

MÜHAZİRƏ - 3

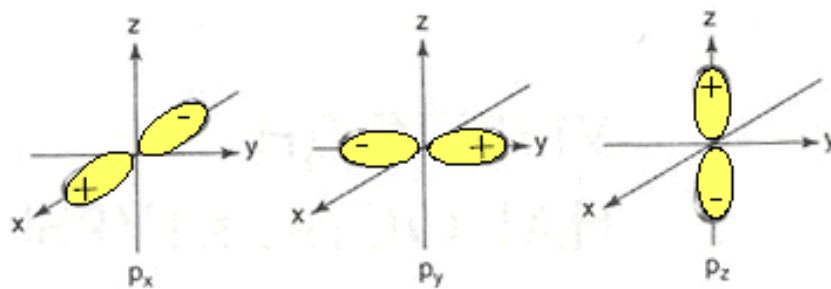
Karbon klasterləri:

füllerenlər, nanoborular, nanoalmazlar və qrafen

Nano aləmdə hal-hazırda mövcud olan klasterlər içərisində karbon atomundan yarananları həm sadəliyi, həm dayanıqlılığı baxımdan üstün hesab olunurlar. Bilirik ki, karbon digər elementlərdən fərqli olaraq, tərkibində yüzə qədər atom olan uzun zəncir yaratmaq qabiliyyətinə malikdir (buna “üzvi molekulların karbon skeleti“ deyirlər)^[1]. Onun bu qabiliyyəti isə karbon-karbon rabitəsinin xassələri ilə sıx bağlıdır.

Karbon rabitəsinin təbiətini başa düşmək üçün karbon atomunun elektron quruluşunu nəzərdən keçirmək lazımdır. Həyəcanlanmamış karbon atomunun 6 elektronu aşağı enerji səviyyələrində yerləşir. Karbon atomu molekulda digər atomlarla karbon rabitələri yaratdıqda, onun elektron quruluşu $(1s)^2$, $(2s)$, $(2p_x)$, $(2p_y)$, $(2p_z)$ kimi olur.

1s aşağı səviyyədə spinləri müxtəlif istiqamətlərə yönəlmiş, kvant ədədi $n=1$ olan iki elektron yerləşir. S halında elektronun yükünün paylanması sferik simmetrikdir və bu elektronlar (yəni 1s səviyyəsindəki elektronlar) kimyəvi rabitənin yaranmasında iştirak etmirlər. Digər 4 elektron isə ($n=2$ səviyyələrində) – bunlardan biri sferik simmetrik s orbitalında, üçü isə p_x -, p_y - və p_z -orbitallarında yerləşir. p orbitalında elektronun yükünün paylanması bir tərəfə çox uzadılmış formaya malikdir və onun oxları bir-birinə qarşılıqlı perpendikulyardır. Məhz bu orbitallar, yəni xarici s- və 3 p-orbitalları karbon atomunun digər atomlarla və özü ilə kimyəvi rabitəsinin formalaşmasında iştirak edirlər.



Şəkil. karbon atomunun p_x -, p_y -, və p_z - orbital sxemləri

Bu orbitallarda elektron yükləri eə paylanır ki, sanki onlar bir-birini örtüb, yəni 2 bağlı atomun elektron buludlarını bu atomları yapışdıran yapışqan kimi təsəvvür etmək olar. Ona görə də karbon atomları arasında yaranan rabitə daha möhkəm olur. Bunu əyani şəkildə cədvəl 1-dən də görmək mümkündür.

¹ Karbon skeleti terminini elmə 19-cu əsrin ikinci yarısında alman kimyaçısı F.A.Kekyle (1829-1896) gətirmişdir.

Cədvəl 1. Homonüvə rabitələrinin enerjiləri (kC/mol)

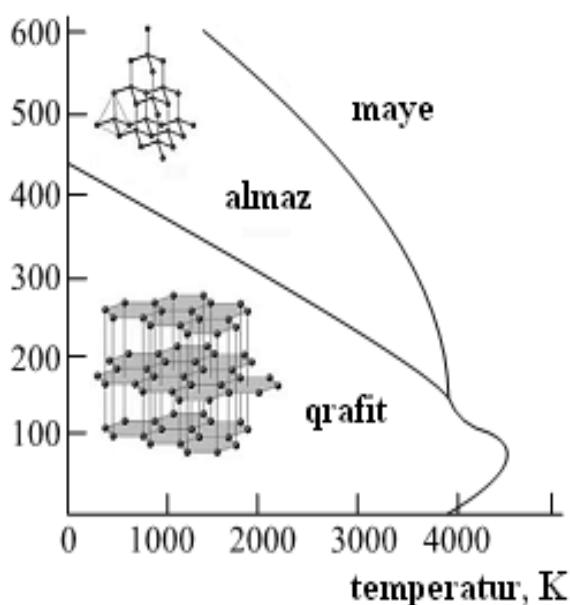
Kimyəvi rabitə	C-C	N-N	O-O	Si-Si	P-P	S-S
Rabitə enerjisi	348	163	146	226	201	264

