

Дәріс 4.

Көміртекті нанокұрылымдар: кластерлер, фуллерендер, көміртектік түтікшелер.

Дәрістің жоспары:

- 1 Көміртекті наноматериалдардың ерекшелігі
- 2 Көміртекті наноматериалдарды алудың әдістері
- 3 Көміртекті материалдардың қасиеттері

Көміртекті нанокұрылымды материалдар (КНМ), ерекше қасиетке ие болуына байланысты өндірістің көптеген орындарында қолданысқа ие бола алады. Өткізгіштігі бақыланатын, жоғары механикалық беріктік, химиялық инерттілігі, жаңа қондырғылар және жаңа материалдар жасау үшін, өндірісте кеңінен қолданылуы мүмкін. Көміртекті наноматериалдарға деген үлкен ғылыми–практикалық қызығушылықтың туындауына байланысты көптеген жариялымдар және шет елде конференциялар өткізіліп жатыр. Фуллерен, нанотүтік, графен сияқты көміртекті нанокұрылымды материалдар (КНМ), көптеген облыстарда кеңінен таралған, соның ішінде, күн батареяларында, сутекті отын элементтерінде және сутекті сақтау құрылғыларында.

Наноиндустрияның нысанының дамуына және күйіне сараптама жасап тұжырымдай келе қазіргі таңда нанотехнологияның кеңінен дамыған аумағына көміртекті наноматериалдардың (КНМ) синтезін, фуллерен тектес құрылымдар, көміртектің жаңа аллотропиясы түріндегі жабық түрі, қаңқалы,макромолекулярлы жүйелер жатады. Осы материалдардың ішінде ерекше орын алатыны, квази бір өлшемді нано нысанның жаңа сыныбына диаметрі 1...50нм және ұзындығы бірнеше микрометр болатын көміртекті нанотүтікшелер (КНТ) және нанотубулендерді жатқызуымызға болады.

КНМ алдыңғы және соңғы пішініне байланысты қазіргі таңда көміртекті наноматериалдарды қазіргі таңда алудың бірнеше факторлары бар, олардың негізгілері:

- Синтездеу жолы;
- Негізгі компоненттер;
- Синтездеудің технологиялық режимі.

КНМ сапалық мінездемесін кең диапазонда анықталуына байланысты синтездеу де шартты түрде кең спектрде жүргізіледі. Сол себептен зерттеудің нәтижесінде, КНМ қасиеті оның бастапқы қасиетіне мүлдем ерекше болып шығуы да мүмкін.

Созылыңқы цилиндрлік бұлттың серпімді механикалық қасиеті, дәл осындай нысандармен көміртекті нанотүтікшелердің серпімділік теориясы анықталады, параметрлер жинағын сипаттайды (серпімділік модулі). Білетініміздей серпімділік модулі E кернеу (σ) мен белгілі бір бағытталған бұлттың деформациясы (ϵ) арасындағы пропорционалдық коэффициенті.

КНМ негізгі параметрі, оның беріктілігін сипаттайтын шама, шекті Юнг модулі арқылы төмендегі формула арқылы анықталады:

$$E = \sigma / \epsilon = N / 2\pi R h E$$

$$E = \frac{Q}{E} = \frac{N}{2\pi R h E} \quad (1)$$

Мұндағы, σ – шекті кернеулік, шекті созылыңқы күш N арқылы анықталады, КНМ – ге тиісті оның ағындық көлемі; ϵ – осындай кернеуліктегі нанотүтікшенің созылуына қатысты (ұзындығының өзгерісіне байланысты); R – радиус КНМ; h – қабырғасының қалыңдығы.

Серпімділік модулінің сараптамасы бойынша қорытынды жасайтын болсақ нанотүтікшелі материалдар Юнг модулінің рекордтық мәніне ие. (орташа есептегенде ≈ 1 ТПа). Ескере кететін жайт, көп қабырғалы көміртекті наноматериалдардың (КҚКНМ) Юнг модулінің жалпы тізімнен төмен болу себебі, CVD – әдіспен синтездеуде ондағы

қаулардың болуына байланысты және де олардың білгілі бір диаметрді алуы (50...100 нм). Сонымен қатар, Е практика жүзінде нанотүтікшенің хиральді болуына тәуелді емес. Қызықты мәліметтер Раковым Э.Г жүргізген кейбір материалдардың механикалық қасиеттерін салыстырған кестеден көруімізге болады, соның ішінде КҚКНМ да (кесте 1).

