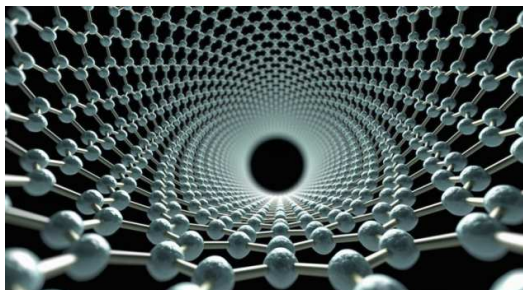


MAJZIK ZSOLT 2017.05.08.

Molekuláris elektronika atomi léptékkel

Hogyan forradalmasítja a számítástechnikát a nanotechnológia? Majzik Zsolt kutató (IBM Research-Zürich) írása. Vigyázat, mély víz! Ha elakadt, kattintson a linkekre magyarázatért.

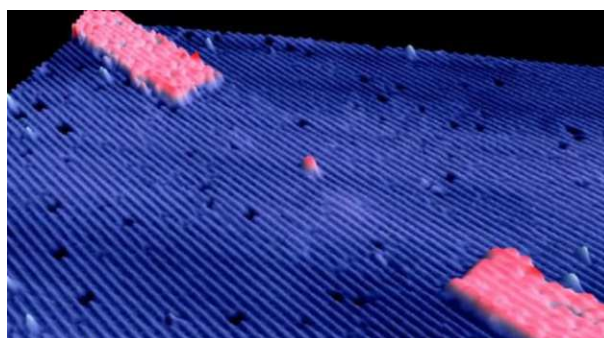


Több mint kilencven éve szabadalmaztatta Julius Edgar Lilienfeld azt az ötletét, amely a tranzisztorok működési elvét fedte le – az elképzelés tényleges megvalósításig azonban 20 évet kellett várni.

1947-től a félvezetőkre épülő új technológiák lépésenként vették át az évszázad első felét meghatározó elektroncsövek helyét az elektronikai iparban és a modern számítástechnikában. Az 50-es évek high-tech készülékei, például a rádiók, mindössze pár darab tranzisztorral működtek, mára viszont az IT-szektor növekvő memória- és processzorkapacitás-igényeit néhány négyzetcentiméterre zsúfolt, több milliárd tranzisztor képes csupán kielégíteni.

Szerencsére a fizikai törvények és ezzel együtt a félvezetőkre épülő technológiák jól tűrik a kicsinyítést. Ugyanazon elv alapján működik egy 50–100 nanométer (a milliméter milliomod része) nagyságú tranzisztor, mint jóval nagyobb társai. Ebből eredően Gordon Moore előrejelzése, amely szerint az integrált áramkörök komplexitása kétfévente megduplázódik, 1975-től 30 éven át igen pontosnak bizonyult. A fejlődés ütemét főként a minél nagyobb tisztaságú félvezetők előállítására és a litográfiai módszerek tökéletesítése szabta meg.

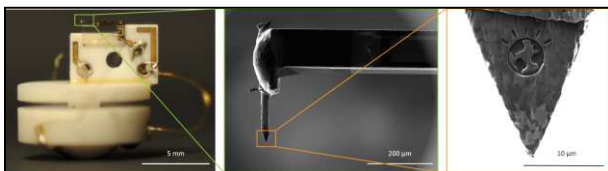
Lenyűgöző, hogy mára már elenyésző hibaszám-mal 10 – 20 nm vonalszélességű nyomtatott áramköröket is készítenek. A méret további csökkentését már csak atomi léptékű „építkezéssel” lehet elérni. Egyetlen egy atomból álló tranzisztor gondolata elsőre talán őrültségnek hangzik, ennek ellenére az utóbbi években bebizonyosodott, hogy nem lehetetlen a szilícium kristály felültén felépíteni.



1. ábra: **Egyetlen foszfor atomból felépített tranzisztor** (forrás: Nature Nanotechnology).

A nanotechnológiában a pásztázó tűszondás mikroszkópiai technikák megjelenése hozott áttörést. Az IBM svájci laboratóriumában kifejlesztett technológiával valóra vált a felületek atomi léptékű leképzése és atomi léptékű átalakítása, manipulálása. Az 1. ábrán látható, egyetlen foszfor atomból felépített tranzisztor is e módszer segítségével hozták létre az ausztráliai New South Wales egyetemen. A mikroszkóp lelke egy piezokristályra erősített fém tű, amelyet fókuszált ionsugárral kihegyezünk. A piezokristály elektromos áram hatására deformálódik, ezt nevezzük piezoelektromosság-nak. A piezoelektromos-hatást felhasználva a kristályra szerelt tű nagy pontossággal pozícionálható, pásztázható a felület felett.

Majzik Zsolt: A szerző a zürichi IBM Research Laboratórium posztdoktori kutatója. A szakember a Szegedi Egyetemen szerzett diplomát, majd kémia tudományokból PhD fokozatot.



