

LEHET-E TÖKÉLETES NANOELEKTRONIKAI ESZKÖZÖKET KÉSZÍTENI TÖKÉLETLEN GRAFÉNBÓL?

Márk Géza, Vancsó Péter, Biró László Péter
MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

A grafén a grafit egyetlen kristálysíkja, szénatomok hatszöges rácsba rendezett hálózata. Ez a 2004-ben előállított anyag, különleges tulajdonságai miatt, esélyes lehet a szilícium „leváltására” a nanoelektronikában. Ha grafént ipari skálán akarunk előállítani, erre a kémiai gőzfázisú leválasztás módszere (CVD) használható. Viszont ez a módszer „tökéletlen” grafént hoz létre, ugyanis a grafénsíkok sok kis kétdimenziós kristallitból, doménből, állanak. Ebben a cikkben azt a kérdést járjuk körül, hogy ez a polikristályos grafén alkalmas-e nanoelektronikai célokra.

Mi a grafén?

A grafitceruzát mindannyian ismerjük, tudjuk, ha a grafitot végighúzzuk a papíron, nyomot hagy. Ennek oka a grafit anyagszerkezetében rejlik: ez egy úgynevezett réteges anyag, ahol a rétegeken belül az atomok erősen kötődnek egymáshoz, ám a rétegek között gyenge van der Waals-kötés van, ezért a rétegek könnyen elválaszthatók egymástól. Le lehet-e választani egyetlen réteget a grafitból? *Andre Geim* és *Konstantin Novoselov* 2004-ben megmutatta, hogy ez valóban lehetséges, az így kapott egyetlen atomiréteg-vastagságnyi grafit neve *grafén*. Geim és Novoselov nemcsak létrehozták a grafént, hanem ennél sokkal többet tettek: okosan tervezett kísérletekkel megvizsgálták e leheletnél vékonyabb új anyag jellemzőit, és igen izgalmas, ígéretes tulajdonságokat találtak. Nem csoda, hogy ez a két kutató már 2010-ben elnyerte a fizikai Nobel-díjat [1].

Miért fontos a grafén?

G. E. Moore még 1965-ben észrevette [2], hogy a szilícium alapú integrált áramkörök „sűrűsége” (azaz az egységnyi felületre jutó áramköri elemek száma) exponenciálisan növekszik. Bizonyára Moore maga sem hitte volna, hogy ez a tendencia évtizedeken keresztül folytatódni fog [3]. Például egy mai kommersz flash memória eszköz („pendrájv”) 64 Gigabyte-os, ami azt jelenti, hogy néhány négyzetmilliméter területen $64 \cdot 1024^3 \cdot 8 = 5,5 \cdot 10^{11}$ bitet tárol. De a szakértők szerint (www.itrs.net) az exponenciális növekedés nem tarthat akármeddig – a szilíciumtechnológia fizi-

kaik tulajdonságai 2020 körül megállítják a növekedést. Ezért a mikroelektronikai ipar – amely lassan nanoelektronikába megy át, hiszen egy mai integrált áramkör vonalszélessége 30 nanométer körül jár – keresi, mivel lehet majd a szilíciumot felváltani.

Egyik, talán legígéretesebb „jelölt” a grafén [4]. Nem csoda, hiszen a grafénben a töltéshordozók mozgékonyasága $200\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ körüli – több, mint százszor nagyobb, mint a szilíciumé. A grafén hővezető képessége is kiváló, ami megoldhatja azt a súlyos problémát, hogy a miniaturizálással együtt növekszik az integrált áramkörök által termelt hő.