Cədvəldən aydın olur ki, karbon-karbon arasında rabitə enerjisinin qiyməti azot-azot, oksigen-oksigen, silisium-silisium və s. arasındakı rabitə enerjisinin qiymətindən çoxdur (348 kC/mol-a bərabərdir). Məhz buna görə karbon zənciri daha dayanıqlı olur. Karbon atomunun digər üstünlüyü ondan ibarətdir ki, onlar öz aralarında müxtəlif növ, yəni birqat, ikiqat və üçqat rabitələr yaratmaq qəbiliyyətinə də malikdirlər. Bundan asılı olaraq onların rabitə enerjisinin qiyməti də fərqli olur (cədvəl 2). Məhz bu səbəbdən də karbon atomunun müxtəlif allotrop formalarını almaq mümkündür. Bunlardan ikisi – almaz və qrafit insanlara ta qədimdən məlum idi, molekulyar forma (füllerenlər), “nanoforma” (nanoalmaz və nanoborular) və qrafen isə son illər, yəni 20-ci əsrin sonlarında tapılmışdır.

Cədvəl 2. Karbon-karbon rabitələrinin enerjiləri (kC/mol)

Kimyəvi rabitə	C-C	C=C	C≡C
Rabitə enerjisi	348	612	838
Karbon atomunun hibrid halı	sp^3	sp^2	sp

Təzyiq, kbar



Qrafikdən görüldüyü kimi, adi şəraitdə ən dayanıqlı forma qrafit hesab olunur və termodinamikanın əsas postulatına görə karbonun bütün formaları gec və ya tez məhz qrafitə çevrilməlidir. Lakin bu çevrilmə sürəti o qədər kiçikdir ki, onu müşahidə etmək üçün bəlkə də əsrlər lazımdır. Bu çevrilmələr içərisində ən sadəsi qrafitdən almazın alınması hesab olunur ki, hətta bu prosesin reallaşması üçün yüksək təzyiq şəraitinin, yəni atmosfer təzyiqindən bir neçə min dəfə artıq təzyiqin

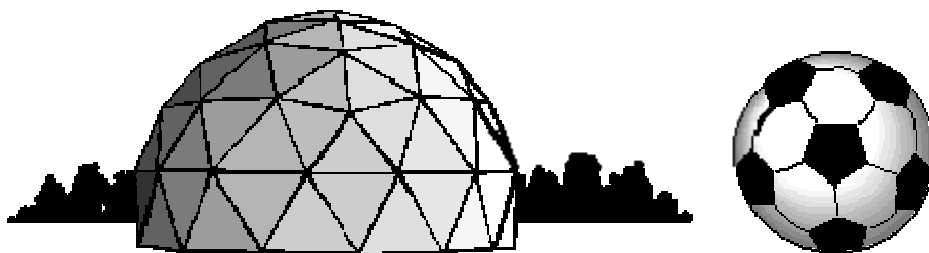
mövcud olması vacib şərtlərdən sayılır.

İndi isə C atomlarından ibarət klasterləri nəzərdən keçirək.

Füllerenlər və nanoborular

Füllerenlər – karbon atomunun almaz və qrafitdən başqa yeni allotropik formasıdır. Onun varlığını ilk dəfə nəzəri yolla söyləyiblər, sonra isə təbiətdə alıblar. Bu karbon atomlarından ibarət klasterlərdir, forma etibarilə isə futbol topuna oxşar sferayabənzər quruluşdur.

Füllerenlər memarlıqda bunaoxşar quruluşlardan ilk dəfə istifadə etmiş memar Füllerin şərəfinə belə adlandırılmışdır. Bu cür quruluşları *bakibol* da adlandırırlar.