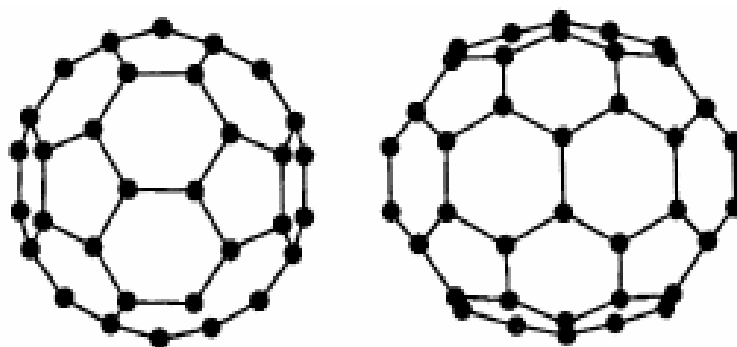
Кесте 1 – Материалдардың механикалық қасиеттерінің салыстырмалы көрсеткіші

Мінездемесі	Графит	Көміртекті наножіпше	КҚКНТ	БҚКНТ	Болат
Созылуға беріктілігі, ГПа	100	3...7	300...600	300...1500	0.4
Серпімділік модулі, ГПа	1000	200.....800	500...1000	1000....5000	2000
Меншікті беріктігі, ГПа	50	2...4	200...300	150...750	0,05
Меншікті серпімділік модулі, ГПа	500	100...400	250...500	500...2500	26
Шекті созылуы, %	10	1...3	20...40	20...40	26

Жоғарыда көріп тұрғанымыздағыдай КҚКНМ, бір қырлы көміртекті материалдарға карағанда беріктілік қасиеттері төмен. Сонымен қатар, КҚКНМ "ламповых абажуров" түріндегі (рис. 1.7, в) ұзындығының және енінің қысқалығы конустық бұрышын есептеу арқылы КҚКНМ және БҚКНМ цилиндрлік қабырғалыларының механикалық қасиетін анықтауға болады. Ұзындықты және конустық бұрыш өскен жағдайда жағдай кері қарай өзгереді.

1985 жылы Гарри Крото және Ричард Смоли қызметкерлерімен бірге, масс – спектрде алынған интенсивті шыңдар қатары, графит буында, лазер шоғының астында буландырып алынған, көміртегі кластерінікіне (немесе көп атомды молекулаға) сәйкес келеді. Олардың ішінде тұрақтылары C60 және C70. Құрылымдық талдаудан алынған нәтиже бойынша, олардың біріншісі футбол добының пішініне, ал екіншісі–регбий добының пішініне сәйкес келетіндігі анықталды. Кейіннен оларды, 1954 жылы үлкен ғимаратты қаптау үшін көп қырлы сфероид конструкцияға құрылыстық патент алған американдық архитектор Фуллердің құрметіне фуллерен деп аталды. Көміртегінің ашық пішіні жаңа болып табылады. Алмаз және графитке карама–қарсы, құрылысы атомның периодты ұяшығы ретінде болып келетін, кристалдық көміртегінің (фуллерендер) үшінші пішіні молекулалы болып табылады. C₆₀ каркас молекуласы 12 дұрыс бесбұрыштан (пентаган) және 20 теңқабырғалы емес алтыбұрыштан (гексаган) тұрады.

Синтезделген фуллерендердің саны мизерлі, сондықтан тағы бес жыл уақыт қажет болды, 1990 жылы Вольфганг Кретчмер және Дональд Хаффман, қуатты лазермен бірге көмір доғасын қолданып, осы құрылымды олар макроскопиялық өлшемде алды. Олар қолданған әдістер кез келген зертханада қолдануға ыңғайлы болатын.



