саноати химиявӣ бо мақсадҳои гуногун истифода мешавад, нақши асосиро бозӣ мекунад. Дар замони муосир ҷустуҷӯи моддаҳои ивазкунандаи фреон идома дорад. Нанотехнология метавонад дар ҳалли ин масъала ёри расонад.

### § 3.7. Нанотехнология ва футурология<sup>2</sup>

Футурология (оянданигарии илмӣ) соҳаест, ки татбиқи сценарияҳои гуногуни ояндаи инсонро меомӯзад ва баррасӣ мекунад. Он на фақат раванди таҳаввули ҳодисаҳо ва падидаҳо дар оянда пешгӯӣ, балки бо истифода аз методу усулҳои илмӣ ба нақша гирифта, идорапазир месозад. Истилоҳи «футурология» дар миёнаи солҳои 40-уми асри гузашта аз тарафи профессори олмонӣ Осип Флехтхайм пешниҳод гардида, солҳои 60-ум асри гузашта бо кӯшиши Герман Кан ва дигар олимони аз ширкати RAND ба соҳаи алоҳидаи илм табдил ёфт.

Бояд гуфт, ки футурология ҳеч робитае ба утопия, чуноне ки дар «Давлат»-и Афлотун ва «Утопия»-и Томас Мор (1478-1535) тасвир мешавад, надорад. Методу усулҳои пешбиниҳои утопиҳо бештар ба методу усулҳои динӣ монанд ҳастанд, чуноне ки мо инро дар афсонаҳои Масех, Маҳдӣ, пешбиниҳои Нострадамус ва дигарон мушоҳида мекунем. Ояндабиниҳои динӣ ва мифологӣ асоси илмӣ надорад, балки ба авторитет ва эътиқоди ғайриақлонӣ таъяс мекунад. Ҳамчунин, дар асри 20 дар адабиёт ва ҳунари соҳаи фантастика ташаккул ёфт, ки бештар ба тасаввурот ва эътиқодоти динӣ таъяс карда, оянданигарии илмиро то андозае бадном кард. Аммо чуноне ки Чингиз Айтматов (1928-2008) бо ишора ба Фёдор Достоевский (1821-1881) дар муқаддима ба «Рӯзе дарозтар аз аср» мегӯяд, фантастикае, ки заминаи илмӣ дорад ва метавонад ояндаи инсонро дуруст пешгӯӣ кунад, яке аз усулҳои марказии адабиёти бадеӣ мебошад. Чунин усули ба асосҳои илмӣ ва фалсафӣ наздикро метавон дар лоихаи технологияи инноватсионии Жак Фреско (тав. 1916) бо номи «Лоихаи Венера» мушоҳида кард.

Фарқияти оянданигарии илмӣ аз тасаввуроти динӣ ва ғайриилмӣ дар он мебошад, ки он, пеш аз ҳама, ҳатарҳои воқеиро шинохта ва аз онҳо огоҳӣ медиҳад. Дар қадами минбаъда роҳҳои ҳал пешниҳод карда мешавад. Бояд гуфт, ки муассиртарин роҳи ҳал алтернативаҳои рушд дар соҳаҳои гуногуни ҳаёти ҷамъиятӣ мебошад. Аз ҷиҳати назариявӣ таҳия ва пешниҳоди алтернативаҳо вазифаи илмҳои соҳавӣ ва байнисоҳавии ояндашиносӣ мебошад.

Аз ин рӯ, вижагии марказии ояндашиносии илмӣ шинохти ҳатарҳое мебошад, ки дар ояндаи наздик ва дур дар пешорӯи як инсон, як миллат ва тамоми инсоният қарор доранд. Бо дарназардошти ин ҳатарҳо алтернативаҳо коркард карда мешаванд. Шинохти ҳатарҳо дар сурате имконпазир мегардад, ки як инсон ва ё миллат ба ҷаҳонбиниҳои илмӣ таъяс кунад ва бо истифода аз афзорҳои илмӣ равандҳои муосир ва заминаҳои таърихӣ онҳоро омӯзад.

<sup>2</sup> Параграфи 3.7 бо ёрии файласуфи рӯшанфикр ва доктори фалсафа (PhD) оид ба масоили рушд Ҳафиз Холиқзода (зод. 1974) навишта шудааст.

Падидае объекти таҳқиқи илмӣ буда метавонад, ки хусусияти универсалӣ дорад, яъне маҳдудиятҳои замони, макони ва ғайра нашоа бошад. Аз ин нуқтаи назар, хатарҳои вучудӣ характери глобалӣ доранд. Ник Бостром, ки консепсияи «хатарҳои вучудӣ» («экзистенциальные риски»)-ро пешниҳод кардааст, онҳоро чун хатарҳои глобалӣ муайян мекунад. Ӯ хатарҳои вучудиро фарогири ҳама гуна ҳодисае меҳисобад, ки «метавонад хиради дар рӯи Замин бавучудомадаро аз байн барад ва ё ба потенциали он зарари чиддӣ расонад». Шинохти ин гуна хатарҳои объекти мустақили таҳқиқи ояндашиносии илмӣ мебошанд. Агар мо онҳоро нодида ва ё хурд гирем ва тадричан бартараф накунем, метавонанд тамаддуни инсонӣ ва умуман мавҷудияти инсонро дар ҷаҳон дар зери савол гузоранд. Турчин ва Батин (2013) бо тақия ба донишҳои соҳавӣ ва байнисоҳавӣ сарчашмаҳои асосии таҳдидҳои глобалиро чунин тасниф мекунад: 1) интеллекти сунӣ (ИС), 2) нанотехнология, 3) биотехнология, 4) яроқи ядрӣ, 5) заҳролудшавии химиявӣ глобалӣ, 6) экспериментҳои хатарноки физикӣ, 7) астероидҳо, 8) абарвулқонҳо, 9) гамма-афканишҳо ва 10) бӯҳрони системавӣ.

Вазифаи ояндашиносӣ аз он иборат аст, ки бо таҳқиқи соҳавӣ ва ҷамъбасту моделсозии байнисоҳавии ин хатарҳои сенарияҳо ва алтернативаҳо пешниҳод кунад. Дар шароити муосир таҳлили байнисоҳавӣ бисёр муҳим мебошад, пеш аз ҳама, аз он сабаб ки хатарҳои хусусияти маҷмӯӣ мегиранд. Чунончи, рамзкушоии генетикии гриппи испанка, ки дар гузаштаи наҷандон дур то 100 миллион одамро кушта буд, метавонад дар интернет паҳн шавад ва ба дасти террористҳо афтад. Ҳамин гуна, дар ояндаи наздик технологияи яроқи ядрӣ ба таври экспонентсиалӣ арзон шуда, барои гурӯҳҳои ифротгаро метавонад дастрас гардад. Агар одамон роҳҳои мусолимадомези ҳамкорӣ ва ҳамзистиро пеш нагиранд, террористон метавонанд астероидҳоро ба сӯи Замин равона кунанд. Баъзе олимон сенарияро пешниҳод мекунад, ки микродастгоҳҳои нанотехнологӣ аз идораи инсон берун баромада, дар як муддати кӯтоҳ ҳама биомассаи Заминро меҳӯранд. Ба ҷуз ин, хатарҳои табиӣ, аз қабилӣ абарвулқон, Заминҷунбии саҳт ва ғайра боиси харобии саросарии Зиндагӣ дар сайёра мегарданд. Пешбиниҳои чунин эҳтимолиятҳо, ё худ сенарияҳо истисно нестанд. Танҳо он миллатҳое чунин эҳтимолиятҳоро нодида мегиранд, ки ба оянда бо диди ғайриилмӣ менигаранд ва ё ба ҷуз ҷангу муборизаи носолим алтернативаи дигарро дида наметавонанд.