Cədvəl 1. $P=101325 \text{ Pa}$, $1\text{ kC/mol}=1,03 \cdot 10^{-2} \text{ ev/molekul}$ qiymətlərinə uyğun ideal qaz halında C_{60} klasterinin termodinamik xassələri

T, K	Entropiya $S^0 \text{ C/K} \cdot \text{mol}$	İstilik tutumu $S^0_p \text{ C/K} \cdot \text{mol}$	Qrafitə nəzərən entalpiya KC/mol	$(H - H_0)/T$ C/K \cdot mol
300	547	502.6	2530	197.8
400	720.4	706.3	2529.4	300.3
500	896.4	870.2	2528.9	398.6
600	1066.7	996.1	2527.8	488.1
700	1227.8	1091.3	2526.1	567.8
800	1378.4	1163.3	2523.7	638.0
900	1518.7	1218.3	2520.8	699.5
1000	1649.4	1260.9	2517.5	753.6
1200	1885.0	1320.9	2509.4	843.6
1400	2091.7	1359.8	2499.4	914.7
1750	2400	1400.9	2477.1	1008.3
2000	2588.4	1418.9	2456.7	1058.5
2500	2907.6	1441.5	2406.5	1133.1
3000	3171.8	1456.2	2350.4	1185.8

Müəyyən olunub ki, ən dayanıqlı fülleren 1985-ci ildə Kroto, Smolli və Kerl tərəfindən kəşf edilmiş C_{60} , yəni 60 karbon atomundan ibarət klaster hesab olunur. Onun ölçüsü (burada diametri nəzərdə tutulur) $\sim 0,75$ nm-dir. C_{60} füllereninin bütün karbon atomları sp^2 -hibrid halındadır. Onun ionlaşma potensialı -7.6 eV, elektrona hərisliyi isə $2.6 \div 2.8$ eV-a bərabərdir. C_{60} füllereninin ideal qaz halında termodinamik xüsusiyyətləri cədvəldə verilmişdir.

C_{60} füllereni öz termodinamik sabitliyini 1700 K-ə qədər saxlaya bilir. Yüksək temperaturlarda o, asta-asta parçalanır: $T=1720$ K –də parçalanma sürəti sabiti $10s^{-1}$ -ə, $T=1970$ K-də isə $300 s^{-1}$ bərabərdir. Ona görə də C_{60} füllerenini sintez edən reaktorlarda temperatur 1600-1700 K tərtibindən çox olmamalıdır.

Tədqiqatlar nəticəsində klasterləri 36-dan 540-a qədər karbon atomlarından ibarət füllerenlər yaradılmışdır. Lakin bunların heç biri dayanıqlı olmamışdır, yəni müxtəlif təsirlər nəticəsində onlar parçalanmışlar.

Kvant-kimyəvi hesablamalar nəticəsində C_{20} füllereninin də varlığı söylənilmişdir, ancaq hələ ki, onu təcrübi yolla almaq mümkün olmamışdır. Bunu, quruluşun ölçüləri kiçildikcə, onun daha gərgin və polimerləşməyə meyilli olduğu ilə izah edirlər.

Elektromənfilik hesabına (yəni elektrona hərisliyə görə) C_{60} füllüreni parçalanmadan $C_{60}H_{36}$, $C_{60}F_{36}$, $C_{70}F_{44}$ birləşmələrini əmələ gətirə bilir.

Ümumiyyətlə, füllerenlər asanlıqla metallarla, ftorla reaksiyaya girərək, çoxlu törəmə birləşmələri yaradırlar. Bunlara misal olaraq, daxili boşluğunda bir və ya bir neçə metal atomları olan **endoedral füllerenləri**, fülleren kaskadının xarici səthinə funksional qruplar, və ya molekulardan ibarət zəncirvari quruluşlar birləşmiş **ekzoedral füllerenləri**, füllerenin bir və ya bir neçə karbon atomunun metal atomları ilə əvəz edilməsindən yaranan **fülleren törəmələrini** və s. göstərmək olar.

İlk endoedral fülleren, C_{60} füllereni kimi, 1985-ci ildə $LaCl_3$ ilə doyurulmuş qrafitin lazer buxarlanması yolu ilə alınmışdır ($La@C_{60}$ kimi işarə edilir).

Ekzoedral füllerenlərdən ($C_{60}H_2$, $C_{60}H_4$, $C_{60}H_{18}$ və s.) ən sadəsi $C_{60}H_1$ füllerenidir. Bu füllerenlər ftor törəməli füllerenlərlə müqayisədə daha az dayanıqlı olduqları üçün, son illər onlar ən az tədqiq edilən füllerenlərdir. Ona görə də elmi mətbuatda ftor törəməli ekzoedral füllerenlər sırasına ($C_{60}F_x$, $x=2 \div 60$) daha çox rast gəlinir. Bunlar içərisində ən dayanıqlıları $C_{60}F_{18}$, $C_{60}F_{36}$, $C_{60}F_{48}$ -dir.

