

Cikcakk és karosszék

Tapasztó Levente fizikus



Tapasztó Levente az MTA Természettudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében (TTK MFA) dolgozik, a 2D Nanoelektronika „Lendület” kutatócsoport vezetője. Olyan speciális szerkezetű, mindössze egy atom vastagságú anyagokat tanulmányoz, amelyeknek nincs térfogatuk, csak felületük, ezért számos új jelenség figyelhető meg bennük. Posztdoktori OTKA-projektjének tavalyi lejártakor azonnal újabb támogatást nyert el az OTKA-tól. Junior Prima-díjas, a Lendület-program egyik idei nyertese. Október végén

a nagy tekintélyű Nature-ben jelent meg munkatársaival közösen írt [cikke](#).

Gratulálok a Nature-cikkhez! Ez önmagában is nagy szó, de Magyarországról különösen nehéz publikálni ebben a lapban.

Valóban nehéz pályán focizunk, mert a nanotechnológia rettenetesen műszerigényes, és mi nem tudjuk bármikor megvenni a legjobb, legkorszerűbb eszközöket. Azt a stratégiát semmiképpen sem követhetjük, hogy kitalálunk egy mérést, összeállítjuk hozzá a legjobb berendezést – ami, mondjuk, a legalacsonyabb hőmérsékleten, a legnagyobb mágneses térben mér –, és keresünk valami újdonságot. Ebből a szempontból komoly handicappal indulunk – elsősorban az ötletekeinkre számíthatunk, és „réseket” próbálunk megtalálni: ezek olyan fontos kérdéseket feszegetnek, amelyekre más még nem gondolt, és a mi infrastruktúránkkal is megvalósítható.

Sikerült...

Most igen.

Miért „csodaanyag” a grafén?

A grafén egy olyan anyagcsalád első tagja, amelyet „kétdimenziós kristályok”-nak nevezünk. Ezeknek a vastagsága egyetlen, esetleg néhány (három-öt) atom. A grafén felfedezése előtt, tíz évvel ezelőtt, nem gondoltuk, hogy ilyen anyagok önállóan is létezhetnek. Azt tudtuk, hogy vannak réteges szerkezetű tömbi anyagok: ezek kristályában nagyon erősek a kötések az atomok között a rétegekben, a síkokon belül – a síkok között viszont jóval gyengébbek. Emiatt a síkok könnyen elcsúszhatnak egymáson. Így írunk a ceruzával a papírra: a rétegek leválnak egymásról, majd a papírlapra tapadnak. Termodinamikai megfontolások alapján azonban azt gondoltuk, hogy egyetlen réteg önmagában nem lenne stabil, mert szétesik a termikus

fluktuációk miatt. Andre Geimnek és Konstantin Novoselovnak tíz évvel ezelőtt sikerült ilyen elemi rétegeire „szétszednie” a grafitot. Megmutatták, hogy egyetlen rétege, a grafén nemcsak létezik, hanem nagyon is stabil, és hihetetlenül érdekes fizikai tulajdonságai vannak: a viselkedése drasztikusan eltér a tömbi anyagétól. Ez az igazán izgalmas a kétdimenziós anyagsaládban! Tehát a grafiton kívül más kétdimenziós anyagok is léteznek, a legismertebb talán a molibdén-diszulfid. Ennek tömbi formáját régóta használják száraz kenőanyagként, a grafithoz hasonlóan, mert a rétegeik könnyen csúszkálnak egymáson.

De miért „csodaanyag” a grafén? A grafitban és minden ismert fémcs vagy félvezető anyagban a töltéshordozók, az elektronok effektív tömege lehet kicsi vagy nagy, de mindenképpen véges, míg a grafén esetében a töltéshordozók úgy viselkednek, mintha nulla lenne az effektív tömegük – a fényhez hasonlóan: nem függ az energiájuk a sebességüktől. Emiatt új „fizika”, új egyenletek érvényesek rá. A grafén olyan jelenségeket mutat, amilyenekkel szilárd testekben még nem találkoztunk. Ezért érdekes a grafén a fizikusok számára. Szélesebb közönség számára pedig azért, mert az anyagi tulajdonságai is lenyűgözőek. Szobahőmérsékleten semmi sem vezet olyan jól az elektromos áramot, mint a grafén. A szilícium például nagyságrendekkel rosszabb vezető. Ha a szilíciumot lecserélnénk grafénra, sokkal gyorsabb és sokkal kisebb fogyasztású elektronikai eszközöket készíthetnénk, mert a töltéshordozók gyorsan átérnek az eszközön, és mivel kevesebbet ütköznek (szóródnak), kevesebb hő keletkezik. A grafén nagyon jól vezeti a hőt is, a fémeknél is jobban. Mechanikai tulajdonságai szintén meglepőek. Amellett, hogy ez az egyetlen réteg stabil, és nem hullik szét atomjaira, rendkívül rugalmas. De óvatosan kell fogalmaznunk. Nagyon könnyű azt mondani, hogy sohasem láttunk még olyan erős anyagot, mint a grafén – amit úgy kell érteni, hogy ez az egyetlen atomréteg makroszkopikus tárgyakat is képes megtartani. Tehát nem igaz, hogy egy grafénhálót semmivel sem lehet átszakítani, de a vastagságához mérve páratlanul erős. A grafit szén-szén kötése, kicsit pongyolán fogalmazva, erősebbek a gyémánt szén-szén kötéseinél. Ez ad a grafénnek komoly mechanikai stabilitást, és emiatt viselkedik nagyon rugalmasan. A kristályos anyagokat általában néhány százaléknnyira tudjuk rugalmasan deformálni. A grafén olyan kristályos membrán, amelyet eredeti méterének akár a húsz százalékaival is megnyújthatunk, majd tökéletesen rugalmasan visszaáll az eredeti méretére.