Аммо ин маънои онро надорад, ки инсоният ҳамаи шансҳои ҷаҳонро аз даст додааст ва нобудиаш ноғузир аст. Баръакс, хатарҳои, ки мо дар пеш мебинем, натиҷаи огоҳӣ аз вазъият аст. Чун дар гузашта сатҳи дониши илмӣ одамон паस्त буд, хатарҳои ояндаро кам тасаввур мекарданд. Дар айни ҳол, агар аз имрӯз ба шинохти дурусттар ва таҳияи алтернативаҳо барои маҳдуд кардани таъсири манфии хатарҳои напардозем, фардо дер мешавад. Донишмандон алтернативаҳои бисёре пешниҳод кардаанд, ки онҳоро метавон вобаста ба дурнамои наздик ва дури инсоният ба ҷор маҷмӯа синфбандӣ кард:



1) *Алтернативаҳои равандҳои сиёсӣ дар минтақаҳои алоҳида ва умуман дар сайёра; ба вуҷуд овардани «шуури планетарӣ» (Маркарян);*

2) *Алтернативаҳои нанотехнологии мушкилиҳои экосистема; иқтисоди сарватбунёд (Жак Фреско);*

3) *Алтернативаҳои фатҳи кайҳон (Стивен Ҳокинг);*

4) *Алтернативаи «фалсафаи кори ҷамагонӣ» ва трансгуманизм (Николай Фёдоров, Фаридун Исфандиёрӣ, Роберт Эттингер, Эрик Дрекслер, Ханс Моравек, Ник Бостром, Комил Бекзода)*

Вале дар ин ҷо, танҳо ду навъи алтернативаҳо - алтернативаҳои нанотехнологии мушкилиҳои экосистема ва фатҳи кайҳонро мавриди баҳс қарор медиҳем, чунки аз рӯи гуруҳбандии илмӣ, ин алтернативаҳо ба нанотехнология наздик мебошанд.

**Алтернативаҳои нанотехнологӣ.** Дар ояндаи наздик алтернативаи хифзи зиндагӣ дар сайёра ва роҳи босамари фатҳи Кайҳон тавассути корбурди эҳтиёткоронаи нанотехнология, биотехнология ва ИС такмил меёбад. Мо набояд то ба он ҳадде расем, ки онҳо идоранопазир гарданд. Дар айни замон, бе онҳо дигар наметавонем зиндагибоб будани системаҳои иҷтимоӣ ва экологиро таъмин намоем. Донишмандоне чун Вернор Винч ва Чон Лесли дар нисбати ояндаи технологияи навин назари бадбинона доранд. Ба назари онҳо, дар байни солҳои 2005-2030 интелекти сунъӣ аз интелекти инсон қавитар мегардад. Дар 200 соли оянда бошад, 30% одамон аз байн мераванд ва ҷои онҳоро нанороботҳо мегиранд.

Алтернативаҳо, яъне моделҳои муайян барои идорапазир ва манфиатбахш кардани нанотехнология, ИС ва дигар намудҳои технологияи нав таҳия карда мешаванд. Гарчанде он замон нанотехнологияро ҷиддӣ қабул намекарданд, имрӯз ба яке аз муҳимтарин баҳши моделсозии байнисоҳавии илму техника барои ояндаи наздик табдил ёфтааст.

Яке аз чунин моделҳои байнисоҳавӣ барои идора ва истифодаи нанотехнология NBIC-конвергенция номида мешавад, ки фарогири соҳаҳои N - нано, B - био, I - инфо ва C - когно мебошад. Ин истилоҳ соли 2002 аз тарафи Михаил Роко ва Вилиям Бейнбрич пешкаш гардидааст, ки ҷараёни ҳамгирии технологияҳои нано-, био-, когнитивӣ ва иттилоотиро танзим мекунад.

Дар сурати идораи дуруст ва оқилонаи нанотехнологияҳо бисёр мушкилиҳои ҷомаҳои инсонӣ ҳалли худро пайдо мекунад. Яке аз ин масъалаҳо таъмини аҳолии сайёра бо энергияи «сабз», яъне энергияи таҷдидшаванда мебошад, ки оксиди карбон хориҷ намекунад ва аз ин рӯ, ба муҳити атроф безарар аст. Истифодаи нанотехнология имкон медиҳад, ки қисмати зиёди энергияи офтобиро барои таъмини рушноӣ ва гармӣ аз худ кунем. Дар ҷаҳон ширкатҳои ба истилоҳ «наносолар» ба вуҷуд омада истодаанд, ки дар ояндаи наздик ба истеҳсоли наномеханизмҳо, аз он ҷумла фотоэлементҳои тунуки батареяҳои офтобӣ

шурӯъ мекунад. Ин маҳсулот нархи батареяҳои офтобиро арзон карда, бухрони энергетикӣ соҳаи иқтисодиро ҳал мекунад.

Дигар самти муҳими корбурди нанотехнология нақлиёт мебошад, ки бе он иқтисодиётро тасаввур кардан ғайриимкон аст, дар ҳоле ки энергияи бисёр харҷ мекунад. Дар ояндаи наздик зерсохтори нақлиёт ва коммуникатсия новобаста ба маҳдудиятҳои табиӣ ва сиёсӣ иҷтимоӣ ҳама нуқтаҳои сайёраро фаро гирифта, ба ҳам мепайвандад. Мегалополисо то 100 миллион аҳолиро ғунҷонида, ҳаёти онҳо аз нанотехнология дар соҳаҳои нақлиёт ва коммуникатсия вобаста мегарданд. Барои ба ҳам пайвастанӣ нуқтаҳои дури Замин, масалан Осиё ва Амрико ва ё Амрико ва Африка тунелҳои вакуумӣ барои поездҳои зеризаминӣ сохта мешавад, ки дар як соғия чанд километр ҳаракат хоҳад кард. Дар наздиктарин ғурсат, яъне то соли 2030 Чин поезди зеризаминиро ба истиғода медиҳад, ки дар як соат 1000 километр ҳаракат мекунад. «Чунин поездҳо зербиноӣ «метроӣ умумичаҳонӣ»-ро месозанд, ки дар натиҷа сайёраро ба мегалополиси яғона табдил медиҳад». Нанотехника ҳар як авиопассажиро бо системаи наҷот, чуноне ки дар ҳавопаймоӣ ҷангӣ ҳаст, таъмин мекунад. Чун ақсарияти авиасадамаҳо ба омилӣ инсонӣ вобастаанд, аз ин рӯ, ИС беҳатарии парвозҳоро таъмин хоҳанд кард. Тойота ва Волво ваъда додаанд, ки то соли 2020 системаи беҳатарии онҳо марғи садамавиرو ба сифр баробар мекунад.

«Лоиҳаи Венера»-и Жак Фреско ва як қатор барномаҳои дигари давлатӣ ва мустақил ба таҳияи моделҳои нанотехнологии рушди соҳаҳои ғуноғун, аз он ҷумла зерсохтори нақлиёт, таъминоти иҷтимоӣ, беҳатарии вучудӣ, фатҳи сатҳи уқёнус ва фазои кайҳонӣ барои зиндагии инсон ва монанди инҳо машғуланд.

Дар сурати татбиқи ин моделҳо нанотехнология барои фатҳи Кайҳон низ дар ояндаи наздик саҳми бештар меғузорад. Ба воситаи робот-репликаторҳо аз худ кардани ғӯшаҳои дастнораси системаи офтобӣ муяссар мегардад. Баробари кашф ва фатҳи ин ғӯшаҳо, онҳо дар ғурсати кӯтоҳ дар ҷирмҳо ва ҳатто астероидҳое, ки муҳити муносиб доранд, истғоҳҳои кайҳонӣ барои зиндагӣ ба вучуд меоранд. Инчунин нанотехнологияҳо барои экспедитсияҳои байниситорай сағарбар карда мешаванд.