İlk dəfə karbon atomunun borla əvəz edilməsindən yaranan törəmə fülleren $C_{59}B$ olmuşdur. O, tərkibində nitrid bor olan qrafit tabletlərinin lazer buxarlanması nəticəsində yaranmışdır. Sonralar bu tip füllerenlər Kreçmer metodu ilə alınmağa başlandı ($C_{59}N$, $C_{59}Fe$ və s.).

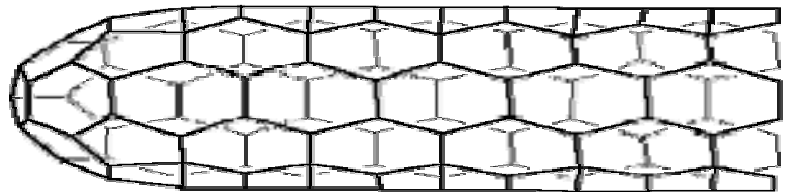
Füllerenlərdən istifadənin əhatə dairəsi çox genişdir. Belə ki, füllerenlərdən bir çox virus təbiətli xəstəliklərin, o cümlədən qripin, immun çatışmamazlığı, onkoloji və neyrogenerativ xəstəliklərin, və həmçinin, osteoporoz və damar xəstəliklərin müalicəsində istifadə edilə bilər.

Məsələn, son illər aparılan tədqiqatlarda daxilində radioaktiv element saxlayan C_{60} nanosferasının səthinə onun bədən xassəli şişlərin hüceyələrinə birləşməsinə

kömək edən qruplar yerləşdirilir və əmələ gələn yeni quruluşdan onkoloji xəstəliklərin müəyyən edilməsində və müalicəsində istifadə edirlər.

Nanoborular. İlk karbon nanoborusunun 1951-ci ildə sovet fizikləri L.V.Raduşkeviç və V.M.Lukyanoviç tərəfindən kəşf edilməsinə baxmayaraq, onların bu haqda yerli elmi mətbuatda gedən məlumatları nəzərdən qaçmış və heç kim bu kəşflə maraqlanmamışdır. Beləliklə bu kəşf, 1991-ci ildə yapon alimi Sumio İdjima tərəfindən uzun karbon quruluşu alınana kimi “bağlı” qalmışdır. Sonralar bu quruluşlar *nanoborular* adlandırılmışdır.

Karbon nanoboruları, diametri $1 \div n \cdot 10$ ($n=1,2,\dots,9$) nanometr, uzunluğu isə bir neçə mikrona qədər olan, bir və ya iç-içə bir neçə qrafit laylarının bükülməsindən yaranan silindrik quruluşlara deyilir. Borunun səthindəki karbon atomları düzgün altıbucaqlının təpəsində yerləşir. Onun sonu isə düzgün altıbucaqlı ilə bağlı olur.



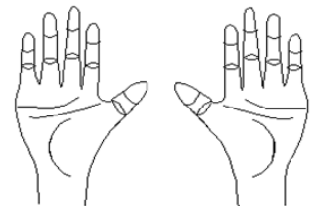
Karbon nanoboruları özündə həm nanoklasterlərə xas, həm də həcmli bərk cisimlərə xas xassələri birləşdirdiyi üçün, onlarda füllerenlərdən fərqli (mexaniki, sorbsiya, optiki və elektrik kimi) yeni xassələr biruzə olunur. Məhz onların bu xassələrindən gələcəkdə yeni nanomaterialların və nanoqurğuların yaradılmasında istifadə edilməsi nəzərdə tutulur və çox perspektivli hesab olunur.

Karbon nanoboruları yüksək temperaturda karbonun kimyəvi çevrilməsi nəticəsində yaranır. Onların alınmasında üç əsas üsulu xüsusi qeyd etmək lazımdır: 1) elektrik qövsündə qrafitin parçalanması; 2) lazer və ya günəş şüalanması ilə qrafitin ablyasiyası; 3) karbohidrogenlərin katalitik ayrılması.

Sintezdən asılı olaraq birlaylı, ikilaylı və s. borular almaq mümkündür. Aşağıdakı şəkildə qrafit layından nanoborunun əmələgəlmə mexanizmi sxematik təsvir edilmişdir.