A grafén tehát jól vezeti az elektromos áramot; átlátszó, hiszen egyetlen atomréteg vastag és hajlítható is. Az átlátszó, hajlítható elektronikai eszközök előállításáért nagy verseny folyik. A grafén tulajdonságai miatt esélyes anyagjelölt, az más kérdés, hogy piaci megfontolásokból mikor kerülnek gyártásba és forgalomba ilyen készülékek.

Hogyan bánnak az atomi rétegű anyagokkal a valós életben?

Ahhoz, hogy „kezelni” tudjuk őket, általában felvisszük egy vékony polimer film hordozóra.

A klasszikus mechanika szerint minél vékonyabb egy anyag, annál könnyebben hajlítható. Így is van, de a grafén még a klasszikus membránoknál is jobban hajlítható: szinte semmiféle ellenállást nem mutat a hajlítással szemben. Ennek köszönhető, hogy nagyon kis hullámhosszú szuperrácsot készíthetünk belőle. Ilyenkor a grafén atomi szerkezetét moduláljuk. Tudjuk, hogy ha kétoldalt meghúzzunk például egy vékony, rugalmas műanyag fóliát, meghullámosodik. A hullámhossz attól is függ, hogy mennyire könnyen hajlítható a fólia. A grafén annyira könnyen hajlítható, hogy ez a hullámhossz néhány atomnyi. Ez azt jelenti, hogy a grafén csak atomi skálán mutat némi ellenállást a hajlítással szemben, egyébként nulla ellenállással hajlítható. Ez azért különösen érdekes, mert ahogy mondtam, a szén-szén kötések a gyémánt kötéseihez hasonlóan erősek. A klasszikus fizika, a klasszikus membránmechanika egyenleteivel nem is

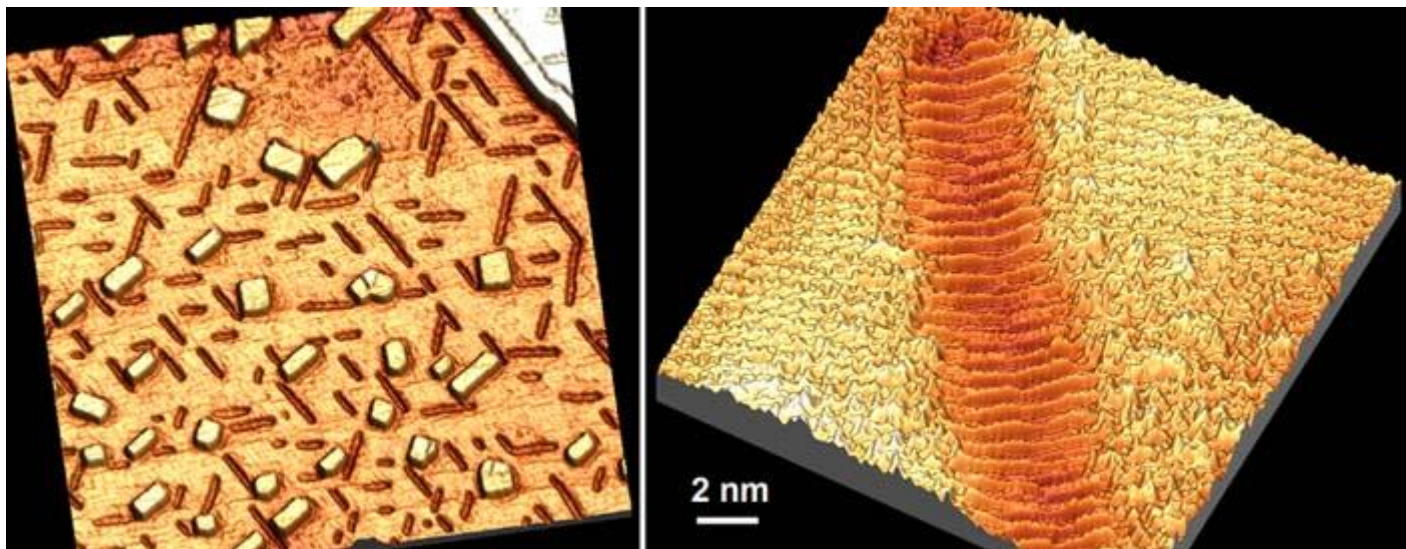
magyarázhatók a kísérleti eredmények. Kvantummechanikailag, az atomok szintjén kellett kezelnünk a jelenséget, hogy megértsük és értelmezni tudjuk. Az erről írt cikkünk a Nature Physics folyóiratban jelent meg két évvel ezelőtt.

