



A LEPKESZÁRNYTÓL A GRAFÉNIIG

Az ezerarcú szén

Valamennyien tanultunk a középiskolában a szén két, egymástól nagyon eltérő módosulatáról, a grafitról és a gyémántról. A nyolcvanas évek közepe óta azonban három újabb módosulatot is előállítottak a kutatók: 1985-ben a futball-labdára emlékeztető szerkezetű fullerént, 1991-ben a szén nanocsöveket, 2004-ben a grafént.

A grafén előállításáért A. Geim és K. Novoszelov szokatlanul gyorsan, már 2010-ben megkapták a kémiai Nobel-díjat. Ez arra utal, hogy a díjra javaslatot tevők és a díjat odaítélő grémium egyaránt felismerte e különleges anyag jelentőségét, valamint potenciális hasznosíthatóságát. A grafén egy új anyagtípus, a 2D (kétdimenziós) anyagok első képviselője volt.

Az új szénmódosulatok szerkezetére az jellemző, hogy csak egyetlen atomrétegből állnak, amelyben a szénatomok szorosán illeszkedő hattagú gyűrűkben helyezkednek el, azaz gyakorlatilag hidrogénatomjaiktól megfosztott benzolgyűrűkből álló struktúráról beszélhetünk (1. ábra). Igen lényeges, hogy a gyűrűk síkja alatt és fölött egy viszonylag szabadon mozgó (delokalizált), ún. π -elektronokól álló felhő helyezkedik el, amelybe az egyes gyűrűk 6–6 elektront „adnak be”. Az anyagok ennek köszönhetik különleges tulajdonságaik némelyikét, például

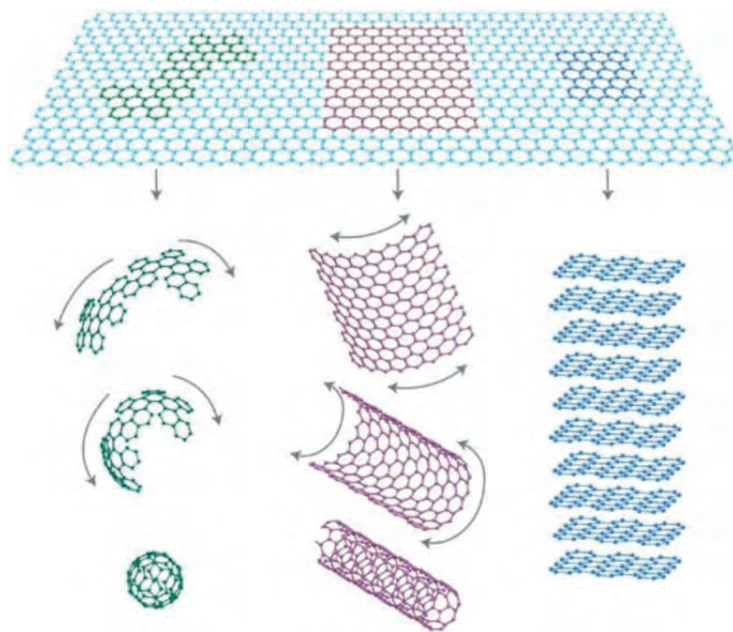
elektromos vezetőképességüket, illetve bizonyos körülmények között mutatott élénk színüket.

Igen érdekes, hogy e szénmódosulatok közül először a legbonyolultabb szerkezetűeket, a futball-labdára emlékeztető szerkezetű fulleréneket fedezték fel, amelyek a hatszögek mellett ötszögeket is tartalmaznak, mivel csak így jöhet létre a gömbszerű térbeli szerkezet. (A fullerénekre utaló első jeleket a csillagközi térben található porról származó spektrumokban mutatták ki, ott jelentkezett egy ún. C60 csúcs, amely egy 60 szénatomból álló szerkezetre utalt, s ez inspirálta a kutatókat egy ennek megfelelő térbeli struktúra megalkotására, majd bizonyítására.)