İdeal birlaylı nanoboru düzgün altıbucaqlılardan ibarət qrafit səthinin burularaq silindrik səth yaratması yolu ilə əmələ gəlir. Burulmanın keyfiyyəti qrafit səthinin oriyentasiya bucağının (yəni yönəldiyi bucağın) nanoborunun oxuna və nanoborunun xirallığına nəzərən yerləşməsindən çox asılıdır.

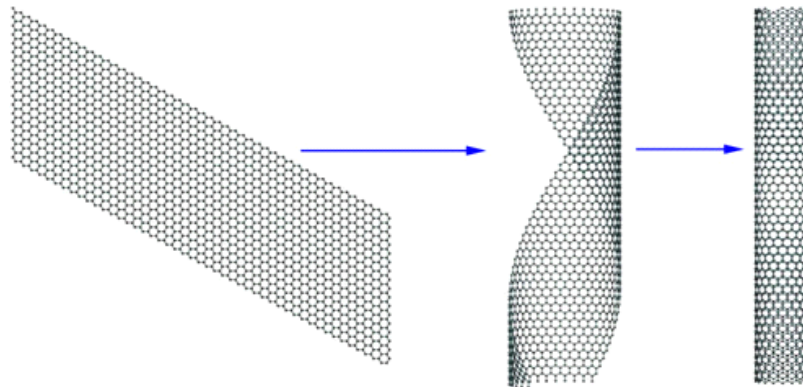
XİRALLIQ NƏDİR? «Xiral» termini (qədim yunanca «xiral» əl deməkdir) bəzi quruluşların özünün güzgü əksi ilə üst-üstə düşməməsi mənasından əmələ gəlmişdir. Xirallığa malik molekulalar iki – sağ və sol konfigurasiyalarda¹ ola bilər. Bu iki konfigurasiyanın birindən digərinə hətta fəzada ixtiyari bucaq altında fırlatmaqla da keçmək mümkün deyildir. Buna misal sağ və sol əlimizi göstərə bilərik.



Təbiətdə xirallığa malik molekulalara çox tez-tez rast gəlinir.

¹ Konfigurasiya (qədim latın sۆzү «configuratio»- formanın verilməsi, yerlənmə mənasını verir) cisimlərin xarici görünlüyü və onların bir-birinə nisbətində qarşılıqlı yerlənməsi deməkdir.

Onların hamısı qeyri-simmetrik karbon atomuna malik molekullardır. Belə molekullar nə simmetriya mərkəzinə, nə də simmetriya müstəvisinə malik deyil.



Qrafit layından nanoborunun yaradılması (soldan sağa)

Nanoborunun xirallığı təşkil olunduğu altıbucaqlının (m, n) koordinatları ilə, və ya α fırlanma bucağı ilə ifadə edilə bilər. Birlaylı nanoborunun xirallıq indeksləri ilə onun D diametri arasında aşağıdakı asılılıq mövcuddur:

$$D = \sqrt{m^2 + n^2 + mn} \frac{\sqrt{3d_0}}{\pi}$$

Burada $d_0=0,142$ nm olub, qrafit səthində qonşu karbon atomları arasındakı məsafəni göstərir. Xirallıq indeksləri ilə fırlanma bucağı arasındakı əlaqə isə aşağıdakı kimidir:

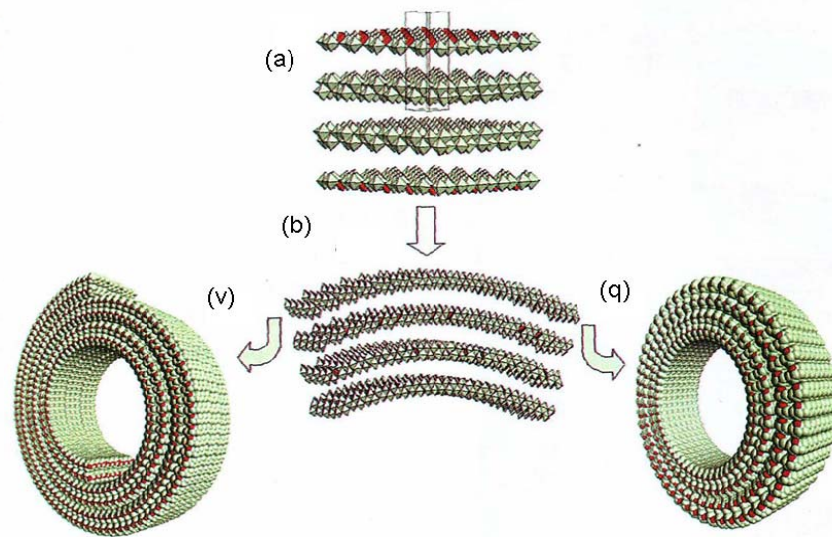
$$\sin\alpha = \frac{3m}{2\sqrt{m^2 + n^2 + mn}}$$

Sintez prosesində alınan borulardan üçdə ikisi (2/3-i) yarımkeçirici, üçdə biri (1/3-i) isə metallik xassələrə malik olur. Keçiricilik boru istiqamətində olduğu üçün, karbon nanoborularından birölçülü kvant naqili kimi də istifadə etmək olar.