Előállítás – tépés és CVD

Még nem beszéltünk arról, tulajdonképpen hogyan állította elő Geim és Novoselov az egyetlen atomi réteg vastag szénréteget? E módszer nagyszerűsége a hihetetlen egyszerűségében rejlik: ragasztószalagot nyomtak a grafitkristály felületéhez és az ezen fennragadt néhány atomréteg vastag grafendarabokat vékonyították tovább úgy, hogy ismételték a ragasztószalagos leválasztási trükköt, egészen addig, amíg egyetlen réteg maradt. Ezt a trükköt nem túl nehéz utánozni, a mi laboratóriumunkban, az MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetében is megcsinálta a 2010-ben „Junior Prima” díjjal kitüntetett *Nemes-Incze Péter* kollégánk, ahogy ez az 1. ábrán látszik.¹

Ez a „tépéses” grafénelőállítási módszer kiválóan alkalmas laboratóriumi célokra, például graféntranszisztort is létrehoztak már így előállított grafénből. Ám ha a grafént ipari skálán (tonnaszámra) szeretnénk előállítani, akkor más módszer után kell néznünk! A manapság legígéretesebb ilyen módszer az úgynevezett kémiai gőzfázisú leválasztás (Chemical Vapor Deposition,

1. ábra. A grafén „tépéses” előállítása. A grafitkristályról ragasztószalaggal tépünk le rétegeket.



A 2013. évi Magyar Fizikus Vándorgyűlésen elhangzott előadás írott változata. További információk: <http://www.nanotechnology.hu>

¹ A grafén előállítás céljára természetesen nem „ceruzagrafitot”, hanem mesterségesen előállított grafit egykristályt (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG) használnak.

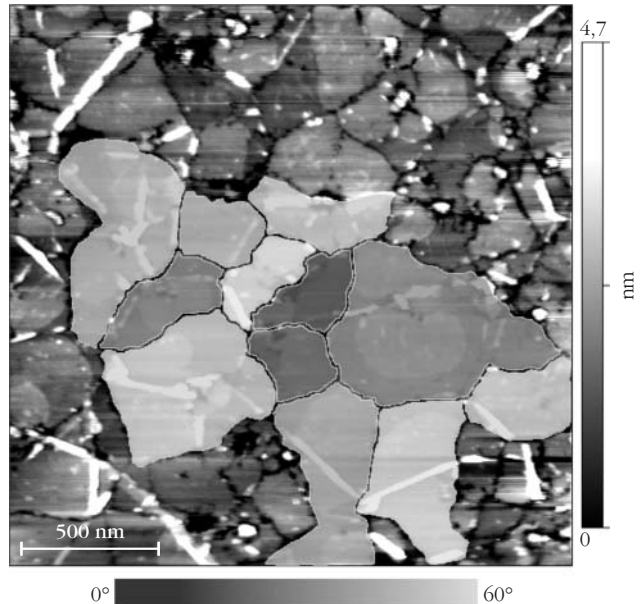
CVD). A CVD módszerben valamilyen széntartalmú gázt (például metánt) engednek egy magas hőmérsékletre (1000 °C) fűtött átmeneti fém (például réz) felületre. A folyamat paramétereinek (hőmérséklet, nyomás stb.) ügyes megválasztásával elérhető, hogy egyetlen grafitréteg (azaz grafén) keletkezzen a hordozó felületen. A CVD módszerrel akár méteres grafénrétegeket lehet létrehozni, sőt a módszer folyamatos üzemre is alkalmas, amikor egy elméletileg „végtelen hosszú” és akár méternyi széles grafénszalagot hoznak létre.

A CVD módszer tehát alkalmas arra, hogy olcsón és ipari méretekben állítsunk elő grafént. Am van egy szépséghibája: a CVD módszerrel készült grafén polikristályos, azaz apró, 100-1000 nm méretű, szabálytalan alakú lemezekből áll, mint a 2. ábra mutatja. A CVD grafén azért polikristályos, mert amikor a metán érintkezésbe kerül a rézfelülettel, egyszerre sok helyen indul meg a kristályosodás. Az így képződő kis grafénlemezek mindaddig növekednek, amíg össze nem érnek (3. ábra), ekkor az érintkezési vonalon szemcsehatár alakul ki. A grafén szemcsehatár ugyanúgy kristallitok közötti határ, mint a szilárdtestfizikában megszokott szemcsehatárok, de mivel a grafén kétdimenziós (2D) kristály, a szemcsehatár egydimenziós (1D), vonalszerű objektum lesz. A két, egymás felé növekvő, majd érintkező grafén szemcse kristálytani orientációja általában eltérő, a szemcsehatár mentén úgy kell elhelyezkednie a szénatomoknak, hogy a kétféle, eltérő orientációjú rács csatlakozni tudjon egymáshoz.