Сурет 4.1 - C60 және C70 молекулаларының құрылысы

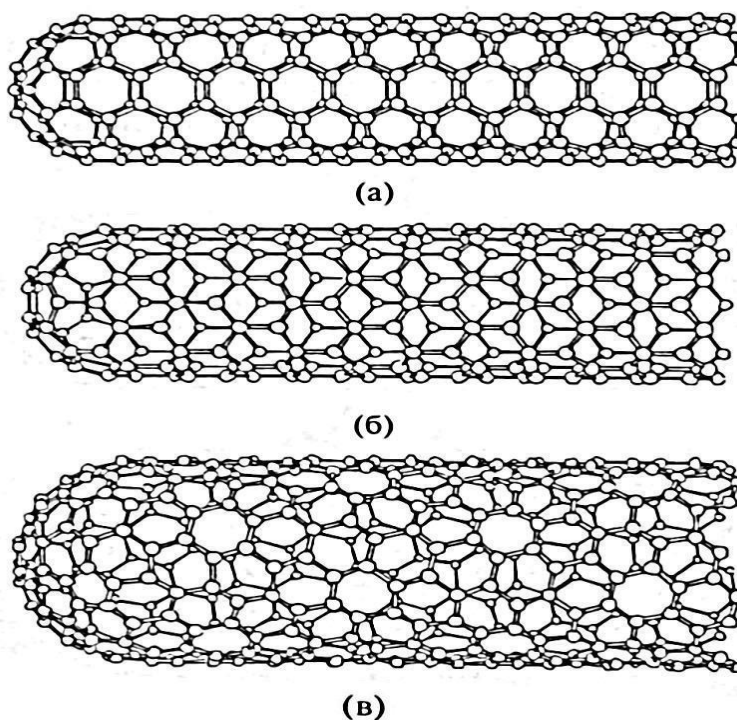
1991 жылы жапон микроскописті Сумио Инджима катодты күйеде графиттің жаңа құрылысы синтездеу қондырғысында фуллеренді ашуы ерекше маңызды болып табылады. Ең қызығы ұзын кеуешек талшықтар болды, фуллерен сияқты графит қабаттарынан тұратын диаметрі 1-ден бірнеше ондаған нанометр болатын, оларды көміртекті нанотүтіктер деп атайтын.

Көміртекті наноталшықтар (КН) — көміртек атомдарынан құралған, диаметрі 3 – тен 15 микронға дейін жететін жіңішке жіптен тұратын материал. Көміртегі атомдары микроскопиялық кристаллдармен байланыстырылған, бір – біріне параллельді тегіс орналасқан. Кристаллдарды тегіс орналастыру созылғанда үлкен беріктік береді талшық. Көміртегі атомдары микроскопиялық кристаллға біріктірілген, бір–біріне параллель тегіс орналасқан. Кристаллды тегістеу талшықтың созылуына үлкен беріктік береді. Көміртекті талшық созылғыштығы жоғары, меншікті салмақ төмен, температура өсуінің төменгі коэффициентін және химиялық инерттілігімен сипатталады.

Ең алғаш көміртекті талшықтың (КТ) алынуы және қолданылуы, электрлік шамда қыздырушы талшық ретінде қолданылған, ол 1880 жылы белгілі американдық өнертапқыш Томас Эдисон тарапынан ұсынылған және патенттелген болатын. Бұл талшықтар мақта немесе вискозды талшықты пиролиздеу нәтижесінде алынған және олар сынғыштығымен және жоғары кеуектілігімен және кейіннен вольфрамды жіптің орнына алмастырылды. Соңғы 20 жылда ол көміртекті және графиттелген талшықтарды табиғи талшықтардың негізінде алудың әр түрлі жолдарын ұсынды.