Miért hívják szuperrácsnak ezt a képződményt?

A „szuper” itt csak azt jelenti, hogy valaminél nagyobb. A grafénnek hatszöges atomi rácsa van, amelynek 0,25 nanométer (nm, 10^{-9} méter) a rácsállandója. Erre tevődik rá a nagyjából 0,7 nm-es másik rács: ez a szuperrács, az atomi ráccsal összemérhető, de nagyobb periódusú hullámzás.

Hogyan húzták meg a grafénlapot?

Ahhoz, hogy mechanikai feszültséget keltsünk a grafénban, először nanométerű árkok fölött feszítettük ki. Ilyenek kialakulnak például a rézkristály felületének egyik kristálysíkján magas hőmérséklet hatására. A rézhordozóra növesztett grafénrétegben pedig úgy keltettünk mechanikai feszültséget, hogy kihasználtuk a grafén anomális hőkiterjedését: azt, hogy melegítésre összehúzódik, hűtésre pedig kitágul. A grafént 1000 Celsius-fokon növesztettük a rézre. Amikor erről a hőmérsékletről szobahőmérsékletre hűtjük a mintát, a réz összehúzódik, a grafén pedig kiterjedne, ha nem „tapadna” a rézhez. De a tapadás miatt a grafénban összenyomó (kompresszív) feszültség ébred. A nanométerű árkok felett, ahol a grafén nem kötődik a rézhez, nanométeres periódusú szerkezeti hullámok keletkeznek.



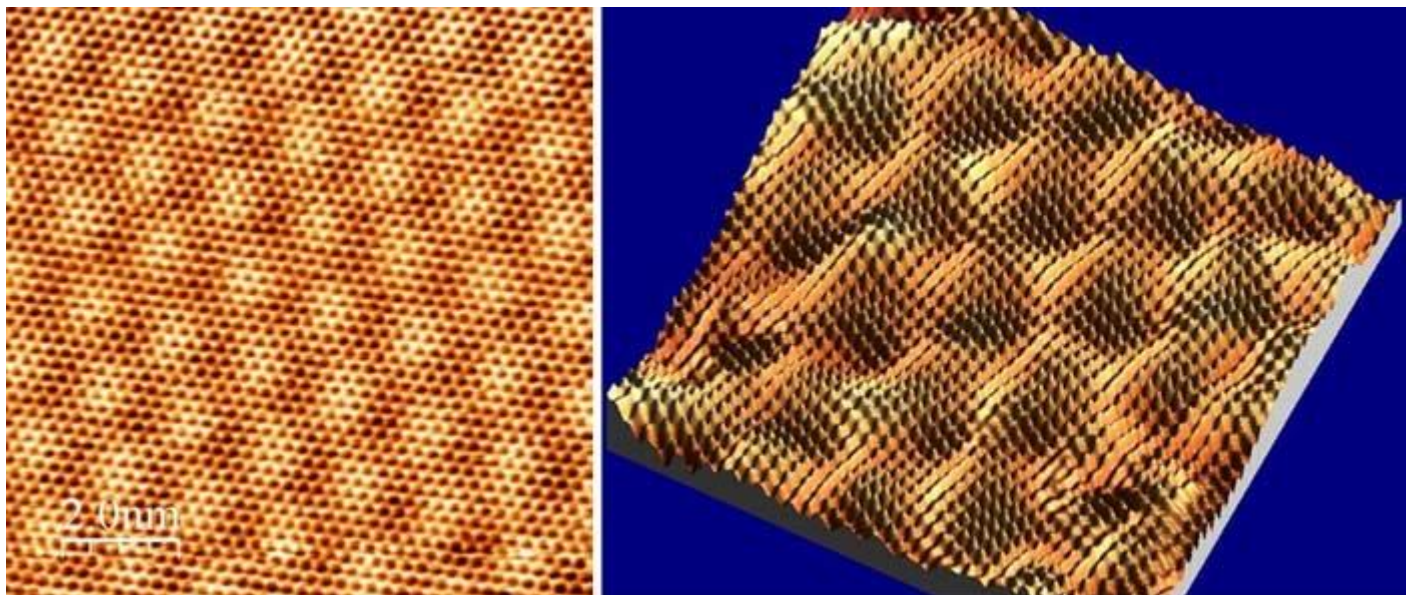
A réz felülete, az öt nanométer széles árkokkal (balra) és az árkok felett kialakuló grafén szuperrács. Pásztázó alagútmikroszkópos felvételek

Most már kétdimenziós szuperrácsot is létre tudunk hozni.