**Алтернативаҳои фатҳи кайҳон.** Яке аз алтернативаҳои дар дарозмуддат боварибахшо Стивен Вильям Ҳокинг пешниҳод кардааст, ки тибқи он инсоният барои дар 100 соли оянда зинда мондан бояд ба таври интенсифӣ кайҳонро фатҳ кунад. Дониши илмӣ қудрати аз худ кардани нуқтаҳои дуру наздики кайҳонро дорад, чуноне ки қабри замин уқёнусро кашф кардааст. Донишмандон мақсади асосии фатҳи кайҳонро дар ҳифзи тамаддуни инсонӣ бо роҳи дар нуқтаҳои ғуноғуни он масқун шудан медонанд. Дар айни замон, мо ба захираҳои номаҳлуди энергия, материя ва фазои кайҳон дастрасӣ пайдо карда, аз истисмори табиат, сӯзондани оксиди карбон, гармшавии иқлим ва дигар фалоқатҳои экологии аз он сарзананда даст мекашем.

Тибқи пешбини олимон, Кайҳон низ дер ё зуд аз байн меравад ва ё таҳаввулоти дохилии он боиси афзоиши хатарҳои вучудӣ барои одамон ва тамаддуни онҳо мегардад. Олимон таҳдидҳои Кайҳонро чунин муайян мекунад: 1) марги гармо, 2) барҳамхурии протонҳо ва буғшавии сияҳчолҳо дар фазои беохир, 3) зичшавии Кайҳон, 4) Таркиши бузурги нав, ки чирмҳо ва предметҳоро аз ҳам дур месозад. Ба назари физик, математик ва космологи америкӣ Франк Типлер (тав. 1947) дар асараш бо номи «Физикаи бемаргӣ» (1994), илми инсонӣ ба сатҳе мерасад, ки тамоми кайҳонро фаро мегирад ва баробари таркиши бузург ва ҷафсшавӣ худро мутобиқ мекунад. Тамаддуни инсонӣ дар ҳолати ҷафсшавии мутлақ низ ҳифз мешавад, ки онро Типлер «нуқтаи Омега» меномад. Пешниҳоди монандро Ли Смолин низ мекунад, ки тамаддуни инсонӣ дар оянда қудрати идора ва тағйирпазир кардани Кайҳонро дорад. Он ҳатто метавонад сияҳчолҳо созад ва аз онҳо системаҳои нави ситорай ва галактикӣ ба вучуд орад ва ё худро ба Кайҳонҳои параллел интиқол диҳад.

Дар ояндаи наздик илму техника бояд ба дараҷае рушд кунад, ки дар навбати аввал суръати рӯшноиро гузарад ва зиндагиро дар гӯшаҳои дигари Кайҳон ба роҳ монад. Дар сурати ғайр, аз байн рафтани инсон ва тамаддуни инсонӣ дер ё зуд ногузир мегардад, дар ҳоле ки масалан наметавонад аз гирдоби сияҳчолҳо наҷот ёбад. «Сияҳчол бахше дар фазо-замон бо қозибаи қозибаашон ончунон бузург аст, ки онро ҳатто объектҳои бо суръати рушноӣ ҳаракаткунанда (аз он ҷумла квантҳои ҳуди рушноӣ) тарк карда наметавонанд». Аз ин рӯ, розӣ шудан ба чунин маҳдудият ғайриимкон аст, ки: «...қонунҳои маъруфи физика тағйирнопазиранд, аз он ҷумла суръати рӯшноӣ ҳамеша суръати ба таври максималӣ имконпазири сафар боқӣ мемонад».

## Боби IV. МОДЕЛСОЗИИ НАНОМАВОДҲО

### § 4.1. Усулҳои асосии моделсозии наносохторҳо

Бо методи моделсозии компютери наносохторҳо пеш аз ҳама хосиятҳои наносохторҳои сахтӣ ба монанди -нуқтаҳо ва риштаҳои квантӣ, нанокластерҳои квантӣ, фуллеренҳо, нанотрубкаҳо ва ҳоказо омӯхта мешаванд. Методи моделсозии компютери наносохторҳо дар фарқият аз методҳои анъанавии тадқиқоти наносохторҳо (барои мисол тадқиқи наносохторҳо бо ёрии микроскопи туннелӣ ё атомӣ куввагӣ) ба интерпретатсияи назариявӣ эҳтиёҷ надоранд. Аҳамияти дигари методи моделсозии компютери наносохторҳо дар он аст, ки барои тадқиқотчи вақт ва масолаҳои тадқиқотӣ сарфа карда мешавад.

Ташаккули методи моделсозии компютерӣ дар илм ба солҳои 90-уми асри гузашта рост меояд. Сабаби ин ба миён омадани техникаҳои ҳисоббарори нисбатан тавоно ба шумор меравад. Дар ин давраҳо компютерҳо бо пакет-барномаҳои GAUSSIAN, GAMESS, MOPAC, HUPERCHEM, CHEMICALOFFICE ва ғ. сарбор карда мешаванд, ки ҳар кадоме аз ин пакет-барномаҳо дорои интерфейс ва имкониятҳои махсуси худ мебошанд.

Дар замони муосир моделсозии наносохторҳо ба чунин гурӯҳҳо ҷудо намудан мумкин аст:

*Методи квантии Монте-Карло (Quantum Monte – Carlo, QMC)*

*Методи назарияи функционали зичӣ (Density Functional Theory, DFT)*

*Методи наздиқавии пурзур (Tight - binding method)*

*Методи нимэмпирикӣ (Semi empirical methods)*

*Методи эмпирикӣ*

Аз ин методҳо се тои аввалаш ба ab-initio (принсипи яқум) дохил мешавад.

Мо дар ин ҷо ҳамаи ин методҳо ба таври муфассал дида набаромада, танҳо бо омӯхтани методи функционали зичии электронӣ (Density functional Theory, DFT) маҳдуд мешавем.

### § 4.2. Методи Density Functional Theory

Дар методи Density Functional Theory (DFT) бузургии физикии асосӣ ин зичии электронии система- $\rho$ , ки дар навбати худ функцияи координатаи ҳамаи электронҳои систематашқилдиҳанда мебошад. Яъне дар методи DFT функцияи электронии бисёрэлектрона бо функционали зичӣ иваз карда мешавад. Аҳамияти иваз намудани функцияи мавҷӣ бо функцияи зичӣ дар он аст, ки зичӣ ин бузургии физикии ченшаванда ва мазмуни физикӣ дошта мебошад. Аз тарафи дигар функцияи мавҷии системаи N-электронна аз 3N-координат (ё 4N-агар спин ба назар гирифта шавад) вобаста бошад, функционали зичӣ новобаста аз шумораи электронҳои система аз се координат вобаста аст. Нахуст

проблемаи DFT дар он буд, ки оё функционали зичӣ бо энергияи система алоқамандӣ дорад ё на, агар ҳа дар кадом шакл.

Соли 1964 Хоэнберг ва Кон теоремаеро пешниҳод намуданд, ки мувофиқи он энергияи ҳолати асосии система функционали зичии электронӣ  $E_{total}[\rho]$  мебошад, яъне энергияи система минималӣ аст, агар  $\rho$  зичии электрони аниқ ҳолати асосӣ бошад.

Ҳарчанд теоремаи Хоэнберг ва Кон вобастагии  $E_{total}$  ва  $\rho$ -ро исбот кунад ҳам лекин дар бораи чигуна сохта шудани ин функционал чизе намегӯяд.