A másodjára felfedezett szén nanocsövek molekuláris méretű hengerek, amelyeknek falát a mintegy „feltekert”, egymáshoz illeszkedő csupasz benzolgyűrűk alkotják. Ez a szerkezet természetesen már megvalósulhat csupa hat szénatomos gyűrűből is.

Míg a fullerének és a szén nanocsövek megfelelő körülmények között (pl. kellően magas hőmérsékleten és igen csekély nyomáson, vákuumban) önszerveződéssel is keletkezhetnek, s már „csupán” szerkezetüknek és tulajdonságaiknak meghatározása, majd hasznosítási lehetőségeik feltárása volt hátra, addig cikkünk fő tárgyának, a grafénnek, vagyis a mindössze egyetlen atomrétegni hattuágú gyűrűt tartalmazó szénmódószulatnak az előállítása már az első lépéstől tudatos erőfeszítéseket igényelt. A grafén Nobel-díjas előállítóinak meglepően egyszerű módszerrel sikerült elérniük céljukat: egy tiszta grafitkristályra ráragasztottak egy cellulxhoz hasonló ragasztószalagot, majd lehúzták róla, így arról levált néhány réteg grafit. Majd az előzővel „szembefordítottak” egy hasonló ragasztószalagot, így a két szalag szétválasztása után a rétegek száma csökkent, s ezt a műveletet elégszer megismételve, egyetlen atomréteg marad az utolsó szalagon. Ennek tulajdonságai úgy vizsgálhatók, hogy a grafént egy, a mikroelektronikában használatos szilíciumtömb felületére, azaz valójában az azon kialakult oxidrétegre tapasztják. Az így kipreparált grafénrétegen elvégzett mérések a grafén számos különleges tulajdonságára világítottak rá, például arra, hogy csaknem tökéletesen átlátszó és kétszázszor erősebb az acélnál. A rugalmasság-méréseket az ún. atomerő-mikroszkóp (Atomic Force Microscope, AFM) segítségével lehet elvégezni, amellyel nanométernél kisebb elmozdulásokat is érzékelni lehet. Természetesen a grafénből nem lehet acélt helyettesítő tömböket vagy rudakat előállítani, mivel azok már grafitból lennének, amelyről tudjuk, hogy mennyire puha, hiszen amikor ceruzánkcal írunk, az írón hegyéből lehasadó grafitpikkelyek nyomot hagynak a papíron. Ezek a pikkelyek néhány grafénrétegből állnak, az egyes grafénrétegek közötti kötések azonban igen gyengék, a ceruza hegye és a papír közötti súrlódás elegendő a felszakításukhoz. A grafén azonban felhasználható az ún. kompozitanyagok tulajdonságainak javítására, segítségével például mindössze 350 gramm (!) súlyú kerékpárvázak állíthatók elő.

Hazánkban az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének Nanoszerkezetek Osztálya *Biró László Péter* akadémikus vezetésével számos, a grafénkutatás élvonalába tartozó eredményt ért el az elmúlt években. Így nem csoda, hogy a kutatócsoport — Magyarországról egyetlenként — 2014-ben elnyerte a csatlakozási lehetőséget az EU Graphene Flagship („zászlóshajó”) kiemelt nemzetközi tudományos programjához, melynek célja a grafénalapú eszközök kutatása és kifejlesztése. 2015 óta *Tapasztó Levente* vezetésével — aki az MTA „Lendület” programjának és az EU rangos ERC Kutatói Ösztöndíjának is nyertese — a kutatócsoport