Négyzetes nyíláson feszítik ki a grafént?

Ehhez nem is kellett felfüggeszteni a grafént. Egyszerűen csak kihasználtuk a réz felületén a kristályrácsok illeszkedését. A grafénnek hatszöges a kristályrácsa, a réz felületének egyik kristálysíkja szintén hatszöges szimmetriájú, de kicsit különbözik a rácsállandó, az atomok

távolsága. Ha egymásra helyezzük a két kristályt, szeretnének egymáshoz illeszkedni, de ezt nem tehetik meg hosszú távon. Ehelyett periodikusan alakul ki jó illeszkedés: az egyik helyen odatapad a rézhez a grafén, a kevésbé jól illeszkedő részen pedig eltávolodik, „felpúposodik” kicsit, aztán megint jó az illeszkedés és így tovább. A nem illeszkedő helyeken „domborzat” jön létre. Az egydimenziós esetben az árok fölött alakult ki a hullám, itt pedig az egész felületen: a nanométeres hullámokat akár makroszkopikus felületen is létre tudjuk hozni.



Kétdimenziós grafénhullámok

Ennek fényében felmerült, hogy lehet-e egyáltalán tökéletesen sima a grafén egy hordozó felületén. Igen, lehet. Ha a hordozó és a grafén kristályrácsa között viszonylag nagy az elforgatás szöge. Sőt, az elforgatás szögével hangolni is tudjuk a kétdimenziós szuperrács-hullámhosszt. Kiderült, hogy ha nagyjából 10 fok fölötti az elforgatás, akkor a grafén már nem igazodik a rézhordozó kristályrácsához, hanem inkább elemelkedik tőle kicsit és teljesen kisimul.

Ez a kísérlet fontos lehet a gyakorlat szempontjából?

A hullámok az egy- és kétdimenziós formájukban is modulálják az elektromos vezetést. A kétdimenziós esetben ezt nemcsak a mechanikai feszültséggel lehet „hangolni” (ami azért nem egyszerű), hanem a relatív elforgatással is. Egy dimenzióban csak egy hullámhosszt tudtunk demonstrálni, két dimenzióban már öt különböző hullámhosszú rácsot is létre tudtunk hozni, 1,5 és 6 nm periodicitás között. Így ki lehet alakítani hangolható tiltott sávot – amitől az anyag félvezetővé válik –, de a tiltott sáv előállításának nem ez a legpraktikusabb módja. A szuperrács tudományos szempontból érdekes.

Hogyan készül a grafén?

Újabban rendszerint kémiai gőzfázisú leválasztással (chemical vapour deposition, CVD); ez az egyik legígéretesebb és ma már a legelterjedtebb módszer. Általában egy fém felületére növesztik a grafént, többnyire rézre, de választhatnak nikkelt vagy platinát is. Egy kemencében magas (1000 Celsius-fokos) hőmérsékletre melegítik a fémeket, majd beeresztenek egy szénhidrogént, például metánt. A metán a magas hőmérsékleten elbomlik szénre és hidrogénre,

és a szén „kicsapódik” a fémhordozóra. A fémhordozó katalizálja a metán elbomlását, a szén pedig „önszerveződő módon” kirakódik a felületre grafén formájában. Azért a réz terjedt el a leginkább, mert a réz nem old be magába szenet. Nikkel felületén például szintén létrejön a grafén, de valamennyi szén be is oldódik. Amikor lehül a hordozó, a beoldott szén kicsapódik, megint csak grafén keletkezik, de a kicsapódás egyenetlen, ezért hol egy, hol több réteg grafén képződik. Viszont amíg a rézfelület szabad és katalizálja a metán bontását, a szén grafénné áll össze, és amikor a grafén teljesen betéríti a rézfelületet, a grafénképződés leáll, legalábbis nagyon-nagyon lelassul. Ezért különösebb kontroll nélkül is mindig egy réteg szén nő a rézre. Azért terjedt el ez a módszer nagyon gyorsan, mert mindenkinek sikerült vele egyetlen folytonos réteget készíteni. Most már makroszkopikus, akár négyzetméteres grafént is növesztenek. A grafén alól aztán kioldják a rézhordozót, és a grafént egy hordozófilmre, általában polimerre viszik át.