Энергияи пурраи системаи бисётэлектронро бо формулаи

$$E_{total} = T + E_{ne} + J + K + E_{nn}$$

ҳангоми истифодаи наздикунии Борн-Оппенгеймер энергияи таъсири байни ядрои  $E_{nn} = const$  буда, энергияи таъсири электронҳо бо ҳаста  $E_{ne}$  энергияи таъсири байниҷадигарии электронҳо  $J$  бо формулаҳои

$$E[\rho(r)] = - \sum_{\alpha}^N \sum_i^M \int \varphi_i(r) \frac{Z_{\alpha}}{r} \varphi_i(r) dr = - \sum_{\alpha}^N \int \frac{Z_{\alpha}}{r} \rho(r) dr$$

$$J_{ij}[\rho(r)] = \frac{1}{2} \iint |\varphi_i(r_1)|^2 \frac{1}{|r_1 - r_2|} |\varphi_j(r_2)|^2 dr_1 dr_2 = \frac{1}{2} \iint \frac{\rho(r_1)\rho(r_2)}{|r_1 - r_2|} dr_1 dr_2$$

муайян карда мешавад.

Барои функционалҳои энергияи кинетикӣ  $T$  ва энергияи баръакс  $K$  аввалин маротиба Томас-Ферми-Дирак системаи электронҳоро ҳамчун гази электрони якҷинса пиндошта формулаҳои зеринро муқаррар намуда буданд.

$$T_{TF}[\rho] = C_F \int \rho^{5/3}(r) dr \quad C_F = \frac{3}{10} (3\pi^2)^{2/3}$$

$$K_D[\rho] = -C_x \int \rho^{4/3}(r) dr \quad C_x = \frac{3}{4} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3}$$

Дар модели Томас-Ферми-Дирак бандҳои химиявӣ ба ҳисоб гирифта нашудаанд. Гӯё дар ҷаҳорҷӯбаи ин назария молекулаҳо вучуд надоранд. Барои рафъи ин камбудии методи коррексияи градиентӣ пешниҳод мешавад, ки мувофиқи он  $T$  ва  $K$  на ин, ки аз  $\rho$ , инчунин аз ҳосилаи вай низ вобаста мебошанд.

Методи Кон ва Шам. Идеяи асосии методи Кон ва Шам дар ҷудокунии функционалӣ энергияи кинетикӣ аз ду қисмҳои зерин иборат аст.

$$T[\rho] = T_s[\rho] + T_c[\rho],$$

$$T_s[\rho] = \sum_i^M \left\langle \varphi_i \left| -\frac{1}{2} \nabla_i^2 \right| \varphi_i \right\rangle.$$

Дар ин ҷо  $T_c$  - қисми correction,  $T_s$  - қисми электронҳои байни ҳамдигар таъсир намекарда. Коррекция ба энергияи кинетикӣ дар методи

Кон ва Шам ба энергияи бараъксхамроҳ карда мешавад ва бо дарназардошти ин энергияи пурраи система шакли зеринро мегирад.

$$E_{DFT}[\rho] = T_s[\rho] + E_{ne}[\rho] + J[\rho] + E_{xc}[\rho],$$

Потенсиали  $E_{xc}$  барои ҳамаи системаҳо функционали ягона мебошад. Методҳои гуногуни DFT аз ҳамдигар бо интихоби  $E_{xc}$  фарқ мекунад. Одатан  $E_{xc}$ -ро ба қисмҳои  $E_x$  ва  $E_c$  ҷудо мекунад.

### § 4.3. Имкониятҳои пакети Quantum ESPRESSO

Пакети Quantum ESPRESSO (QE) дар аввал барои системаи оператсионии Linux пешбинӣ шуда буд. Ҳоло бошад версияи Windows-и он низ дастраси истифодабарандагон мебошад. Ҳисобҳо дар QE дар базисҳои мавҷҳои ҳамвор бо истифодаи псевдопотенциалҳо гузаронида мешавад. Ҳангоми кор бо QE аз китобхонаи псевдопотенциалҳои атомҳои гуногун истифода намудан мумкин аст. Ба ғайр аз ин истифодабаранда метавонад бо ёрии барномаи `ld1`, ки ба пакети QE дохил мешавад, псевдопотенциали лозимиро ҳисоб кунад. Ба имконоти асосии QE инҳоро дохил намудан мумкин аст:

*-ҳалли муодилаи Кон ва Шам ва муайян намудани энергияи пурраи системаи бисёрэлектронӣ;*

*-ҳисоби тақсимоти зичии электронӣ;*

*-ҳисоб намудани зичии ҳолатҳои умумӣ ва парсиалӣ;*

*-ҳисоб намудани зарядҳои атомӣ бо схемаи Лёвдин;*

*-ҳисоб намуданиқувваи байни атомӣ, тензори шаддидият ва оптимизатсияи сохтор;*

*-таҳқиқи эволютсияи системаи бисёратома бо методи динамикаи молекулавӣ;*

*-ҳисоб намудани зарядҳои эффефективии Борн ва нуфузпазирии диэлектрикӣ;*

*-ҳисоб намудани коэффисентҳои ҳамтаъсири электрон-фононӣ ббарои металлҳо ва ғайра:*

Ҳисобҳо дар QE бо ёрии файли ибтидои, ки ҳамаи параметрҳои лозимиро дорад гузаронида мешавад. Барои сохтани чунин файлҳо аз интерфейси графיקии PWgui, ки махсус барои QE коркард шудааст истифода намудан мумкин аст. Барномаи PWgui аз <http://www.quantum-espresso.org/download.php> дастрас намудан мумкин аст. Барои кор дар QE бо ёрии PWgui суроғаи файлҳои истифодашаванда талаб карда мешавад. Барои ин PWgui фаъл намуда аз менюи edit ба пункти setting гузашта бо ёрии тўгмаи «fale» суроғаи файлҳои истифодашавандаи - pw.x, ph.x, pp.x, projwfc.x, d3.x нишон дода мешавад. Барои мисол, мо кристалли MgO-ро дида мебароем.

Каталоги MgO-ро бо суроғаи `home/user/work/mgo` ва ҳамчунин каталоги лаҳвагии `temp- home/user/work/temp` - ро месозем, ки дар он проекти мо ҳифз карда мешавад.

Барои гузаронидани ҳисобҳо бо ёрии PWgui пайдарпайии File-new-newPW.X Input иҷро намуда баъд аз ин дар Control маълумотҳои заруриро пур мекунем.

**Job title** - номи лоиҳа (проект)

**Type of calculation** - шакли ҳисоб дар ҳолати мо ин Self consistent-field (мутобиқати ҳисобкунӣ)

**Temporary directory (outdir)** - суроғи каталоге, ки дар он ҳисобҳои лаҳвагӣ ҳифз карда мешавад, home/user/work/temp-ро менависем.

**Directory containing pseudopotential files** - суроғи папкаи псевдопотенциалҳо. Мисол, home/user/work/pseudo/

Акнун ба қисми System мегузарем. Дар қисми Required variables қимати якчанд аз параметрҳо талаб карда мешавад.

**Braivias lattice index (ibrav)** - шакли панҷараи Браве.

**Lattice specification** - параметрҳои панҷараи кристаллӣ.

**Number of atoms in the unit cell (nat)** - миқдори атомҳои дар ячейкаи элементарӣ

**Ecutwfc** - энергияи порчаи мавҷи ҳамвор

**Kinetic energy cutoff for DENSITY** – ададан чаҳор маротиба аз Ecutwfc бояд зиёд бошад.

Акнун ба вкладкаи (варақкаи замима) **Lattice & atomic data** мегузарем.