Természetesen a HOPG grafit tépésével kapott grafén rétegek sem tökéletes egykristályok, azok is tartalmazhatnak szemcsehatárokat. Csakhogy ebben az esetben a szemcsék egyrészt sokkal nagyobbak, másrészt a szemcsehatárok szabályosabbak. A cikk következő részében részletesen megvizsgáljuk, mit jelent ez a „szabályosság” és melyek a következményei.

Szabályos és szabálytalan szemcsehatárok

A tökéletes grafén egykristályban minden szénatomnak pontosan három szomszédja van és a szénatomok három kötése a grafén síkjába esik, a kötések egymással 120 fokos szöget zárnak be. A szénnek ezt a módosulását nevezi a szaknyelv – bár talán kicsit pongyolán – „sp² hibridizáció”-nak. A grafénben a szénatomok



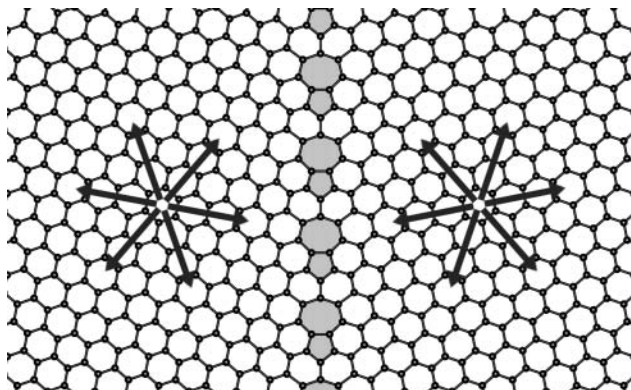
2. ábra. Ez a pásztázó erőmikroszkópos (AFM, Atomic Force Microscopy) kép a CVD grafén doménszerkezetét mutatja. A domének határvonalai a képen feketék. A fehér vonalak a grafén felgyűrődései. Az egyes szemcsék kristálytani orientációját különböző – áttetsző – szürkeárnyalatok jelzik. (Nemes-Incze Péter (MTA TTK MFA) felvétele.)

rácsa tökéletesen szabályos hatszögrácsot alkot. Mi történik, mikor két, egymás felé növekvő grafén szemcse összeér? Lehetséges-e úgy „összevarrni” a két rácsot, hogy „ne törjön meg az sp² rács”, azaz mindegyik szénatomnak továbbra is pontosan három szomszédja legyen? Igen, lehetséges, ehhez azonban feltétlenül szükséges, hogy a szemcsehatár mentén a rácsba ötszögeket és hétszögeket (sőt, esetleg négy-, nyolcszögeket!) építsünk be, hiszen ezáltal tud a grafénrács kristálytani iránya „elgörbülni”. A 4. ábrán látunk egy ilyen szemcsehatár-konstrukciót. Az ilyen grafén szemcsehatárokat, ahol megmarad az sp² rács, a továbbiakban „szabályos” szemcsehatárnak nevezzük.

Ha azonban mélyebben szeretnénk megérteni, mi történik, amikor két növekvő grafén szemcse összeér és a valósághoz közelebb álló szemcsehatár- szerkezeteket szeretnénk létrehozni, akkor számítógépes szimulációt kell végeznünk. Belga kollégáinkkal együttműködve írtunk erre a feladatra egy Monte-Carlo módszeren alapuló programot. A program működése az 5. ábrán látható.

3. ábra. Ez a számítógépes szimuláció a CVD grafén kristallitok növekedését mutatja. A szemcsék növekedése mindaddig tart, amíg összeérnek. A különböző szürkeárnyalatok a különböző kristálytani orientációknak felelnek meg. (Philippe Lambin (Namuri Egyetem, Belgium) szimulációja.)