A CVD-módszernek az a hátulütője, hogy a grafénréteg nem egykristályos: a grafénrács nem egy irányba mutat a teljes mintában, hanem grafén szemcsék alakulnak ki, amelyek egymáshoz képest el vannak fordulva. A szemcsék határai lerontják az elektromos tulajdonságokat. Sokan törekednek az egykristályok előállítására: a milliméter és a centiméter közötti tartományig jutottak el.

A CVD-módszernek viszont óriási előnye, hogy – amint említettem – nagy felületen lehet egyetlen atomi réteget növesztetni, és ha rezet használunk hordozóként, nagyon egyszerűen szabályozható a folyamat. Most már a TTK MFA-ban is üzemel egy CVD-berendezés grafén növesztésére, de a Lendület-kutatócsoportban nem elsősorban a grafén előállításával, hanem a jellemzésével és a megmunkálásával foglalkozunk.

Hogyan munkálják meg a grafént?

A grafén nagyon jól vezeti az áramot, de nem félvezető. Márpedig a mai digitális elektronika félvezető eszközökön alapszik. A grafént félvezetővé kell tenni. Méghozzá úgy, hogy közben ne rontsuk le nagyon az elektromos tulajdonságait. Ennek a legcélravezetőbb módja az, hogy a kétdimenziós grafénből grafén nanoszerkezeteket – nanométeres grafén szerkezeteket – hozunk létre: a kétdimenziós grafénből például keskeny csíkokat vágunk ki. Ezeket grafén-nanoszalagoknak nevezzük. Tulajdonságaikat kvantummechanikai módszerekkel írhatjuk le, hiszen a szalag szélessége néhány nanométer, tehát néhányszor tíz atom. Minél keskenyebb a szalag, elvileg annál szélesebb a tiltott sávja. Nekünk viszonylag széles tiltott sáv kell, a szilíciuméval összemérhető. A szilícium tiltott sávja 1 eV, a grafénnek, kétdimenziós esetben, nulla. Minél közelebb szeretnénk kerülni a szilíciumhoz: egy keskeny, 2 nm-es grafén szalag tiltott sávja már nagyjából 0,5 eV. Tehát ha 10 nm alá tudunk menni a szalagszélességgel, megfelelően nagy lesz a tiltott sáv szélessége ahhoz, hogy a szalagból szobahőmérsékleten is működő elektronikus eszközök készüljenek.

Ez az egyik kihívás: nagyon keskeny szalagokat kell létrehozni, ami olyan megmunkálási pontosságot kíván meg, amelyre a jelenleg elterjedt legprecízebb megmunkálási módszerek sem képesek. A grafén esetében azonban nemcsak a szalag szélessége számít, hanem az is, hogy a szalag élei a hatszöges grafénrács milyen irányba mentén futnak. Tehát ahhoz, hogy olyan grafén nanoszerkezeteket hozzunk létre, amelyeknek megfelelő tiltott sávja van, a nanométeres tartományban kell nagyon pontosan kontrolálnunk a szalag szélességét és éleinek a kristálytani irányát. Ez már tényleg azt jelenti, hogy atomi skálán kell „szabni-varrni” az anyagot. A szilícium esetében erre eddig nem volt igény – nem is volt módszer ilyen pontosságú megmunkálásra. Sokan próbálkoztak vele, ezért büszkék vagyunk rá, hogy az általunk