**Enter atomic types** - номи атомҳо навишта мешавад.

**Atomic coordinate length unit** -

**Enter atomic coordinate** – координатаҳои атомҳо дода мешавад.

Оғози ҳисоб бо фармони (камандаи) **Run (Configure & Run calculation)** дода мешавад.

#### 4.4. Сохтори электронии кристалли MgO

Барои ҳисобҳои сохтори электронӣ, дар пакети QE програмаи pw.x истифода мешавад. Дар поён намунаи файли ибтидоӣ бо параметрҳои лозимӣ барои барномаи pw.x оварда шудааст.

##### **&CONTROL**

calculation = 'scf',

prefix = mgo,

tstress = .true.,

tpnfor = .true.,

pseudo\_dir =

'/home/user/work/pseudo/', outdir

= '/home/user/work/temp/',

/

##### **&SYSTEM**

ibrav = 2, celldm(1) = 7.96, nat = 2, ntyp =

2, ecutwfc = 30, ecutrho = 240

```
/  
& ELECTRONS  
conv_thr = 1.d-8,  
mixing_beta = 0.7,
```

```
/  
ATOMIC_SPECIES
```

```
Mg 24.312 Mg.pz-n-vbc.UPF  
O 16.000 O.pz-rrkjus.UPF
```

```
ATOMIC_POSITIONS  
(alat) Mg 0.0 0.0 0.0
```

```
O 0.5 0.5 0.5  
K_POINTS  
Automatic} 3 3 3 1 1 1
```

Аз тексти овардашуда маълум аст, ки маълумотҳои ибтидоӣ дар QE дар блокҳои алоҳидаи байни худ бо симболи /. чуда шуда гурӯҳбандӣ шудаанд. Дар намунаи боло файли ибтидоӣ аз блокҳои &CONTROL, &SYSTEM, &ELECTRONS, ATOMIC\_SPECIES, ATOMIC\_POSITIONS иборат аст. Ҳар як блок аз маҷмӯи ягон параметрҳои ба барнома лозимиро медиҳад.

## & CONTROL

**calculation** – параметри симболии мазкур оид ба кадом шаклиҳисоби талаб мешуда, маълумот медиҳад. Дар ҳолати Self consistent-field қимати вай бояд ба “scf” баробар бошад.

**tstress** – параметри мантиқӣ буда, оид ба ҳисоб кардан ё накардани тензори шаддидият (матрисаи 3x3) маълумот медиҳад. Параметри **tstress** ду қимат - .true.и.false., қабул намуда метавонад

**pseudo\_dir** – суроғи каталоги псевдопотенциалҳоро нишон медиҳад.

**outdir** – суроғи каталогиеро, ки файлҳои лаҳзавӣ дар рафти ҳисоб нигоҳдорӣ мешаванд дода мешавад.

**prefix** – ба барнома маълумот медиҳад, ки кадом маҷмӯи символҳо ба номгузориҳои файлҳои натиҷавӣ истифода мешаванд. Агар нишон дода нашавад, пас барнома ба «pwsf» - ро истифода мекунад.

## &SYSTEM

**ibrav** – қимати параметри мазкур аз шакли панҷараҳои Браве вобаста буда метавонад аз 0–14 қиматҳоро қабул кунад. Аз сабаби он, ки шакли панҷараи кристалли MgO кубии мутамарказонида мебошад, барои вай **ibrav** ба 2 баробар мешавад.

**celldm(1)** – қимати ин параметр ба доимии ячейкаи элементарии панҷараи кристаллӣ (бо воҳиди атомии дарозӣ) дода мешавад. Параметри ячейкаи кристалли MgO ба 4.21 ангстрем (Å) ё 7.96 бор



баробар аст.

**nat** – шумораи атомҳо дар ячейкаи элементарӣ. Барои MgO ин параметр ба 2 баробар аст.

**ntyp** – шумораи навъҳои атомҳо. MgO аз атомҳои магний ва оксиген иборат аст, яъне ntyp = 2.

## & ELECTRONS

**conv\_thr**

**mixing\_beta**

**ATOMIC\_SPECIES**

Mg 24.312 Mg.pz-n-vbc.UPF

O 16.000 O.pz-rrkjus.UPF

Кристалли MgO ду навъи атомро дорад. Дар аввал симболи атоми якум, массаи атомиаш ва псевдопотенциал нишон дода мешавад, пас барои атоми дуюм.

## ATOMIC\_POSITIONS (alat)

Mg 0.0 0.0 0.0

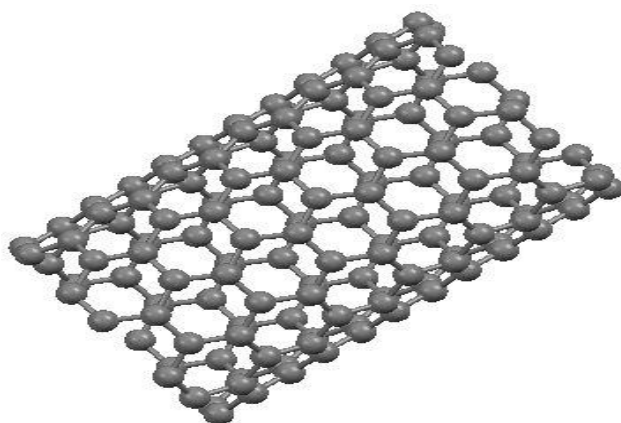
O 0.5 0.5 0.5

Дар ин блок координатаҳои ҳамаи атомҳои ячейкаи элементарӣ дода мешавад. Дар пакети QE ҷаҳор роҳи ифода намудани координатаҳои атомҳо вуҷуд дорад. Инҳо **alat**, **bohr**, **angstrom**, **crystal** мебошанд. Яке аз инҳо дар блок дар дохили қавс бояд нишон дода шуда бошад.

## § 4.5. Моделсозии нанонайча бо пакет-барномаи Дячков

Омӯхтани хосиятҳои физикӣ-химиявии объектҳои физикӣ, аз он ҷумла наносохторҳо (нуқтаҳо, риштаҳо ва ҷоҳҳои квантӣ, фуллеренҳо, нанонайчаҳои карбонӣ ва ғайри карбонӣ) имрӯзҳо ба яке аз методҳои асосии тадқиқотӣ табдил гардида, методологияи нави илмиро ба вуҷудовардааст. Барои ин физик-барномасозон барои мучаҳҳаз гардонидани компютер пакет-барномаҳои гуногунро навиштаанд. Аз инҳо пакетҳои GAUSSIAN, GAMESS, MOPAC, HUPERCHEM, CHEMICALOFFICE ва ғ. бо мақсади омӯхтани хосиятҳои кванто-механикии наносохторҳо, навишта шудаанд.

Мо ба сифати объекти тадқиқотии худ нанонайчаи карбонӣ (carbon nanotubes)-ро интихоб намудем (Расми 4.1).



*Расми 4.1*

Объекти интихоб намудаи мо, нанонайчаи шакли C@66 мебошад. Мо онро бо ёрии пакет-барномаҳои гуногун тадқиқ мекунем.

Пакети якум пакет-барномаи Дячков мебошад, ки бо забони барномасозии ФОРТРАН навишта шудааст. Ва аз се зер-барномаҳои atom.exe, strcy.exe, over.exe иборат мебошад.