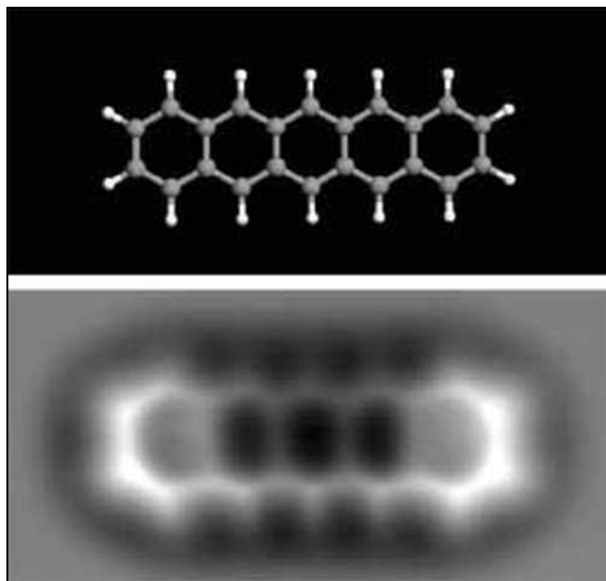
2. ábra: A pásztázó tűszondás mikroszkópban alkalmazott, fókuszált ionsugárral kihegyezett tű, amely egy mechanikai (qPlus) szenzorhoz kapcsolódik (©IBM). Kattintson a képre, és nézze meg nagyobb méretben!

A tű pásztázó mozgásából ered ennek a speciális mikroszkópiás eljárásnak a neve. Az atomi léptékű képalkotás hasonló ahhoz, ahogyan a látássérültek alkalmazzák a Braille-írást: az olvasó az ujjai-val szisztematikusan követi a felületre nyomtatott pontok rendszerét, amelyeket az agy domborzati képpé, a képek alapján pedig szöveggé alakít. A pásztázó tűszondás mikroszkópban a képalkotás során a tű követi a felület morfológiáját és a számítógép folyamatosan rögzíti a tű mozgását. A tapintás és így a Braille-olvasás az ujjunkban lévő mechanikai receptorokra épül.

Az általunk alkalmazott mikroszkópban a tű két fizikai jelenség felhasználásával érzékeli a felület közelségét: a) a tű hegyén lévő atomok és a felület atomjai között fellépő erőhatások által, b) az úgynevezett alagúteffektus révén. Az első működési módot könnyű értelmezni, mert hasonlóan az emberi érintéshez egy mechanikai szenzor alkalmazásával nyerünk képi információkat a felületről. Ezt a leképezési metódust atomierő mikroszkópiának (AFM, atomic force microscopy) nevezzük.

A második képalkotási típus már egy sokkal bonyolultabb, kvantummechanikai jelenségre épül. Ha két vezetőt összeérintünk, akkor elektromos áramot vezethetünk az egyik elektródából a másikba. Viszont parányi elektromos áram már akkor is folyhat a két vezető között, ha csak kellően közel kerülnek egymáshoz. A közel alatt itt nanométeres távolságot kell érteni (még egyszer a milliméter milliommód részét). A közvetlen kontaktus hiánya miatt kapta az alagúthatás nevet ez az érdekes jelenség. Az elektromos vezetés során az elektronok egy képzeletbeli alagúton utaznak. Az alagúteffektust felhasználó képalkotási üzemmód pedig a pásztázó alagútmikroszkópia (STM, scanning tunneling microscopy).

A felületanalízisben újabb technológiai áttörést hozott a molekulák kémiai szerkezetének közvetlen meghatározása atomierő mikroszkópiával.



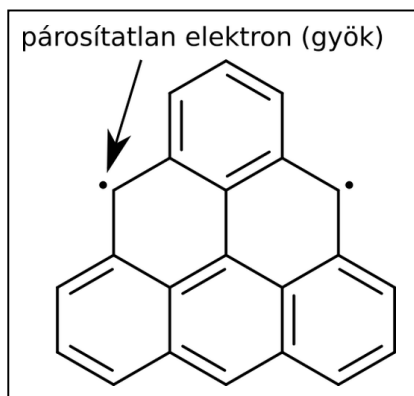
3. ábra: A pentacén térbeli szerkezete és a molekuláról készült atomierő mikroszkópiás felvétel (forrás Science).

Az új eljárás rendkívüli előnye, hogy a molekuláról (lásd pentacén), készült kép közvetlenül összevetethető a papírra rajzolt szerkezeti képlettel. Hátránya, hogy a molekulát felépítő atomoknak egy síkban kell elhelyezkedniük. Szerencsére jó elektromos vezetőképességük miatt a molekuláris elektronikában főként aromás vegyületeket alkalmaznak. Az aromáság egyik feltétele éppen a síkbeli térszerkezet. A képen látható pentacén is aromás szénhidrogén.

A már említett tranzisztorok közös jellemzője, hogy működésük a töltéssel rendelkező elektronok manipulálására épül. A méret fokozatos csökkentésével viszont ennek a működési elvnek a megbízhatósága és így az alkalmazhatósága is fokozatosan romlik. Manipulálhatjuk viszont az elektron egy másik sajátosságát: a spint, pontosabban a hozzá kapcsolódó mágneses tulajdonságait. A spin az elektron kvantummechanikai jellemzője és spinekre épülő technológia a spintronika.