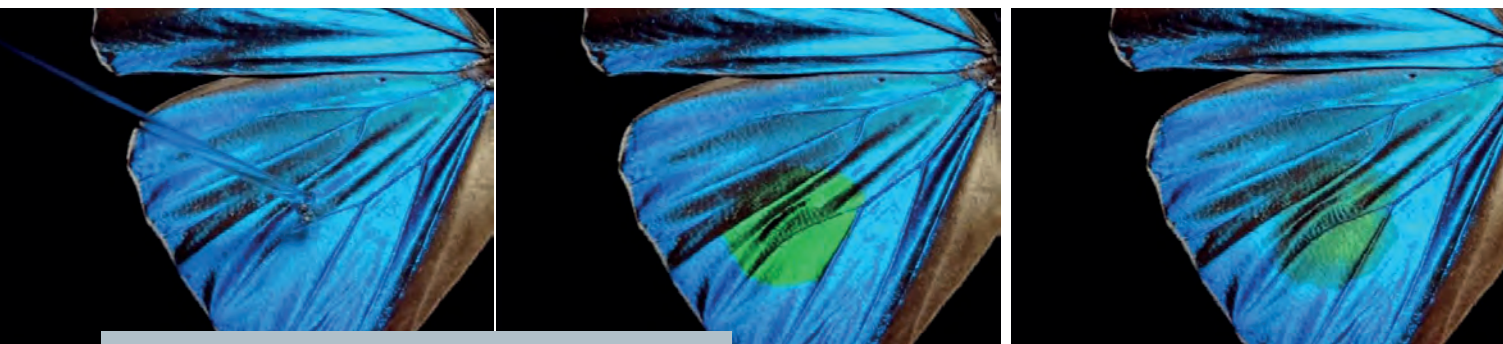


1. ábra. Fullerén, nanocső és grafén (A. K. Geim, K. S. Novoselov: The rise of graphene, Nat. Mater. 6, 183 (2007))

kiszélesítette vizsgálatainak körét a „grafénszerű” anyagokra. Ugyanis a grafén egy anyagcsalád — az ún. 2D (két-dimenziós) anyagok családja — első tagjának bizonyult, és az alkalmazásokban a család többi tagja, például a molibdén-diszulfid (MoS_2), szintén rendkívül ígéretes, sőt talán ígéretesebb, mint maga a grafén.

A mikrovilág törvényei gyökeresen különböznek a mindennapokban megszokottaktól. Ennek egyik nagyon fontos oka az, hogy az igen apró részecskék (mint amilyenek az ún. kolloidokban fordulnak elő), illetve az igen vékony rétegek esetében, mint amilyen a grafén, az atomok sokkal nagyobb része helyezkedik el a felszínen, mint az ún. tömbi anyagok esetében, és ahogy a víz felületi feszültségének példájából tudhatjuk, a felületi atomok egészen másként viselkednek, mint az anyag belsejében lévő atomok.

Ma már rendelkezésre állnak azok a technikai lehetőségek, amelyekkel atomi pontossággal „megt munkálható” a grafit, a szilícium-oxid- vagy az aranyhordozón elhelyezkedő grafénréteg. Ezekkel a nanolitográfiának nevezett eljárásokkal már sikerült (kristályhibák célzott beépítésével) csupán néhány atomnyi méretű tranzisztorokat, illetve egyéb áramköri elemeket létrehozni. Ez már nem a mikroelektronika, hanem a nanoelektronika világa. Azért lényeges ez, mert úgy tűnik, hogy két évente megduplázódik az adott terület egységen elhelyezhető/elhelyezhető áramköri elemek száma, tehát az integrált áramkörök tranzisztorainak száma exponenciálisan növekszik, és ma már milliárdoknál tart, és az áramkörök hőtermelése miatt, mivel a hő elvezetése



2. ábra. Amikor egy kék Morpho lepke szárnyára alkoholt csöppentünk (amely önmagában színtelen), a lepkeszárny kék színe zöldre változik, majd az alkohol elpárolgása után visszaáll a kék szín. A jelenség magyarázata az, hogy a lepkeszárny kitinszerkezetének nanoméretű lyukaiban a levegő kicserélődik alkoholra, és ettől a törésmutató arány változik

nem megoldható, adott területre már hamarosan nem lehet több mikroelektronikai elemet beszáfolni. Itt jelenthet segítséget a grafén kiváló hővezető képessége.

Az elektromosságot jól vezető és gyakorlatilag teljesen átlátszó grafén másik igen fontos felhasználási területe az elektronikus eszközök (mobiltelefonok, tabletek, síkképernyős tévék stb.) szükség esetén akár hajlítható képernyőinek előállítására lehet. Ez azért fontos, mert az erre a célra jelenleg használt indium-ón-oxid (InSnO) nagyon drága, és az indiumkészletek fogyásával egyre drágább lesz.