Барои оғози кори atom.exe файли ибтидоии inatom, ки дар он номгӯи атомҳои ба дохили объект дохилшаванда, ворид карда шудааст, инчунин конфигуратсияи электрони атомҳо дар ин ҷо мисоли файли inatom оварда мешавад.

```

ATOMIC CALCULATION FOR ATOM NO  1 Carbon
CURRENT ENERGY UNIT - ELECTRONVOLT
WRITE OUTPUT INFORMATION - STANDART
MAX.RADIUS WAVE FUNCTION - 60.0
STEP IN LOGARIFM. GRID (1/STEP) - 21.0
RADIUS MUFFIN-TIN SPHARE - 1.3400
DUMPING COEFFICIENT - 0.0
MAX.NUMBER OF ITERATION - 50
TYPE OF EQUATION - DIRAC (DIRAC, SHRED
IONICITY PARAMETER - STANDART
ATOMIC WEIGT (FOR NUCLEAR RAD)  00.0
LATTER CORRECTION - NO
SLATER EXCHANGE (X-A) - 0.0
ATOMIC NUMBER - 6.0
GENERATE NEW START DENS – YES (GENERATE - <YES>,
READ -<NO>
WRITE OUTPUT DENSITY (FILE18)- NO ( <NO>-FILE 04 FOR STR
CREATE
<CORE> SHELLS      - STANDART
<SEMICORE> SHELLS - NO
<VALENT> SHYLLS   - YES
                2S1/2 2.0
                2P1/2 2.0 END
ATOMIC CALCULATION FOR ATOM NO  0 manganese

```

Натиҷаи кори барномаи atom.exe дар файлҳои интиҳои outatm.see ва outatm.str навишта мешавад. Дар ин файлҳо зичии электрони атомӣ, потенциал ва дигар маълумотҳо оварда шудаанд, ки барои идомаи кори барномаи (зинаи дуҷум) strcy.exe лозим мешавад.

Барои оғози кори барномаи strcy.exe бошад файли ибтидоии inlascw ва outatm.str лозим мешавад. Дар инҷо мо мисоли файли inlascw –ро меорем.

[Project]

JobTitle = 5x5\_MT

Number of Bands = 51; number of bands for calc.

Integral Accuracy = 5.D-4; max. relative error for calc. of integrals,

Input Coords Accuracy = 1.D-4; highest precision of input coordinates,

LValue Initial = 5 ; value of L,

LValue Maximum = 8 ; limit of L involv̄d in th̄ calculation.

Cache Double Integrals = 1 ; Save double integrals to disk?

kStart = 0; Start bands calculation from k = 0 or -PI/C (ZERO/-Pi/C)

CalcIntervals Total = 50; total count of points inside Brillouine zone;

CalcPoints Total = 21 ; ^+1

CalcPoints Now = 51 ; count of points in this time,

[Project/Graphs]

Energy Bottom = -30.0

Energy Top = 30.0

Halfwidth = .05; in eV

Render Pitch = 15; Density of points in output file, 1/eV

Halfwidth Fermi = .025; Halfwidth for DOS calc. on Fermi Level, eV

Separate Band Plot Files = 0; Band structure file ar̄y solid or multiple files (SOLID / NO)

[Structure]

A=8.845

B=3.835

C=4.6418961642

AddP Companion=1

Energy Cut Off=100

[Structure/AtomTypes/1]

@=Carbon

Nuclear Charge=6

Valent Electrons=4

`	.0000000000	6.4450440220	.0000000000
`	2.6214355700	5.8878406906	.0000000000
`	6.1296011149	1.9916281323	.0000000000
`	6.4097373964	-.6736905473	.0000000000
`	3.7883018265	-5.2141501433	.0000000000
`	1.3400000000	-6.3042043467	.0000000000

```

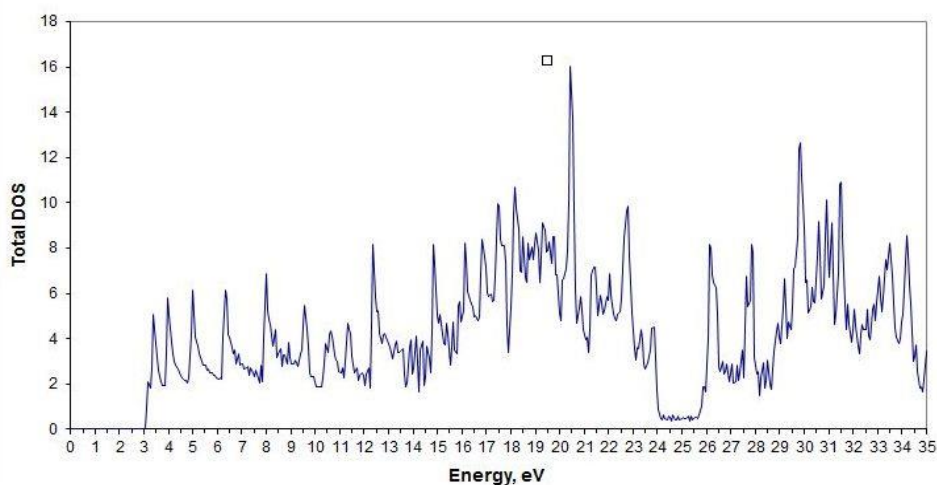
` -3.7883018265   -5.2141501433   .0000000000
` -5.5815718515   -3.2225220110   .0000000000
` -6.1296011149    1.9916281323   .0000000000
` -4.7896011149    4.3125762144   .0000000000
` -1.3400000000    6.3042043467   2.3209480821
`  3.7883018265    5.2141501433   2.3209480821
`  5.5815718515    3.2225220110   2.3209480821
`  6.1296011149   -1.9916281323   2.3209480821
`  4.7896011149   -4.3125762144   2.3209480821
`  .0000000000     -6.4450440220   2.3209480821
` -2.6214355700   -5.8878406906   2.3209480821
` -6.1296011149   -1.9916281323   2.3209480821
` -6.4097373964    .6736905473    2.3209480821
` -3.7883018265    5.2141501433   2.3209480821
Orbital Flags =  s[*]  p[*]  d[*]  f    g
Orbital Energies = -14.087  -5.8626  10.000  20.000  30.000
[Exchange]
Mode = SL

```

Натиҷаи кори барномаи `strcy.exe` дар файли `stryout.log` навишта мешавад. Бори дигар фаългардонии барномаи `strcy.exe` файли `outstrcy.dat`-ро медиҳад, ки он барои кори оядани пакет лозим мешавад. Зинаи сеюм ва ҳамзамон, зинаи охирини кори пакет барномаи `over55.exe` мебошад. Барои оғози кори барнома се файли `inlacw`, `outatm.str` ва `outstrcy.dat` талаб карда мешавад.

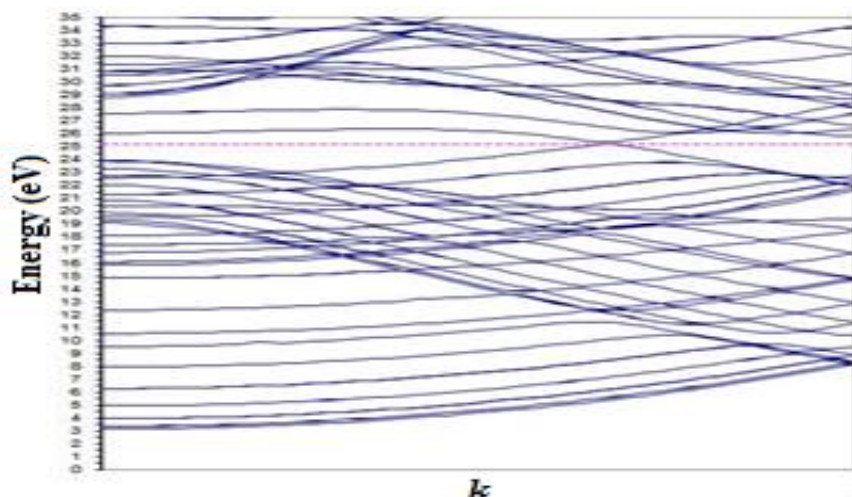
Натиҷаи кори `over.55.exe` дар файли `bnd.str` навишта мешаванд. Дар он дар бораи зонаҳо ва зичии электронии ҳолат маълумот шудааст. Ҳангоми такроран фаълкунии `over 55.exe` файли `bnd.str`-ро ба `bnd.dat` ва `dos.dat` табдил медиҳад. Баъд, бо ёрии програмаҳои графикӣ (мисол, `excel`, `origon.pro`) графикҳои физикӣ гирифта мешаванд.