Karbon nanoborularının malik olduğu unikal mexaniki möhkəmliyindən və elektrik xassələrindən biologiyada geniş şəkildə istifadə olunur. Belə ki, nanoborulardan fermentlərin və ferment komplekslərinin immobilizasiyasında (tərkibində onların yığılmasından) istifadə edirlər. Bundan başqa, nanoborular vasitəsilə dərman preparatlarını, makromolekulları, zülalları, DNT-ni lazım olan ünvana – xəstə hüceyrələrə, oqran və orqanellalara daşımaq da mümkündür.

Karbon nanoborularından başqa, 1992-ci ildə izrailli alim R.Tenne tərəfindən **qeyri-karbon nanoborusu** da sintez edildi. Bu nanoboruları su, və ya su-üzvi mühitlərdə bərk, və ya qaz fazasında ilkin maddələrin qarşılıqlı təsirləri nəticəsində kimyəvi üsulla - duzların termolizi prosesi ilə almaq mümkündür. Bunun üçün müxtəlif modellərdən istifadə olunur ki, bunlardan biri də dioksid titan TiO_2 nanoborusunun əmələ gəlmə modelidir. Qeyri-karbon TiO_2 nanoborusunun əmələ gəlmə modelini $3D \rightarrow 2D \rightarrow 1D$ sxemi kimi təsvir etmək olar. Əvvəlcə üçölçülü (3D) dioksid titan kristalı hər hansı bir məhlul daxilində, məsələn, NaOH

məhlulunda ikiölçülü (2D) quruluş yaradır ki, bu da öz növbəsində əylərək kənar atomların doymamış rabitələri ilə birləşməyə cəhd edir. Sonrakı burulmada ya divar kağızı rulonuna bənzər nanoquruluş, ya da bir-birinin içərisinə girmiş silindrik quruluş – nanoboru alınır. Eyni üsulla digər oksid birləşməli nanoborular da almaq mümkündür.



$BaV_7O_{16} \cdot nH_2O$ birləşməsindən (a) V_2O_5 nanoborusunun əmələ gəlmə sxemi (b): əyilən laylar nanotubulələr (v) və ya nanoborular (q) əmələ gətirir.

Bu yaxınlarda alimlər tərəfindən karbon nanoborularından möhkəmliyi baxımdan heç də geri qalmayan nitrid bordan və bir sıra metallardan (məsələn, qızıldan) ibarət nanoborular da yaradılmışdır.

Qeyri-karbon nanoborularının da karbon nanoboruları kimi tətbiq sahələri genişdir. Hal-hazırda bu nanoborular daha ətraflı şəkildə tədqiq edilir. Təcrübələr nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, bu nanoboruların bir çox fəaliyyət mexanizmləri materialın morfolojiyasından, səthi gərilməsindən, kristallik və elektron quruluşundan birbaşa asılıdır.

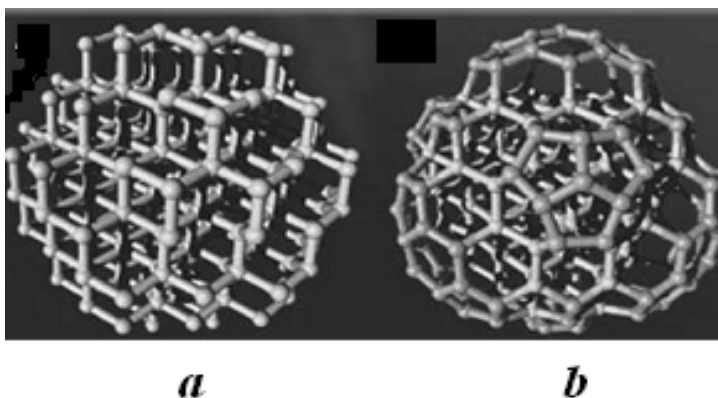
Nanoalmazlar

Karbon atomunun bütün nanoformaları arasında nanoalmaz təbii hala daha yaxın quruluş hesab olunur. Bilirik ki, adi almaz möhkəm kristallik quruluşa malikdir; onun hər bir karbon atomu sp^3 -hibrid halındadır və o, özünün 4 qonşusu ilə birqat rabitə əmələ gətirir. Bu quruluşun yaranmasında karbonun bütün valent elektronları iştirak etdiyi üçün, o elektrik cərəyanını keçirmir (yəni dielektrikdir).