4. ábra. Szabályos grafén szemcsehatár. A két, kizárólag hatszögekből álló grafén szemcsét egy 5-6-7 szögekből álló határvonal, a szemcsehatár köti össze úgy, hogy minden szénatom továbbra is három koordinációs marad. Szürke árnyalattal jelöltük a nemhatszöges gyűrűket. A nyilak a két grafén szemcsén a preferált terjedési irányokat mutatják (úgynevezett „cikcakk irányok”, lásd még a 6. ábrát is).

Azonban az így létrejött szimulált szemcsehatár-szerkezetekben általában megtörik az sp^2 rács, azaz a szemcsehatárban nem csak hármass, hanem kettes koordinációjú szénatomok is előfordulnak. Sőt, a két-dimenziós rácsban helyenként kis „folytonossági hiányok”, azaz vakanciák is keletkeznek, ráadásul nem csak 5-6-7, hanem 4-8 tagú széngyűrűk is előfordulnak. Az ilyen grafén szemcsehatárokat „szabálytalan” szemcsehatároknak hívjuk.

Napjainkban már ott tart a nanotudomány, hogy képesek vagyunk atomi felbontással vizsgálni az anyagok felületét. Ugyan ez csak bizonyos anyagokon és különleges körülmények között lehetséges, de mégis léteznek már atomi felbontású technikáink – például a pásztázó alagút-mikroszkópia (Scanning Tunneling Microscopy, STM) és a nagyfelbontású transzmissziós elektronmikroszkópia (High Resolution Transmission Electron Microscopy, HRTEM). A pásztázó alagútmikroszkóp elvi működése igen könnyen megérthető [5]: kell egy nagyon hegyes tű – ideális esetben csak egyetlen atom legyen a hegyén! – és egy olyan finom mozgó szerkezet, ami a tű hegyét nanométer alatti

pontossággal képes mozgatni a vizsgált minta felülete fölött. A tű és a minta közé feszültséget kapcsolunk (volt nagyságrendben) és olyan közel visszük a tűt a felülethez, hogy még éppen ne érjen hozzá. Ha már elég közel értek egymáshoz, akkor megindul közöttük a kvantummechanikai alagútáram. Ezután a tűvel végigpásztázzuk a minta felületét és egy számítógép képernyőjén kialakul a minta atomi felbontású képe. A valóságban ahhoz, hogy ez működjön, természetesen sok gyakorlati nehézséget le kell küzdeni, például nagyon fontos a rezgés csillapítás, a termikus drift kiküszöbölése, és így tovább.

Az STM és HRTEM mérések bebizonyították, hogy a HOPG grafit tépésével kapott grafénmintákban a szemcsehatárok többnyire „szabályos” szerkezetűek, de a CVD grafénmintákban legtöbbször „szabálytalanok”.

A CVD grafén polikristályos – leromló tulajdonságok!

Miért fontos, hogy milyen egy grafén szemcsehatár? Azért nagyon fontos, mert a szemcsehatárok lényegesen befolyásolják a grafén tulajdonságait – nemkülönben, mint a háromdimenziós kristályok esetén, ahol az anyag tulajdonságait szintén meghatározza a szemcsehatárok milyensége. A mérések szerint a CVD grafénben a töltéshordozók mozgékonyasága több nagyságrenddel rosszabb, mint az egykristályos grafénben és ez rossz hír a nanoelektronikai alkalmazások szempontjából.