XX ғасырдың ортасына қарай материалдарды іздеу барысында көміртекті талшықтарға деген екінші қызығушылық пайда болды, ракеталық қозғалтқыштар жасау үшін композитті компоненттер негізінде қолдануға қажет болды. КТ өзінің қасиетіне байланысты армирлеуші материалдар негізінде қолдануға лайықты бірден–бір материал болып табылады, себебі олар жоғары термотөзімділік, жақсы жылу өткізбейтін қасиетіне байланысты, газды және сұйық орта әсерінде коррозияға төзімді, жоғары меншікті беріктілік және қаттылыққа ие. КТ негізінен химиялық термиялық өңдеу немесе табиғи органикалық талшықтан алынады, талшықты материалда онда басты бейнеде көміртек атомдары қалады. Температуралық өңдеу бірнеше сатыдан тұрады. Оның біріншісі бастапқы сатысы 250°C температурада 24 сағат бойы ауада талшықтың қышқылдандыруы (полиакрилонитрильді, вискозды). Қышқылдандыру нәтижесінде сатылы құрылым пайда болады, 1 – суретте көрсетілгендей. Қышқылдандырудан кейін талшықты азотты немесе аргонды ортада температурасы 800 – ден 1500°C қыздырып карбонизациялау стадиясы болады. Карбонизация нәтижесінде графит тәрізді құрылым түзіледі. Термиялық өңдеу процесі температурасы 1600-3000°C графиттелумен аяқталады, бұл сатыда инертті ортада жүргізіледі. Графиттелу нәтижесінде талшықтың құрамында көміртегінің саны 99% жетеді. Сонымен қатар органикалық талшық (көбінесе вискозды және полиакрилонитрильді), КТ алу үшін арнайы талшықтар фенольды смоладан алынған, лигнина, тас көмір және мұнайлы шындар қолданылады.

Көміртекті нанотүтіктер графит қабатынан түзілген, түтіктерге оралған. КНТ бір қабырғалы (БҚКНТ) және көп қабырғалы (КҚКНТ) болуы мүмкін, көміртекті көп қабырғалы нанотүтікше бір-біріне орналасқан коаксиалды түтіктердің жиынтығы немесе көп рет оралған графиттік қатпарлардың жиынтығы болып табылады. Қабаттар арасындағы арақашықтық КҚКНТ жуық шамамен $\sim 0,34$ нм (графиттегі сияқты), көміртектің көршілес атомдарының арақашықтығын графитті жазықтықтармен 0.142 нм салыстыруға болады. Әдеттегі БҚКНТ көлденең өлшемі жуық шамамен ~ 1 нм–ден бірнеше нм құрайды, КҚКНТ – 10 нм – ден жоғары. КНТ ерекше қасиетке ие. Олар жарылуға қарсы жоғары механикалық беріктілікке ие, БҚКНТ Юнг модулі $(1\div 5)\times 10^{12}$ Па дейін жетеді, болатқа қарағанда бір саты жоғары. КНТ жоғары жылуөткізгіштікке және жоғары термо – және химиялық тұрақтылыққа ие, әсіресе БҚКНТ, шындыққа өте жақын кристаллдық құрылымға ие. Құрылымына байланысты олар металлдық немесе жартылайөткізгіш электрлік өткізгішті сипатқа ие, сондықтан оларды наноөткізгіштер ретінде қолдануға болады, сонымен қатар өрісті транзисторларда және өндірісте олардың негізінде қазіргі таңда дәстүрлі жартылайөткізгішті (кремний, $A^{III}B^V$ және т.б.) материалдардан жасалып жатқан электронды схемалар және датчиктер жасалуы мүмкін. 1990 жылдан бастап КНТ интенсивті түрде зерттеулер жүргізіліп басталды, уақыт өткен сайын жан – жақты көптеген зерттеулер жүргізілді, КНТ синтездеудің әртүрлі жолдары табылды, олардың қасиеттерін зерттеу және оларды әр түрлі облыстарда қолдану, мысалы қондырғы жасау үшін жартылайөткізгішті құрылымдар өрісті транзисторларда, күн элементінде, әртүрлі композитті материалдар, суперконденсаторлар, армирлеуші полимерлер, катализаторлар және т.б. қондырғылар жасауда қолданылады.