Nanoalmaz adi almazdan yalnız ölçülərinə (nanoalmaz $\sim 2\div 4$ nm tərtibindədir) görə deyil, həm də karbon atomlarının əksəriyyətinin səthdə

yerləşməsi ilə fərqlənirlər. Bu səbəbdən də, nanoalmazın xassələri, adi almazın xassələri ilə müqayisədə bir sıra üstünlüyə malikdir.

Həqiqətən, səthi atomlar sərbəst valentliyə malik olduqları üçün, nanoalmazlar füllerenlər kimi bir-biri ilə 5- və 6-üzvlü tsiklər əmələ gətirə bilirlər. Məsələn, 275 atomdan ibarət almaz zərrəciklərinin kvant-kimyəvi hesablamalarından aydın olmuşdur ki, nanoalmazda əmələ gələn tsiklər quruluşca C_{60} füllerenində olduğu kimidir, yəni



otaq temperaturunda almaz nanozərrəcikləri “almaz nüvədən” və “fülleren” səthdən ibarət olur. Şəkildə həcmli almazın (a) və füllerenəbənzər səthə malik almaz nanozərrəciyinin (b) görüntüsü verilmişdir.

Nanoalmazın yaratdığı rabitələrin əksəriyyəti səthdə olduğu üçün, onun reaksiya qabiliyyəti də yüksək olur. Məsələn, həcmli almaz qrafitə 1800°S temperaturunda keçirsə, nanoalmaz - 1000°S -də; adi almaz havada 900°S -də oksidləşirsə, nanoalmaz - 450°S -də və s.

Zərrəciyin ölçüləri yalnız kimyəvi göstəricilərə deyil, həm də termodinamik göstəricilərə də təsir edir. Belə ki, otaq temperaturunda adi almaz endotermik maddə hesab olunursa (çünki onun qrafitdən yaranma reaksiyasının istiliyi mənfidir), diametri 5 nm olan almaz ekzotermik maddə hesab olunur.

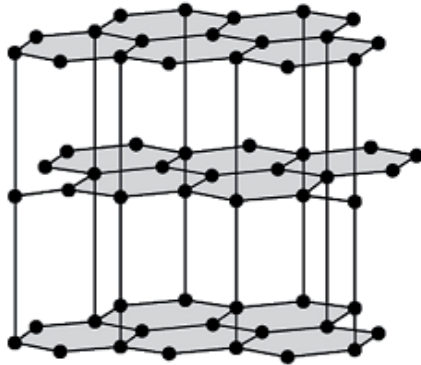
İlk dəfə nanoalmaz Sovet İttifaqında, nanotexnologiyalar haqqında təsəvvürlər mövcud olmayan zaman, alınmışdır.

Cədvəl 2. Almaz və nanoalmazın yaranma istilikləri

Almazın növü	$Q_{\text{əmələ gəlmə}} (298 \text{ K}), \text{ kC/mol}$	$\Delta H_{\text{əmələ gəlmə}} (298, \text{ K}), \text{ kC/mol}$
Adi almaz	-1.8	+1.8
Nanoalmaz (5 nm)	+4.8	-4.8

Qrafen

Qrafen karbonun ikiölçülü allotrop modifikasiyası olub, sp^2 hibridləşmə halındadır. Onun ikiölçülü kristal qəfəsi bir-biri ilə σ və π rabitələri ilə birləşmiş



bir atom qalınlıqlı karbon atomlarından yaranıb.

Ümumi halda isə qrafenə belə tərif vermək olar:

Qrafen qrafitin əmələ gəldiyi laylara deyilir.

Qrafitin kristallik quruluşu şəkildə verilib.

Qrafen layının qrafitdən üstünlüyü ondan ibarətdir ki, burada yalnız 3 elektron rabitə yaradılmasında iştirak edir, 1 elektron isə sərbəstdir. Bu da qrafenin yüksək keçiriciliyini təmin edir (onun elektrik müqaviməti 0,0014 Om-sm-ə bərabərdir). Bundan başqa, qrafen böyük

mexaniki sərtliyə də malikdir: ~ 1 TPa.