Дар расми 4.2, зичии ҳолати электронии  $C@66$ , ки ба воситаи пакети Дячков гирифташуда, тасвир ёфтааст.



**Расми 4.2**

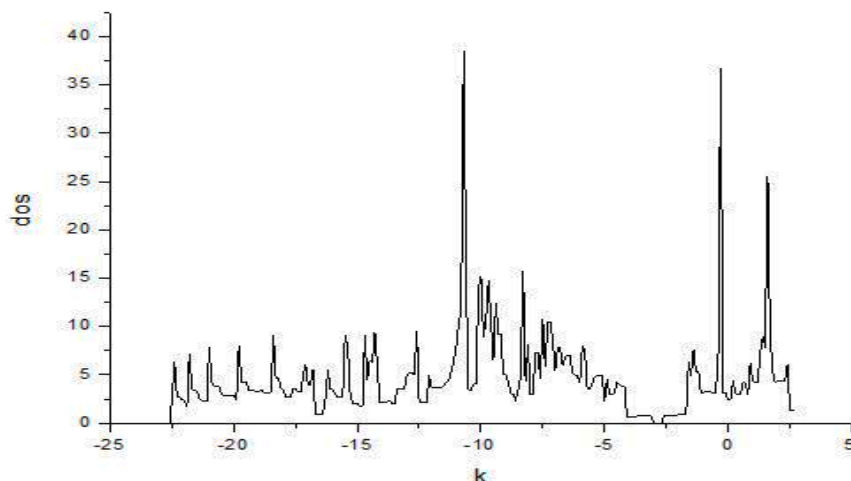
Дар расми 4.3 бошад, спектри энергетикӣи  $C@66$  бо ёрии пакети Дячков гирифташуда, нишон дода шудааст.



Расми 4.3

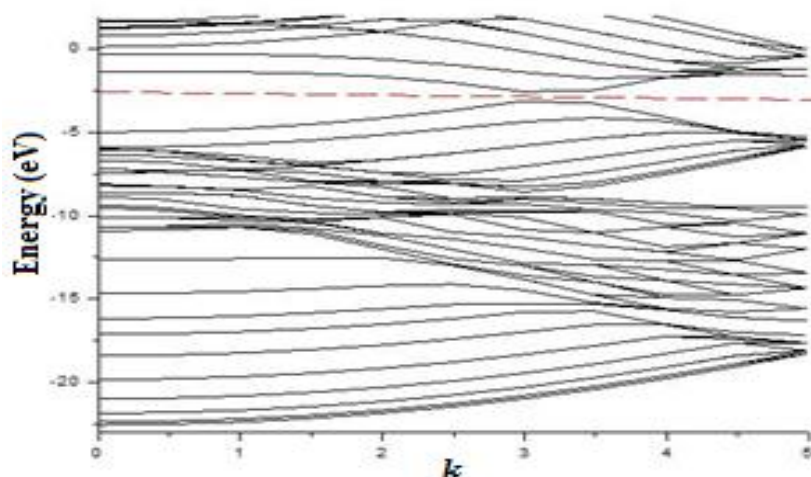
Дар бораи пакети дигари универсалии Quantum Espresso, ки дар платформаи системаи оператсионии Linux кор мекунад, ба таври муфассал наистода танҳо, натиҷахоро пешниҳод мекунем, ки бо натоиҷи дар боло гирифташуда мувофиқанд.

Дар расми 4.4, зичии ҳолати электроникии C@66, ки ба воситаи пакети Quantum Espresso гирифташуда, тасвир ёфтааст.



Расми 4.4

Дар расми 4.5 низ спектри энергетикии C@66 бо ёрии пакети Quantum Espresso гирифташуда, нишон дода шудааст.



Расми 4.5

### § 3.6. Хронологияи мухтасари нанотехнология

1900 - физики олмонӣ М.Планк мафҳуми «квант»-ро ба илм ворид намуд, ки барои шарҳи назарияи квантии наносистемаҳо аҳамияти муҳим дорад.

1905 - физики машҳур А.Эйнштейн дар яке аз мақолаҳои илмии худ исбот мекунад, ки андозаи молекулаи шакар қариб ба як нанометр баробар аст.

1931 - физикони олмонӣ Макс Кнолл ва Эрнст Руска микроскопи электрониро месозанд, ки бо ёрии он аввалин маротиба нанообъектҳо таҳқиқ карда шуданд.

1939 - ширкати Siemens ба истехсоли микроскопи электрони қобилияти ҷудокуниаш 10 нм оғоз кард.

1959 - физики амрикоӣ Ричард Фейнман андешаҳои худро доир ба нанотехнология, дар лексияи таърихӣ «Он ҷо дар поин фаровон аст» (There is plenty of room at the bottom) баён мекунад. Фейнман дар Институти технологияи Калифорния ба таври илмӣ асоснок мекунад, ки дар асоси қонунҳои физикаи бунёдӣ аз атомҳо ва молекулаҳои алоҳида сохтани маводҳо ягон зиддияте вуҷуд надорад.

1966 - физики амрикоӣ Р. Янг, корманди бюрои миллии стандартизатсия ба ихтироӣ пезомуҳаррик ноил мешавад, ки ҳоло дар микроскопҳои шакли зондӣ-сканерӣ истифода мешаванд.

1968 - кормандони компанияи Bell Алферд Чо ва Чон Артур, ба таври назариявӣ коркарди сатҳи нанообъектҳо пешниҳод намуданд.

1974 - физики ҷопонӣ Норио Тангучи бори нахуст дар яке аз конференсҳои байналмилалӣ дар маърӯзааш - «Оид ба принципҳои асосии нанотехнология» («On the Basic Concept of Nanotechnology») истилоҳи «нанотехнология» -ро пешниҳод кард. Ӯ инчунин, барои номбарии механизмҳои аз як микрон хурд мафҳуми «нанотехника»-ро истифода намуд.

1981 - физикони олмонӣ ва кормандони ширкати IBM (International Business Machines Corporation) Герд Беннинг ва Генрих Рорер микроскопи туннелӣ сканериро месозанд, ки баъдтар (соли 1986) ба Ҷоизаи нобелӣ қадрдонӣ мешавад.

1985 - физикони амрикоӣ Роберт Керл, Хэролд Крото ва Ричард Смолли технологияро пешниҳод ккарданд, ки имконият медиҳад предмети диаметраш то як нанометр сахт чен карда шавад.

1985 - олимони Г. Крото аз Англия, Р. Керла, Р. Смолли аз ИМА шакли нави алотропии карбон-фуллеренро кашф карда, соли 1996 бо Ҷоизаи нобелӣ сарфароз гардиданд.

1986 - аз ҷониби Г. Биннинг, К. Куатт, К. Гербер микроскопи атомӣ-кувағӣ сохта шуд ва заҳматҳои эшон соли 1992 бо Ҷоизаи нобелӣ қадрдонӣ гардид.

1987 - аввалин транзистори якэлектрониро физикони амрикоӣ Г. Футон ва Г. Долан (ширкати Bell Labs) ихтироъ карданд.