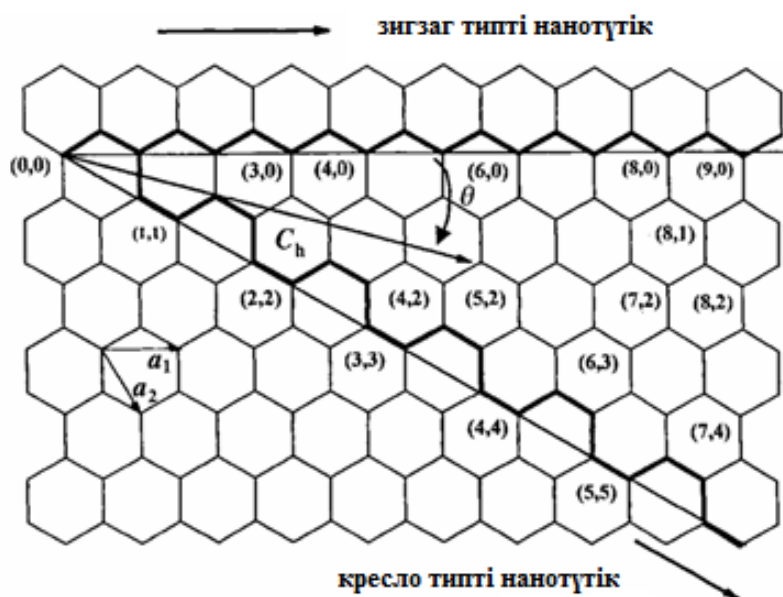


Сурет 4.2 - Көміртегі нанотүтік: а – "кресло" типті; б – "зигзаг" типті; в – хиральді КНТ

КНТ зертеудің өзектілігі осыған дейін азайған емес, соңғы жылдардағы жариялымдар, оларды өңдеу жолдарының қарапайымдылығын және синтездеу үшін шығынның аз кетуін көрсетеді.

КНТ синтездеудің дәстүрлі жолдары болып лазерлі абляция, доғалық разряд, газдық фазада химиялық тұндыру (CVD). CVD әдісі сонымен қатар оның модификациясы: қосымша плазмамен әсер ету (PECVD) және жалған қайнайтын қабатты реакторды қолданумен өндірісте кеңінен қолданысқа ие болып табылады.

БҚКНТ құрылысы және классификациясы: Тамаша бір қабырғалы көміртекті нанотүтіктерді ешқандай тігіссіз қуысты цилиндрлік оралған графен парағы (көміртегі атомының гексагональды қабаты, 3-сурет) сияқты болады. Бұл көрініс БҚКНТ өсу механизміне мүлдем қатысы жоқ бірақ нанотүтіктің құрылысын көрнекі көрсетеді. Бірқабырғалы көміртекті нанотүтіктің диаметрі 0,4-4 нм болғанда ұзындығы бірнеше ондаған микронды құрайды. Сондай әрбір цилиндрдің соңы жартылай фуллерен сияқты сферамен тұйықталған, пентагон бөліктерінен құралған (4-сурет), БҚКНТ минимальды диаметрі C_{60} фуллеренінің диаметрімен сәйкес келеді және 0,4 нм құрайды.



Сурет 4.3 - Хиральдық векторы $C_h = na_1 + ma_2$ және хиральдық бұрышы θ БҚКНТ түзілу схемасы

Графиттегі сияқты, әрбір көміртегі атомы үш көрші атомдармен ковалентті байланысқан және әрбір байланыста sp^2 -гибридизация күйінде 120° бұрышпен тұрады. Графиттегі перпендикуляр жазықтықтар p_z -орбитальда орналасады, қатысқан әртүрлі нанотүтіктермен әлсіз Ван-дер-Ваальс байланысқан, нәтижесінде шоғырда 20-30 дана оларда агрегациясы болады. Көрші орналасқан нанотүтіктердегі Ван-дер-Ваальс саңылауы 0,315 нм құрайды. Сол уақытта, графендегі жоғары қисықтық жеткілікті болғандықтан, түтік шетіндегі көміртекті атомдарындағы байланыс sp^3 -гибридизация орбитальдарындағы үлестірілуін міндетті түрде бақылау керек. Нанотүтіктердің цилиндрлік құрылысы хиральды вектормен—графен қабатында вектор бойынша жік болатыны суреттелген. Бұл векторды (графит жазықтығында жік орналасқан жермен сәйкес келеді) мына түрде жазуға болады:

$$C_h = na_1 + ma_2 \quad (2)$$

Мұндағы a_1, a_2 —гексагональдық қабаттағы базисті вектор, a n және m —бүтін сандар (хиральдық индексі) (3—сурет). БҚКНТ-ның шеңбер ұзындығымен C_h модуль векторы дәлме—дәл сәйкес келеді, ал жұп m және n бүтін сандары түтік құрылысын анықтайды. Хираль векторы хираль бұрышы θ мен хираль векторы арасындағы және гексагональды