A grafén másik fontos tulajdonsága, hogy elnyeli a mikrohullámú sugárzást. Ez igen lényeges, és nem elsősorban a mikrohullámú sütők árnyékolása, hanem főként a kibernetikai biztonság szempontjából, hiszen az érzékeny adatokkal dolgozó számítógépek megfelelő árnyékolás nélkül az épületen kívülről is lehallgathatók, ami felmérhetetlen károkat okozhat állambiztonsági és ipari szempontból egyaránt. Néhány grafénréteg azonban nem elegendő a mikrohullámú sugárzás teljes elnyelésére, ehhez a rétegek közé szendvicsszerűen szigetelő (dielektrikum) rétegeket kell elhelyezni. Az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének Nanoszerkezetek Osztálya az elmúlt években ezeknek a megoldásoknak a kifejlesztésén is dolgozott.

Évek óta fontos kutatási téma az intézetben a lepkeszárnyak színét létrehozó nanoszerkezetű struktúrák vizsgálata, melyhez a Magyar Természettudományi Múzeum kurátora, *Bálint Zsolt* nyújt pótolhatatlan segítséget. Kémiai módszerekkel kék festékanyagot kinyerni akár a legszínpompásabb kék lepkék szárnyából sem lehet, csupán valamilyen szürke por a végeredmény (**2. ábra**). A gyönyörű színeket, amelyek a rátekintés szögétől függően akár változhatnak is, kitinből felépülő kb. 100 nanométeres

nyílásokat tartalmazó optikai rács hozza létre. Ebből állnak a lepkeszárny pikkelyei, amelyek a rájuk eső fényt (hullámhossza 450–700 nm lehet) színpompás mintázatot adva nyelik el, illetve verik vissza. Ezek a színek és mintázatok nem szemünk gyönyörködtetésére jöttek létre az 500 millió éves evolúció során, hanem számos fontos funkciót töltenek be a lepke életében, például a hőháztartásban, a párkeresésben és a mimikriában. (A kitin ún. poliszacharid, a rovarok páncélja is főként ebből áll.) Ha sikerül pontosan feltárni ezen fotonikus nanoszerkezetek felépítését, lehetővé válik az ún. biomimetikus (a természeteshez hasonló tulajdonságú) anyagok előállítása, amelyekkel környezetbarátabb módon lehetne megfelelő színhatásokat elérni, mint a kémiai nagyipar által előállított festékanyagok felhasználásával.

Hagyományos elektronikus eszközeink az áramokon és feszültségeken alapulnak, az áram és a feszültség viszont abból adódik, hogy az elektronnak elektromos töltése van. Azonban az elektron – mint elemi részecske – nem csak elektromos töltéssel rendelkezik, hanem önálló mágneses momentuma is van – ezt nevezzük „spin”-nek. Ahhoz, hogy az elektronikus eszközökben áramokat és feszültségeket mozgassunk, jelentős energiát kell befektetni, amelynek egy része nem is hasznosul, hanem hulladékhővé alakul. Ezen változtathat az ún. „spintronikai” eszközök kifejlesztése, ahol nem az elektronok töltése, hanem spinje hordozza az információt. Habár a szén önmagában nem mágneses anyag, a 2D grafénből kivágott nanoszalag bizonyos körülmények között ferromágneses, vagy antiferromágneses viselkedést mutat. A Nanoszerkezetek Osztály kutatói kimutatták, hogy grafén nanoszalagokból újfajta, háromállapotú tranzisztorokat lehet készíteni, amelyek egyszerre, vezérelhető módon mutatnak elektronikus és spintronikus viselkedést. A graféntranzisztor pedig már a közvetlen gyakorlati alkalmazás felé nyit utat.

Látható tehát, hogy a nanoszerkezetek kutatása néha egymástól igen távolinak látszó területeken is nagyon értékes eredményeket hozhat.

GÁCS JÁNOS