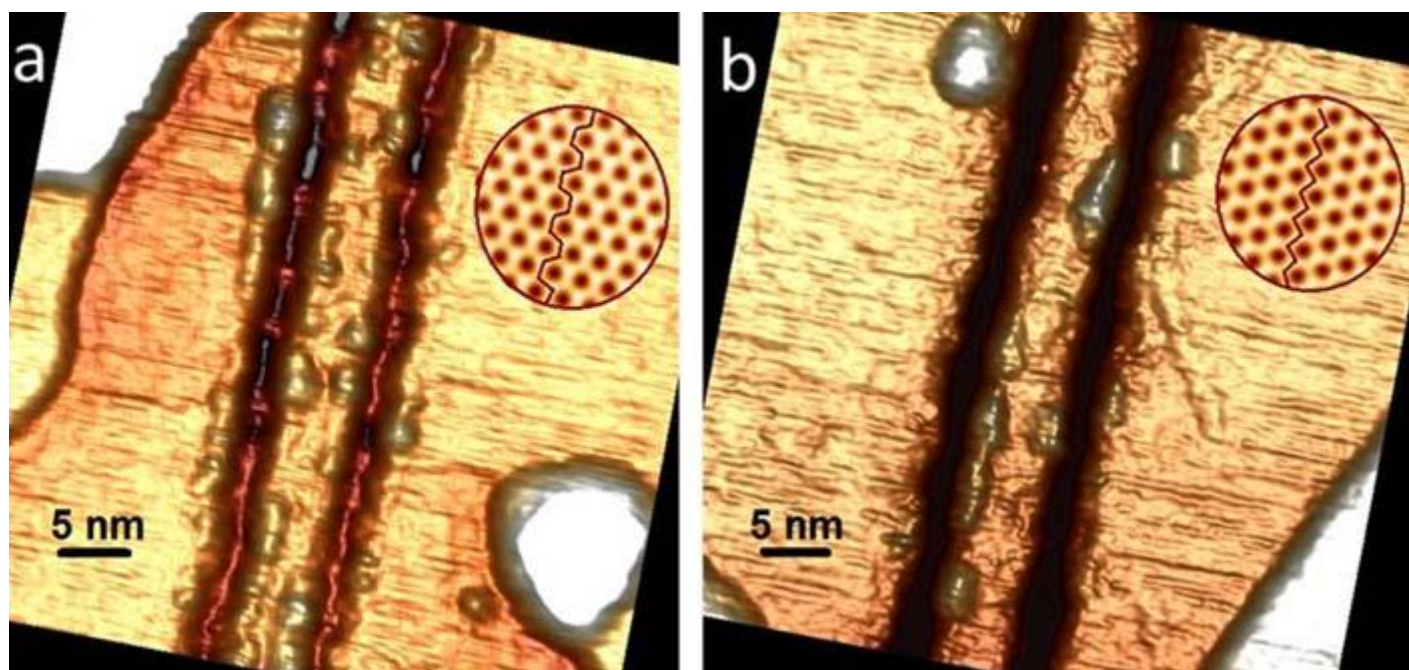
kidolgozott nanotechnológiai eljárás a jelenleg létező legpontosabb. Ez az eljárás a pásztázó alagútmikroszkópos litográfiára (STM-litográfiára) épül. Jó néhány éve kezdtük el a fejlesztését, és 2008-ban a Nature Nanotechnologyban írtuk le először. Még a címlapra is felkerültünk, és azóta már több mint ötszázan hivatkoztak a cikkre. De most jutottunk el odáig, hogy az így létrehozott grafén-nanoszerkezeteknek szisztematikusan megvizsgáljuk a tulajdonságait. Az októberi Nature-cikkünk ennek az eredménye.

Az elmélet azt jósolta, hogy a nanoszalagok tulajdonságai erősen függnék az élek kristálytani irányától, de ezt kísérletileg eddig nem sikerült igazolni, mert nem tudtunk olyan nanoszalagokat előállítani, amelyek jól orientált élekkel rendelkeznek.

Hogyan vágják ki a szalagokat?

A pásztázó alagútmikroszkópban van egy atomi hegyes tű, esetünkben egy platinatű, és ezt nanométernél is közelebb hozzuk a felülethez, de nem érintjük hozzá. Nagyon kicsi feszültség hatására a tű és a minta között mégis folyik áram. A klasszikus fizika „szabályai szerint” nem folyhatna itt áram, mert a két vezető nem érintkezik, a feszültség pedig nem éri el az átütési feszültséget. Ez kvantummechanikai alagutazási áram – még nanoampernél is gyengébb, de mérhető. Ezzel az árammal az alagútmikroszkóp letapogatja a minta felületét.

Az alagutazó elektronokat azonban nemcsak a minta felületének letapogatására használhatjuk, hanem a módosítására is – akár a szén-szén kötések elvágására. Ilyenkor, leegyszerűsítve, a tű és a minta közé jóval nagyobb feszültséget kapcsolunk, mint amikor leképezzük a mintát. A valóságban bonyolult fizikai, kémiai folyamatok játszódnak le: a feszültség elbontja a felületen megtapadt vizet, amely a levegőből származik, és az oxigéngyök megtámadja a szenet a tű hegye alatt. A folyamatot úgy kell optimalizálni, hogy a vágás pontossága néhány atomnyi, tehát nanométer alatti legyen. Ez nem könnyű, erre jelenleg csak mi vagyunk képesek.



STM-litográfiával létrehozott karosszék- és cikkcakk-élű grafén-nanoszalagok. Pásztázó alagútmikroszkópos felvételek

Két magas szimmetriájú élekkel rendelkező szalagtípus létezik; ezekre különböző viselkedést jósoltak. Az egyik a karosszék-, a másik a cikcakk-élű szalag. A karosszék-élű szalag esetében azt találtuk, amit az elméletek jeleztek: a szalag félvezető, és a tiltott sáv nagysága valóban fordítottan arányos a szalag szélességével: minél keskenyebb a szalag, annál nagyobb a tiltott sáv.