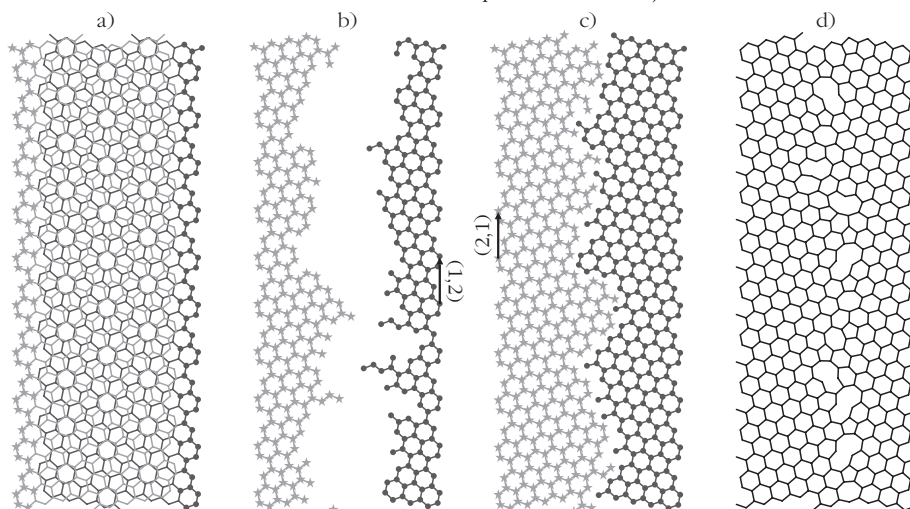
Ezért osztályunkon részletesen megvizsgáltuk, hogyan befolyásolja a szemcsehatárok atomi szerkezete azok elektronszerkezetét és transzporttulajdonságait. Megkerestük, hogy a szemcsehatár-szerkezet miféle tulajdonságai, jellemzői gyakorolnak hatást és pontosan milyen hatást a transzporttulajdonságokra.

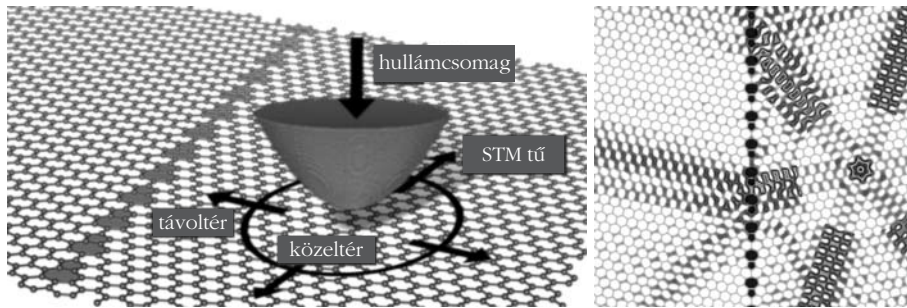
Legfontosabb kísérleti eszközünk az alagútmikroszkóp (STM), annak topográfiai és spektroszkópiai módjában. Anélkül, hogy a részletekbe mennénk, csak annyit fontos tudnunk, hogy az STM mind a minta felü-

tének geometriájáról, mind elektronszerkezetéről atomi (vagy még finomabb) skálán szolgált információkat. Ám a nanoskálájú mérések helyes értelmezéséhez elengedhetetlenül szükségünk van a számítógépes szimulációra, ugyanis a nanovilágról tudósító minden mérés közvetett mérés. A grafén szemcsehatárok elméleti vizsgálatában számos módszert használunk:

1. A szemcsehatárok geometriai szerkezetét (az atomok elhelyezkedését) és a szemcsenövekedés folyamatát molekuladinamikai és Monte-Carlo-programokkal modellezzük.

5. ábra. Szemcsehatár-képződés szimulációja.





6. ábra. Grafén szemcsehatáron keresztüli elektrontranszport hullámcsoveg-dinamikai szimulációja. A bal oldali ábra a rendszer geometriáját mutatja. A szimulált STM t' az egyik szemcse fölött áll. A hullámcsoveg fölülről (a t' tömbi anyagából) érkezik. A jobb oldali ábrán az elektron megtalálási valószínűségét mutatjuk be az $E_F - 2,4$ eV energián. Az STM t' körüli közeltérben eltérő szűrési skálát alkalmaztunk, mint a távoltérben. Figyeljük meg a szemcsehatáron az elektronhullám törését és visszaverődését, valamint a preferált terjedési irányok eltérést a két szemcsében!

2. A szemcsehatárok elektronszerkezetét kvantummechanikai első elveken alapuló DFT (sűrűségfüggvény) számításokkal térképezzük föl.