қабаттағы a_1 базис векторы арасындағы байланысты сипаттайды. Хиральдық индекс пен бұрыш θ арасындағы байланыс мына қатынас арқылы анықталады:

$$\theta = \arctan \left[-\sqrt{3} \frac{m}{2n+m} \right] \quad (3)$$

мұндағы $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$.

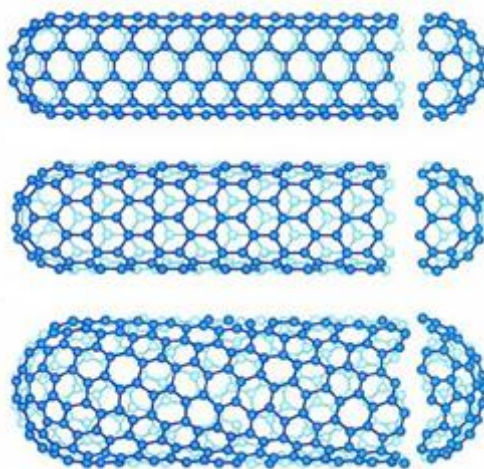
Хиральдық вектор жалпы тұйықталмаған ақаусыз БҚКНТ суреттейді, оның диаметрін қарапайым геометриялық формуламен анықтауымызға болады:

$$D = C_h / \pi = \frac{\sqrt{3} a_{c-c} (m^2 + mn + n^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi} \quad (4)$$

Мұндағы көршілес көміртекті атомдарының арасындағы арақшықтық $a_{c-c} = 0,142$ нм.

Гексагональды тор жоғары симметриялы болғандықтан көптеген нанотүтіктегі түйіндер баламалы, алайда бір –біріне хираль векторы сәйкес келмейтін облыстар жиыны кездеседі,өзі сектор 30° графит жазықтығының $1/12$ бөлігін құрайды. Көміртекті нанотүтіктерді хираль бұрыштарына байланысты келесідей жіктеледі (4 – сурет):

- зигзаг бейнелі ($\theta = 0^\circ$, $C_h = (n, 0)$);
- кресло бейнелі ($\theta = 30^\circ$, $C_h = (n, n)$);
- хиральды ($0 < \theta < 30^\circ$, $C_h = (n, m)$).



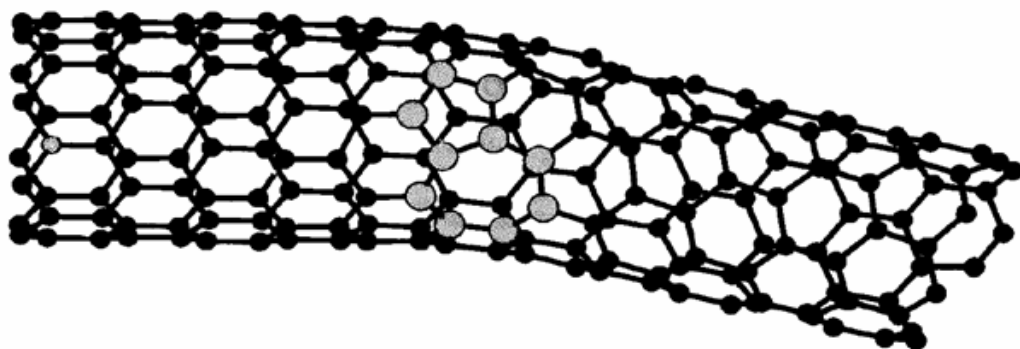
кресло бейнелі нанотүтік (5, 5); зиг-заг бейнелі (9, 0) және хиральды (10,5) нанотүтіктер.