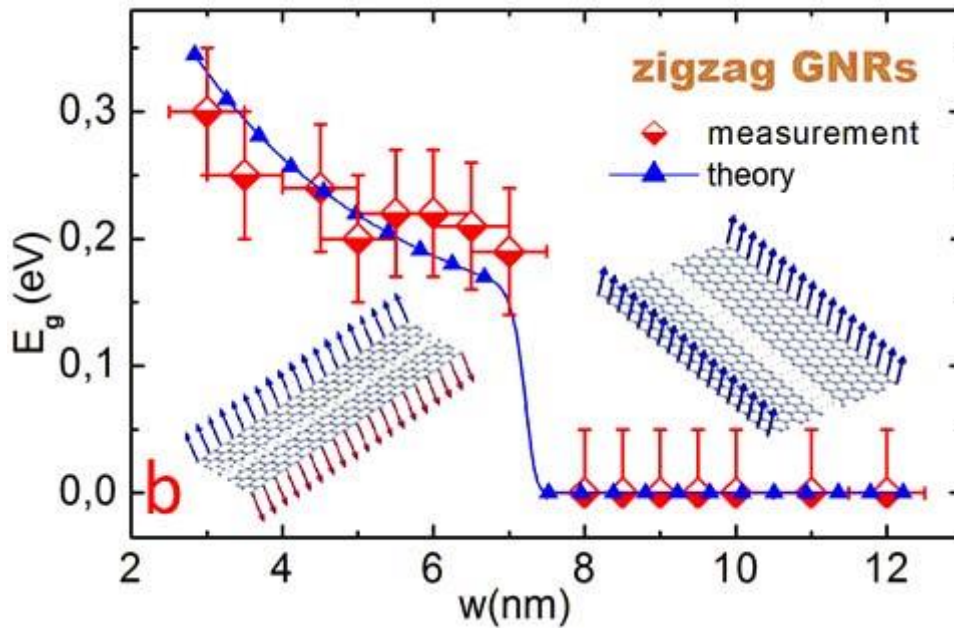
A Nature-beli megjelenést a cikcakk-élű szalagok tulajdonságainak feltárásával érdemeltük ki. A legegyszerűbb elmélet szerint ezek a szalagok mindig fémesek, a szélességüktől függetlenül. Azt találtuk azonban, hogy a keskeny (7 nm-nél keskenyebb) cikcakk-szalagok félvezetők, míg a szélesebbek fémesek.

Először is meglepő, hogy nem minden cikcakk-szalag fémese. Ezt még valamennyire értelmezni lehet, mert az elméletek megmutatták, hogy figyelembe véve az elektron-elektron kölcsönhatást a cikcakk élű szalagok félvezetők lehetnek. A félvezető-fémese átmenetet azonban nem lehetett értelmezni a korábbi elméletek alapján: nekünk kellett új elméletet kidolgoznunk. Summa summarum, a kísérleti eredmények arra mutattak rá nagyon meglepő módon, hogy a cikcakk-élű grafén-nanoszalagok élén mágneses rend alakul ki.

Ez azért nagyon furcsa, mert a szén nem mágneses anyag. A mágnességhez két dolog kell: az atomoknak legyen mágneses momentumuk és a mágneses momentumok rendeződjenek, mutassanak egy irányba. A szénatomnak nincs mágneses momentuma. De ha egy szénatomot eltávolítunk a kristályrácsból, a visszamaradó lyuk már rendelkezhet mágneses momentummal. A lyukakat, vakanciákat létre lehet hozni grafénban: ha például besugározzuk a grafént ionokkal, ezek szénatomokat ütnek ki, és létrejönnek a vakanciák, amelyek mágnesesek. Megvannak tehát a kis elemi mágnesek: nem a szénatomokon, hanem a szénatomok hiányán, a rács lyukaiban.

Hogyan „keletkeznek” a mágnesek?