3. Az elektron szemcsehatáron való átjutását hullámcsoveg-dinamikai szimulációval [6] követjük nyomon.

Szög és szerkezet

Azt már régóta tudjuk (Wallace számolta ki 1947-ben²), hogy a grafénsíkban az elektronok mozgása irányfüggő (anizotróp). Az anizotropia annál kifejezettebb, minél inkább eltér az elektron energiája a Fermi-energiától.³ Ez azt jelenti, ha a grafén vezetőképességét úgy mérjük, hogy az egyik elektróda rögzített, a másik elektródával pedig egy körvonal mentén körbejárjuk azt, akkor a vezetőképesség szögfüggő. Az effektus gyakorlati kimutatásához alacsony hőmérsékleten és elég kicsi (mikronnyi méretű) mérőkör sugaron kell mérni. Mi történik, ha egy szemcsehatár két oldalára elektródákat helyezünk és mérjük a szemcsehatáron keresztüli vezetőképességet? A szemcsehatár mentén két, eltérő kristálytani orientációjú graféndarab találkozik. Az elektronok az egyik szemcséről a másikra akkor tudnak könnyen áthaladni, ha a preferált terjedési irányok a két szemcsében jó közelítéssel megegyeznek. Ha nem egyeznek meg a preferált terjedési irányok, akkor törési, visszaverődési jelenségek lépnek föl – ezek csökkentik az elektron átjutásának valószínűségét. Ilyen törést és

visszaverést mutatunk be a 6. ábrán, hullámcsoveg-dinamikai szimuláció [7] segítségével. Tehát megfogalmazhatjuk a felismerést: a grafén szemcsehatár vezetőképessége függ a két csatlakozó szemcse kristálytani orientációjának eltérési szögétől.

A szemcsehatárok elektronszerkezetének bemutatásához be kell vezetnünk az állapotsűrűség (Density of States, DOS) fogalmát. Ez a kondenzált anyagok fizikájában nagyon gyakran használt

függvény azt mondja meg, hogy adott E energia körüli kis ΔE energia-intervallumban hány energiaállapot helyezkedik el. A DOS függvény ismeretében az adott anyag számos tulajdonságát ki tudjuk számítani, „meg tudjuk jósolni”, például az elektromos és hővezetőképességét, optikai tulajdonságait stb. Egy adott anyag állapotsűrűsége két dologtól függ: az anyagot felépítő atomok fajtájától és elrendezésük mikéntjétől. (Szabályos kristályok esetén az atomi elrendezést kristályszerkezetnek hívjuk.) A DOS függvényt kvantummechanikai módszerekkel (például DFT technikával) ki lehet számítani és számos módon meg is lehet mérni (például az STM műszer segítségével úgy, hogy változtatjuk a t're adott feszültséget – ezt a technikát hívjuk alagút-spektroszkópiának).