Сурет 4.4 - БҚКНТ конфигурациясы графит қабатындағы әртүрлі жік векторымен, жартылай шеңбермен тұйықталған C_{60}

Қазіргі таңда нанотүтіктерді хиральдық векторлары бойынша классификациялау кеңінен таралған.

Көміртекті нанотүтіктерде көлемді кристалдық қатты денелердегі сияқты ақаулар пайда болуы мүмкін. Әдетте ол гексагональды қабаттың бұзылуы түрінде болуы мүмкін: кеңінен таралған ақаулар көміртекті кезеңді 5-7 мүшелі (5 – сурет). БҚКНТ ақаулардың пайда болуы хираль векторының өзгерісі, түтіктің майысуына және оның диаметрінің өзгерісіне алып келеді. Мысалы, көміртек атомына қатысты қарапайым ақау (жұп «пентагональды-гептагональды» фрагмент) атомдардың минимальды майысуына алып келеді (0° ден 15°), сонымен қатар БҚКНТ құрылымдық түрін өзгерте отырып. 5 –суретте

БҚКНТ (8,0) ден (7,1), хиральды векторын өзгерісін көрсетеді, оның зигзаг бейнелі конфигурациядан хиральдыға өтуі, ақау байланысқан аумақта болады. Сондай ақаулардың бар болуы кейбір катализаторларды қолдану синтезде алатын имек және спираль тәрізді нанотүтіктердің пайда болуымен түсіндіруге мүмкіндік береді [7].



Сурет 4.5 - БҚКНТ хиральды вектордың өзгерісіне алып келетін ақау

Көп қабырғалы көміртекті нанотүтік (КҚКНТ). Көп қабырғалы (multi-walled) нанотүтіктер бір қабырғалыдан ерекшелігі әртүрлі формалы және конфигурациялығы болып табылады. Құрылымының әртүрлілігі бойлық және көлденең бағыт бойынша пайда болады.

Құрылымы «орыс матрешкасы» (russian dolls) сияқты, коаксиальды бір –біріне енгізілген цилиндрлік түтіктер ретінде болады. Бұл құрылымның басқа түрі ретінде бір–біріне енгізілген коаксиальды призмалардан тұрады. Ең соңғы келтірілген құрылымы түтікше сияқты оралған қағаз (scroll) сияқты болып келген.

Барлық құрылымдар үшін көршілес жатқан графиттік қабаттар арасындағы арқашықтық, ең жақын шама 0,34 нм, көршілес кристаллдық графит жазықтықтары арасындағы өзіне тиісті арақашықтық.

Көп қабырғалы нанотүтіктердің осы және алдыңғы құрылымын шындығында алу экспериментальды жағдайда синтездеу шартына тәуелді болады. Экспериментальды сараптаманың мағлұматы көрсеткендей, көп қабырғалы құрылымды әдеттегі құрылымы ұзына бойында үздікті орналасқан «орыс матрешкасы» немесе «папье–маше» сияқты болады. Сөйтіп, кіші өлшемді «түтік» үлкен өлшемді түтіктің ішіне енгізілген. Мұндай үлгінің пайдасы бойынша, мысалы, калийдің интеккаллирлеуі және хлорлы темір факты бойынша «түтік аралық» кеңістік және «моншақты» түрде пайда болады.

Электрлік қасиеті

Көміртекті нанотүтіктердегі ең көп қызығушылық тудыратыны олардың диаметрлеріне және хиральдылығына байланысты металл және жартылайөткізгіш болу қасиеті. Бұл жердегі хираль термині түтіктің графитті қабатқа қатысты бүктелуіне байланысты қолданылған. Синтез нәтижесінде әдетте түтік қоспасы, үштен екі бөлігі жартылайөткізгіштік қасиетке ие, ал қалған үштен бірі — металлдық қасиетке ие болады.