Bir atom qalınlığı tərtidində altlıq üzərində ilk qrafen layı 2004-cü ildə professor A. Geym və elmlər doktoru Novoselov tərəfindən alınmışdır. Bu ixtiraya görə onlar 2010-cu ildə Nobel mükafatına layiq görülmüşdür.

Qrafenin mövcud modelləri haqqında təsəvvürlər, onun zona quruluşunda qadağan olunmuş zonanın olmaması faktları alimlərə keçən əsrin ortalarından məlum idi və ilk dəfə bunlar P.Vollos tərəfindən söylənilmişdir. Lakin qrafenin bu və digər qeyri-adi spesifik xüsusiyyətləri öz təsdiqini altlıq üzərində qrafen layının kəşfindən və onun təcrübi tədqiqindən sonra, yəni 2005-ci ildə tapdı.

Alimlər qrafenin xassələrindəki qeyri-adiliyi yükdaşıyıcıların enerji spektrlərinin xüsusiyyətləri ilə və onun elektronlarının böyük mütəhərrikliyi ilə izah edirlər. Müəyyən olunub ki, qrafen elektronlarının mütəhərrikliyi müasir mikroelektronikada geniş istifadə olunan kristallik silisiumun elektron və dəşiklərinin mütəhərrikliyindən yüz dəfələrlə çoxdur.

Qrafendə elektronlar özlərini həm də relyativistik zərrəciklər kimi aparır, yəni onlar effektiv kütləsi "0"-a bərabər olan və 10^6 m/san sürəti ilə hərəkət edən zərrəciklərdir. Bu sürətin işığın vakuumda yayılma sürətindən 300 dəfə kiçik olmasına baxmayaraq, bu qiymət elektronların adi keçiricilərdəki sürətindən qat-qat yüksəkdir. Bundan başqa, elektronlar maqnit sahəsində qapalı orbit boyunca hərəkət etdikdə effektiv kütlədən fərqli kütləyə malik olurlar ki, bu kütləyə **siklotron kütlə** deyilir. (siklotron kütlə yükdaşıyıcıların maqnit sahəsində hərəkəti zamanı meydana çıxan və effektiv kütlədən fərqlənən kütləyə deyilir). Qrafendə siklotron kütlə ilə yükdaşıyıcıların enerji spektrləri və yükdaşıyıcıların konsentrasiyası arasında aşağıdakı asılılıq mövcuddur:

$$m_c = \frac{\hbar k_F}{v_F} = \frac{E}{v_F^2} = \left(\frac{\hbar^2 n}{4\pi v_F^2} \right)^{1/2}$$

Burada \hbar - Plank sabiti, v_F -Fermi sürəti (onun təcrübi qiyməti 10^6 m/san-dir), k – ikiölçülü fəzada dalğa vektorunun modulu, n – yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, E isə elektron və deşiklərin enerjisi olub, $\pm \hbar v_F k$ –ya bərabərdir.

İdeal qrafen 6-bucaqlı özəklərdən ibarət olur və onun kristallik quruluşunda ən yaxın karbon atomları arasındakı məsafə 0,142 nm-ə bərabərdir. Qrafendə 5-bucaqlı və 7-bucaqlı özəklərin formalaşması onda bir sıra defektlərin yaranmasına səbəb olur. Belə ki, 5-bucaqlı özəklər zamanı atom səthi konus formasında fırlanır; 7-bucaqlı özəklər zamanı isə səthdə yəhərə oxşar əyintilər əmələ gəlir. Lakin qrafen layında həm 5-bucaqlı, həm 6-bucaqlı, həm də 7-bucaqlı özəklərin birgə olması, müxtəlif formalı səthin formalaşmasına gətirib çıxarır, kələ-kötürlüyünə səbəb olur. Ümumiyyətlə, ideal formalı, yəni yalnız 6-bucaqlı özəklərdən ibarət qrafet almaq texniki cəhətcə hal-hazırda çox çətindir.

Tədqiqatlar nəticəsində alınan ən maraqlı fakt ondan ibarətdir ki, qrafenin silindrik formaya bükülməsi ilə birlaylı nanoboru yaranır və konkret fırlanma sxemindən asılı olaraq nanoborular ya metallik, ya da yarımkəçirici xassələri biruzə verir. Bundan başqa, ikilaylı qrafendə elektronlar özlərini maye kristallar kimi aparır.

2011-ci ildə Milli radioastronomiya abservatoriyasının əməkdaşları kosmik fəzada da qrafenin varlığını söyləmişlər.