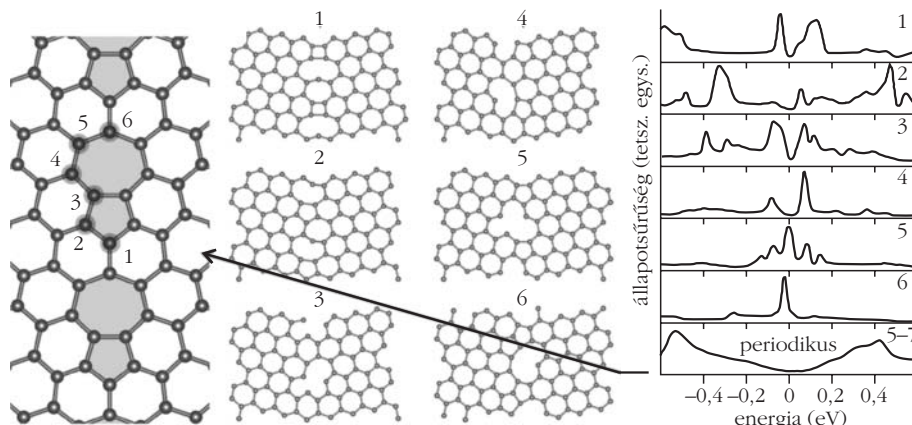
A 7. ábrán egy számítógépes kísérletet mutatunk be, amelynek segítségével megvizsgáltuk [8], hogyan függ a szemcsehatárok elektronszerkezete a geometriai szerkezetüktől. A kiinduló rendszer egy szabályos szemcsehatár, e szemcsehatár DOS függvényét láthatjuk a jobb alsó panelen. Ez egy „unalmas”, sima függvény és a Fermi-energián nem tartalmaz állapotokat. Ahogy fentebb írtuk, a CVD grafénben általában szabálytalan szemcsehatárok fordulnak elő – olyanok, ahol sérül az sp^2 rács, a szénatomok egy részének nincs három kötése, csak kettő. Ezt a helyzetet úgy modelleztük, hogy a szabályos szemcsehatárból kivettünk egy atomot, majd úgynevezett „geometriai relaxációt” végeztünk. A geometriai relaxáció azt jelenti, hogy az egyes atomokra ható erőket figyelembe véve hagyjuk az atomokat elmozdulni mindaddig, amíg az összes atom meg nem találja egyensúlyi helyzetét. Így voltaképpen a rendszer mechanikai energiáját minimalizáljuk,⁴ amire azért van szükség, mert egy atom mesterséges eltávolításával felborul az egyes atomokra ható erők egyensúlya, tehát meg kell keresnünk az új egyensúlyi konfigurációt. Erre a relaxált geometriára azután ismét kiszámoljuk az elektro-

² 1947-ben még nem létezett a „grafén” fogalom. Wallace a tömbi grafit elektronszerkezetét akarta kiszámolni, de ehhez első lépésként a grafit egyetlen szénsíkja (tehát voltaképpen a grafén) elektronszerkezetét számította ki. Akkor még senki sem gondolhatott arra, hogy néhány évtized múlva az egyetlen atomiréteg-vastagságú szénsíkot kísérletileg elő fogják állítani és elektronszerkezetét ki fogják mérni, igazolva Wallace eredményeit.

³ A kondenzált anyagokban az elektronok alulról fölfelé töltik be a rendelkezésre álló energiaszinteket. A Fermi-energia a legmagasabb betöltött szint energiája – az e fölötti állapotok üresek. (Ez a kijelentés szigorúan véve csak abszolút nulla hőmérsékleten igaz. Magasabb hőmérsékleten, a termikus gerjesztés miatt, a Fermi-energia alatt is vannak üres állapotok és fölötte is találhatóak betöltöttek.)

⁴ Ilyenkor általában nem keressük meg a globális minimumot (azaz azt az atomi konfigurációt, amely a lehető legkisebb energiát eredményezi), hanem csak a kiinduló konfigurációhoz legközelebbi lokális minimumot.

nok állapotsűrűségét. Egy egyszerű végtelen grafén-síkban az összes szénatom környezete pontosan azonos – egyforma az összes kötőszög (120 fok) és kötéstávolság (0,142 nm). Ám egy szemcsehatárban több, különböző helyzetű atom található, amelyeknek „szomszédság szerkezete” (kötéseik száma, szöge és távolsága) eltér egymástól. Azért, hogy teljes képet kapjunk a rendszer viselkedéséről, az összes lehetséges módon eltávolítottunk egy-egy szénatomot, mindegyik esetre elvégeztük a geometriai relaxációt és az állapot-



7. ábra. Ebben a számítógépes kísérletben a bal oldalt bemutatott szabályos szemcsehatárból az összes lehetséges módon eltávolítottunk egy-egy atomot, majd relaxáljuk a geometriákat – lásd a középső panelt. A jobb oldali panelek összehasonlítjuk az eredeti (szabályos, periodikus) szemcsehatár-állapotsűrűségét a szabálytalan szemcsehatárok állapotosságával. Az energiaskála nullapontját a Fermi-energiához igazítottuk.

rűség-számítást. Az így kapott szemcsehatár-geometriákat és DOS függvényeket mutatja be a 7. ábra.