Нанотүтіктің металлдық күйде өткізгіштігі өте жоғары болады. Квадрат сантиметр ауданда олар миллиард ампер токты өткізе алады. Мыс өткізгіш квадрат сантиметр ауданда миллион ампер бергенде құрылысынан шығып кетеді, джоульді қыздыру өткізгіштің балқуына алып келеді. Көміртекті нанотүтіктердің жоғары өткізгіштікке ие болуының себебі ақаудың аз болуы, шамданған электрондардың шашырауы, сондай – ақ кедергісінің өте төмен болуында. Сондықтан түтікті үлкен токпен мыс өткізгіш сияқты қыздырмайды. Бұл сонымен бірге нанотүтіктің жоғары жылуөткізгіштікке ие болу мүмкіндігін туғызады. Ол алмаздың жылуөткізгіштігін екі есеге арттырады, бұл түтіктің жылуды жақсы өткізетінін көрсетеді.

Магниттік кедергі құбылысы деп электр кедергісін тұрақты магнит өрісіне қойған кездегі зат алмасуын айтамыз. Көміртекті нанотүтік төмен температурада магнитті

резистивті әсерді көрсетеді. 7 – суретте қосымша тіркелген магнит өрістің 2,3 К и 0,35 К температурадағы нанотүтіктің салыстырмалы кедергіге тәуелділік графигі көрсетілген. Бұл – теріс магнитті резистивті әсер, магнитті өріс ұлғайғанда кедергі азаяды, ал кері өлшеу – өткізгішті $G = I/R$ — ұлғаяды. Магнит өрісіндегі түтікке қосымша тіркелген өрісте олардың спираль қозғалысы байланысқан электрондарға жаңа энергетикалық деңгейлердің пайда болуын тудырады. Нанотүтік үшін бұл деңгейлер Ландау деңгейі деп аталады, бұл деңгей жоғарғы толтырылған деңгейлерге өте жақын орналасқан (Ферми деңгейіне). Басқа сөзбен айтқанда, электрондардың энергиясын ұлғайту үшін ықтимал күйліердің саны көбейіп, материалдың өткізгіштік қабілетін жоғарылатады.

Механикалық қасиеті

Көміртекті нанотүтіктер өте берік. Егер бөлменің төбесіне бекітілген жіңішке сымның аяғына, салмақ түсіретін болсақ W , онда сым созылады. Сымдағы S механикалық кернеулер жүктемелерге қатысты салмақ арқылы анықталады, сымның көлденең қимасы A :

$$\sigma = \frac{W}{A} \quad (5)$$

Салыстырмалы деформация ε ұзартылған ΔL сымның ұзындығына L қатынасы арқылы анықталады:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

Мұндағы, L — сымның күш түсірместен алдыңғы ұзындығы. Гук заңы бойынша, сымның ұзындығы күшке пропорциональды, сымның соңына қосымша тіркелген.

Жалпылама түрде айтатын болсақ, кернеу σ салыстырмалы деформацияға ε тура тәуелді:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (7)$$

Пропорциональды коэффициенті $E=LW/A\Delta L$ Юнг модулі деп аталады және нақты материалдың серпімлігін сипаттайтын қасиеті болып табылады. Юнг модулі мәні көп болған сайын материал кем икемді. Юнг модулі резеңкеге қарағанда 30000 есе үлкен болды. Көміртекті нанотүтіктерде Юнг модулі 1,28 -дан 1,8 ТПа аралығында ауытқиды. Бір терапаскаль (ТПа) шамамен атмосфералық қысымнан 107 есе үлкен. Юнг модулі 0,21 ТПа құрады, бұл дегініміз — көміртекті нанотүтіктерде болатқа қарағанда Юнг модулі 10 есе үлкен. Бұдан көміртекті нанотүтіктердің өте қатты және майыстыру қиын екендігін көреміз.

Дәрісті бекіту сұрақтары:

1. Көміртекті наноматериалдардың артылықшылықтарын атаңыз.
2. Көміртекті наноматериалдардың қасиеттері қандай?
3. Көміртекті наноматериалдарды синтездеу жолын атаңыз.

Әдебиеттер:

1. Кобояси Н. Введение в нанотехнологию. М.: БИНОМ. 2005, -134 с.
2. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. (Синергетика: от прошлого к будущему). М.: КомКнига, 2006, -592 с.
3. Пул-мл. Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии, (Мир материалов и технологий). М.: Техносфера, 2006, -336 с.