1988-1989 - ду гурӯҳ олимони бо роҳбарии А. Фер ва Г. Грюнберг новобаста аз якдигар ба кашфи асрори муқовимати магнитии гигантӣ

ноил мешаванд, ки ҳамчун эффекти кванто-механикии дар пардаҳои тунук мушоҳида гардид. Истифодаи ин эффект имконият медиҳад, ки информатсия дар дискҳои сахт бо зичии атомӣ сабт карда шавад. Ин кашфиёти соли 2007 бо Ҷоизаи нобели мушарраф гардид.

1989 - олимони амрикоӣ Д.Эйглер ва Э.Швейстер логошакли номи ширкати худашонро, яъне «IBM»-ро бо роҳи кучонидани атомҳо аз 35 атомҳои элементи ксенон дар сатҳи монокристалли никел менависанд. Ҳамчун дастоварди амалии нанотехнология ба намоиш мегузоранд.

1990 - коллективи олимони бо сардории В. Кретчмер (Германия) ва Д. Хаффман (ИМА) технологияи эффективии синтези фуллеренро пешниҳод карданд.

Ибтидои солҳои 90-ум дар Ҷопон барномаи давлатии «Технологияи атомӣ» («Atomic Technology» ба амалишавӣ оғоз намуд.

1991 - физики ҷовонӣ С.Иичма шакли нави алотропии карбон-наноайчаро кашф мекунад.

1993 - дар ИМА нахустин озмоишгоҳи нанотехнология ба фаъолият шурӯъ кард.

1994 - бори аввал аз тарафи Д.Бимберг (Олмон) лазери дар асоси нуқтаҳои квантӣ сохта ва ба намоиш гузошта шуд.

1998 - физики ҳолландӣ С.Деккер якумин маротиба нанотрансизторро дар асоси наноайчаро ихтироъ кард.

1999 - физикони амрикоӣ М.Рид ва Д.Тур принципи ягонаи манипулятсияи молекулаҳо пешниҳод намуд.

Ибтидои солҳои 2000-ум дар Ҷопон барномаи «Astroboy» бо мақсади рушди наноэлектроникаи ба шароити кайҳон мутобиқ буда, оғоз мешавад.

2002 - олими ҳолландӣ С.Деккер наноайчаи карбониро бо ДНК пайваस्त кард ва наномеханизми ягонаи онро омӯхт.

2005 - ширкати Altair Nanotechnologies дар ИМА ба истехсоли наноаккумуляторҳо шурӯъ намуд. Аккумуляторҳои  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  бо ёрии электрод дар давоми 10-15 дақиқа заряд мегиранд.

2006 - ширкатҳои Altairnano ва Bosheart Engineering байни худ барои якҷоя сохтани электромошин (электромобил) созишнома ба имзо расониданд. Аллақай моҳи июли 2006 ширкати Altair Nanotechnologies оид ба сохтани аккумулятори литий-ионӣ барои таъмини нахустин электромошин супориш гирифт.

2009 - олимони аз Донишгоҳи Висконсин-Мэдисон шабеҳии қонунҳои соишро дар микро ва наноолам муайян карданд.

### **§ 3.7. Ояндани рушди нанотехнология**

2019 - ноқилҳо барои васли компютерҳои василаҳои дигар аз байн мераванд.

2020 - компютерҳо аз лиҳози иқтисодӣ ҳисоб ба мағзи инсон баробар мешаванд.

2021 - дастрасии бидуни ноқил ба Интернет 85 фоизи ҷаҳонро фаро мегирад.

2022 - дар ИМА ва Аврупо қонунҳое таҳия мешаванд, ки муносибати байни инсонҳо ва роботҳо, аз ҷумла ҳуқуқ ва ӯҳдадорихои онҳоро танзим хоҳанд кард.

2024 - рондани мошинҳои бидуни компютер манъ хоҳад шуд.

2027 - роботи хусусӣ мисли яхдону чойник як чизи маъмул хоҳад шуд.

2028 - нирӯи офтоб ҷунон арзону паҳн хоҳад шуд, ки тамоми эҳтиёҷи инсоният ба энерҷиро хоҳад пӯшонд.

2029 - компютер имтиҳони Тюрингро супурда, мисли инсон соҳиби ақл буданаширо исбот мекунад.

2030 - Рушди нанотехнологияҳо дар саноат боиси хеле арзон шудани тамоми маҳсулот мешавад.

2031 - Принтерҳои 3D барои «чоп»-и аъзои бадани инсон дар тамоми бемористонҳо гузошта хоҳанд шуд.

2033 - роҳҳоро мошинҳои худкор пур мекунанд.

2034 - нахустин мулоқоти инсон бо интеллектӣ сунъӣ.

2037 - бисёре аз асрори мағзи инсон ошкор карда хоҳад шуд.

2038 - одам-роботҳо пайдо мешаванд.

2040 - шабакаҳои ҷустуҷӯиро тавассути гачетҳо дар бадани инсон ҷо мекунанд.

2041 - иқтидори Интернет назар ба имрӯз 500 миллион маротиба меафзояд.

2042 - нахустин таҷрибаи амалӣ кардани формулаи бемаргӣ бо шарофати нанороботҳое, ки масунияти инсонро такмил ва бемориҳоро аз бадан «тоза» мекунанд.

2044 - интеллектӣ ғайрибиологӣ, яъне сунъӣ назар ба интеллектӣ биологӣ миллиардҳо маротиба оқилтар мешавад.

2045 - оғози даврони сингулярӣ (singularity), ки дунё ба як компютери азим табдил мешавад...



## Адабиёт

1. *Алфимова М.М.* Занимательные нанотехнологии. - М.: БИНОМ, 2011. - 96 с.
2. *Балабанов В.И.* Нанотехнологии. Наука будущего. - М.: Эксмо, 2009. - 256 с.
3. *Головин Ю.И.* Наномир без формул. - М.: БИНОМ, 2012. - 543 с.
4. *Гусев А.И.* Наномаводы, наноструктуры, нанотехнологии. - М.: Физматлит, 2005. - 416 с.
5. *Деффейс К., Деффейс С.* Удивительные наноструктуры / пер. с англ.. - М.: Бином, 2011. - 206 с.
6. *Дьячков П.Н.* Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применение. - М.: БИНОМ, 2006. - 293 с.
7. *Кобаяси Н.* Введение в нанотехнологию. - М.: БИНОМ, 2008. - 134 с.
8. *Турчин А. и Батин М.* Футурология. XXI век: бессмертие или глобальная катастрофа? - Москва: БИНОМ, 2013. - 263 с.
9. *Zafari U., Permiakova M.Yu., Tyuterev V.G.* The electron structure of MgO@64 single well nanotube // Book of abstracts DSCMBS2014. - PP.51-53.
10. *Зафари У.* Энергетический спектр гетероатомных нанотрубок // «Наука и образование». - Томск, 2013, Том 1. - С.3-6.
11. *Зафари У.* Оптимизация электронной структуры углеродной нанотрубки C@66 // Маводи конф. байнал. «Нано-2014». - Душанбе, 2014, ДМТ. - С.78-80.
12. *Зафари У., Курбонов Н.* Манзараи нанотехнологии олам // Маҷаллаи «Илм ва ҳаёт», №2, 2015. - С.26-29.
13. *Курбонов Н.* Нанотехнология ва ояндаи илму техника // Рӯзномаи «Омӯзгор»-№47 (11959), (21.11.2014). - С.11; №48 (11960), (28.11.2014). - С.7; №49 (11961), (05.12.2014). - С.10.
14. *Курбонов Н., Зафари У.* Инқилоби дуюми квантӣ // Маҷаллаи «Маърифати омӯзгор», №5, 2015. - С.61-63.
15. *Курбонов Н.Б., Курбонов Г.Б.* Влияния наноуглеродных материалов на структуру механические и тепловые свойства полиамида-6 // Труды XIV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и изучения с веществом». - Иркутск, 14-16 сентября 2015. - С.243-246.