A szabálytalan szemcsehatárookra kapott DOS függvények bonyolult szerkezetűek és jócskán különböznek egymástól. Mégis, mi bennük a közös? Egyrészt mindegyik szabálytalan szemcsehatárra számolt DOS függvény sok csúcsot tartalmaz, szemben a szabályos szemcsehatárra kapott sima függvénnyel. Másrészt megfigyelhetjük, hogy a szabálytalan szemcsehatárok jelentős értékű állapotosságúval rendelkeznek a Fermi-energia körüli energiatartományban, holott a szabályos szemcsehatár állapotosságúja itt igen kicsi. Vannak olyan atomi elrendezések is, ahol magán a Fermi-energián is csúcsot látunk!

Amikor az elektron áthalad egy szabálytalan grafén szemcsehatáron, ezekkel a nagy állapotosságú, a Fermi-energiához közeli elektronállapotokkal találja magát szembe, ezeken kell „átküzdenie magát”, ami ritkán sikerül neki. Tehát kicsi az átmeneti, viszont nagy a visszaverődési valószínűség, ezért mondjuk, hogy ezek a szemcsehatárok lokalizált állapotok úgynevezett szórócentrumok. Végeredményben drasztikusan lecsökken a szemcsehatár vezetőképessége. Ezáltal sikerült megértenünk azt a kísérleti tapasztalatot, hogy a CVD grafén vezetőképessége messze elmarad a „tépett” grafén vezetőképességétől.

Lehet-e tökéletes nanoelektronikai eszközöket készíteni tökéletlen grafénből?

A címben feltett kérdésre „feltételes igennel” tudunk válaszolni. Megmutattuk, hogy a grafén szemcsehatárok elektromos tulajdonságai erősen függenek a szer-

kezetüktől. Azok a szemcsehatárok, ahol megmarad a szénatomok hármaskötésű hálózata (sp^2 rács), sokkal kisebb akadályt jelentenek az elektronok számára, mint azok a szemcsehatárok, ahol sérül a hármaskötésű hálózat, azaz kettős koordinációjú szénatomok és vakanciák jelennek meg – ugyanis ezek erős szórócentrumot képeznek az elektronok terjedése számára. Ahhoz, hogy a kémiai gőzfázisú leválasztással (CVD módszer) előállított grafénben óhatatlanul létrejövő szemcsehatárok ne rontsák le drasztikus módon a grafén elektromos tulajdonságait, szükséges volna a CVD technológia paramétereinek jobb kézben tartása, finomhangolása („szemcsehatár mérnökség”), ami által olyan szemcsehatárokat lehetne létrehozni, amelyek „barátságosabban” viselkednek az elektromos transzport szempontjából, azaz kevesebb szórócentrumot tartalmaznak.

Irodalom

1. Tapasztó Levente: Fizikai Nobel-díj 2010. *Fizikai Szemle* 60/11 (2010) 396.
2. G. E. Moore: Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics* 38/8 (1965) April.
3. <http://www.itrs.net>
4. L. P. Biró: Graphene – the route from touch screens to digital nanoelectronics. *EuroNanoForum 2011*, Budapest, http://www.nanotechnology.hu/magyarul/2011/2011_05_euronanoforum/blp_euronanoforum_2011.pdf
5. Balázs Erzsébet: A pásztázó alagútmikroszkóp és társai. *Természet Világa* 1993/1.
6. Márk Géza István: Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban. *Fizikai Szemle* 56/6 (2006) 190.
7. P. Vancsó, et al.: Electronic transport through ordered and disordered graphene grain boundaries. *Carbon* 64 (2013) 101.
8. P. Nemes-Incze, et al.: Electronic states of disordered grain boundaries in graphene prepared by chemical vapor deposition. *Carbon* 64 (2013) 178.

Szerkesztőség: 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29–33., 31. épület, II.emelet, 315. szoba, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: mail.elft@gmail.com

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szatmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszté az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyezményen.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és HU ISSN 1588–0540 (online)