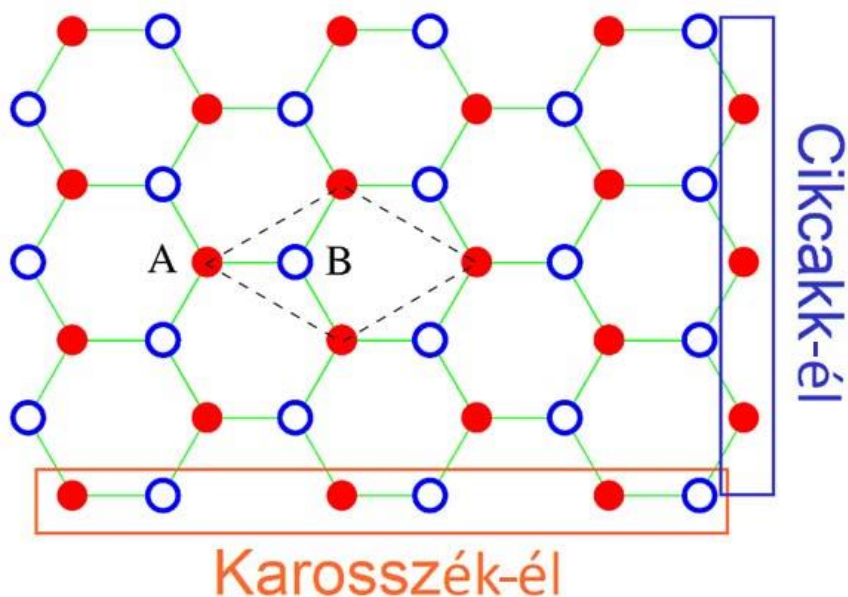
Attól, hogy a lyukban nincs szénatom, elektronok még tartózkodnak ott, és az elektronok spinjéből adódik a mágnesség, mégpedig a párosítatlan spinből. A szénatomban lévő elektronok spinjei „kioltják egymást”, a szénatom-hiányon azonban létrejöhet párosítatlan spin. Ha véletlenszerűen hozzuk létre a lyukakat a rácsban, kialakulnak a kis elemi mágnesek, viszont összevissza mutatnak. Nincs elég erős csatolás közöttük ahhoz, hogy beálljanak egy irányba, és az anyag nem lesz mágneses. A cikcakk-szalagokat úgy képzelhetjük el, mintha ezeket a hiányokat felfűznénk egy gyöngysorra. Ekkor tulajdonképpen kapunk egy élet. És ha két ilyen élet hozunk létre, kapunk egy szalagot. Az élen elhelyezkedő szénatomoknak lehet eredő mágneses momentuma, és ezek egymás mellett helyezkednek el, nagyon közel egymáshoz: felerősödik közöttük a csatolás, így a mágneses momentumok a szalag mindkét éle mentén beállnak egy irányba. A keskeny szalagokban a szalag egyik és másik élén ez az irány ellentétes egymással, a szélesebb szalagoknál a két irány azonos. Az első antiferromágneses, a másodikat ferromágneses csatolásnak nevezik. A mérésekben észlelt félvezető-fém átmenet a szalagok szélességének függvényében pontosan ennek az antiferro-ferromágneses kapcsolásnak a lenyomata.



Cikcakk-szalagok élein kialakuló mágneses rend. Az élek közötti mágneses csatolás antiferromágnesesről ferromágnesesre vált a szalag szélességének függvényében

Miért nincs kapcsolat a karosszék-szalagban?

A grafén méhsejt-rácsának elemi cellájában (amelynek ismétlésével az egész rács felépíthető) két szénatom van. A következő ábra „piros és a kék atomjai” alkotják a két alrácst. A hibának akkor lehet mágneses momentuma, ha a kék és piros atomok egyensúlyát lokálisan megbontjuk. Ha egyetlen hibát hozok létre, az szükségképpen ilyen, mert vagy kék atomot távolítok el, vagy pirosat. Ha egy pirosat és egy kéket is eltüntetek, nem alakul ki mágneses momentum. Nézzük meg, mi történik az élek mentén! A karosszék-élen azonos számban találhatók kék és piros szénatomok, vagyis az egyensúly nem bomlik meg, így mágneses nyomaték és rend sem alakulhat ki. Ezzel szemben a cikcakk-él szélein mindig ugyanabba az alrácshoz tartozó szénatomok találhatók. Lokálisan felbomlik az egyensúly és a cikcakk-él mentén megjelenik a mágneses rend.



Grafén-modell: minden rombusz alakú elemi cellában (szaggatott vonal) két szénatom van (az A és B-vel jelölt körök két alrácst reprezentálnak). A karosszék-élen a két alrácsból azonos számú atom található, míg a cikcakk-él kizárólag az egyik alrác szénatomjait tartalmazza

Már annak is komoly elvi jelentősége van, hogy bebizonyítottuk: egy nem mágneses anyag atomi pontosságú megmunkálással mágnesessé tehető. Ami ennél is meglepőbb: ez a mágneses állapot szobahőmérsékleten is stabil. Ehhez „mindössze” atomi precizitással kialakított élek kellenek. Ilyeneket jelenleg csak mi tudunk „kiszabni” a pásztázó alagútmikroszkópon alapuló módszerünkkel.

Ez az új eredmény is inkább eleméleti szempontból érdekes?

Nemcsak új ismeretekre tettünk szert, hanem az így kialakított szerkezetek alkalmasak lehetnek olyan elektromechanikai eszközök előállítására, amelyekben az elektronok spinjét manipuláljuk és ebben kódoljuk az információt. Ez a feladat nagyon nehéz, de az eredményeink reményt keltőek: akár szobahőmérsékleten működő eszközök is készülhetnek a jövőben.

Silberer Vera