Káros tulajdonságaik miatt mindenki hallott már a szabad gyökökről és az azokat tartalmazó vegyületekről. Szabad gyökök csoportjába azon molekulák tartoznak, amelyek egy vagy több párosítatlan elektronnal rendelkeznek, ezáltal fokozott a reakcióképességük. A heves reakcióképességükből eredendően nehéz ilyen molekulákat előállítani és tanulmányozni. Erich Clar, a szerves kémia egyik legnagyobb kutatója, még az ötvenes évek elején

megálmodott egy háromszög alakú molekulát, a triangulént.

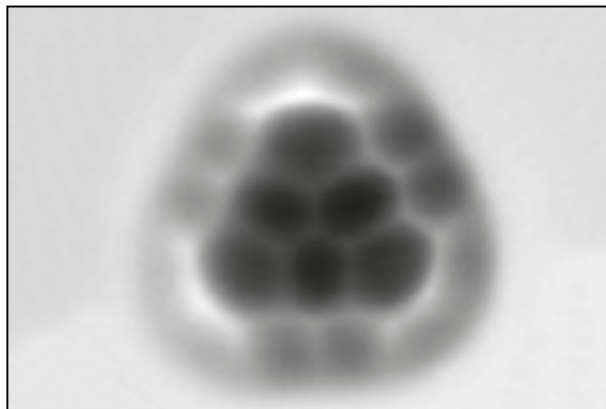


4. ábra: **Triangulén, két párosítatlan elektronnal rendelkező aromás szénhidrogén.**

A triangulén két szabad gyököt tartalmazó vegyület, és erősen reaktív. Olyannyira vehemens molekuláról van szó, hogy mikor Clar és később többen is megkísérelték előállítani, azonnal reakcióba lépett a levegő oxigénjével. A szintézis évtizedekig lehetetlen feladatnak bizonyult. A triangulén jelentősége a szabályos háromszög alakjában és az elektronszerkezetében rejlik. A két szabad elektrona miatt különleges mágneses tulajdonsággal bír, ez az úgynevezett triplet állapotot. A triplet informatikai megközelítésben azt jelenti, hogy a bináris rendszerekkel ellentétben (0, 1) három (-1, 0 és +1) értéket reprezentálhat. Például logikai műveleteknél sokszor előnyösebb, ha nem csak két lehetőség áll rendelkezésünkre. A triangulén sprintronikai és estelegesen kvantum számítástechnikai alkalmazásnak viszont az előfeltétele a sikeres szintézis.

A pásztázó tűszondás mikroszkópia tűjével nem csak a szerves vegyületek térbeli szerkezete határozható meg, hanem a molekuláris szerkezet atomok mozgatásával meg is változtatható. A triangulén előállítása is ezzel a módszerrel valósulhatott meg az angliai Warwick Egyetem és a kutatócsoportunk együttműködése révén. A szintézis jelentőségét jól mutatja, hogy eredményünk a nívós folyóirat, a Nature Nanotechnology címlapjára is felkerült. Az angliai kémikusok egy úgynevezett perkurzor vegyületet állítottak elő. A perkurzor molekula ugyanazzal a térszerkezettel rendelkezik, mint a triangulén, de két hidrogénatommal többlet tartalmaz. A módosított összetétel kellően hosszú élettartamot eredményez, ahhoz, hogy a mikroszkópot is tartalmazó vákuumkamrába helyezzük a

perkurzort. A két extra hidrogén atomot könnyen el lehet távolítani atomi manipulációval. A vákuum az azért szükséges, hogy megakadályozzuk a szintézis végén keletkező triangulén levegő oxigénjével történő reakcióját.



5. ábra: **Atomi manipulációval létrehozott triangulén** (forrás Nature Nanotechnology)

Az 5. ábrán látható triangulént egy rézkristály felületén állítottuk elő. Ahhoz, hogy az elektromos szerkezet is megismerjük, csökkentenünk kellett a molekula és a felület közötti kölcsönhatást. Utóbbit úgy értük el, hogy a felületre egy nemesgáz atomokból felépített „szőnyeget” terítettünk. A nemesgázok rendkívüli stabilitása által a xenon atomokból álló réteg megakadályozza, hogy a triangulén a felülettel kémiai reakcióba lépjen. Természetesen egy gázatomokból készült szőnyeg csak kellően alacsony hőmérsékleten, a mikroszkóp -268 Celsius-fok üzemi hőmérsékletén stabil. Utóbbi elsőre talán hihetetlennek tűnik, de a mélyhőmérsékletek fenntartása mára már rutin feladat, és az eddig megvalósított, szupravezetőkre épülő kvantum bitek is hasonló körülmények között üzemelnek.

A fentebb bemutatott felületi szintézis eredménye csak egy a sok lehetséges egzotikus vegyületek közül, amelyek forradalmasíthatják a jövő spintronikáját és talán a kvantum-számítástechnikát. Természetesen vizsgálataink ma még kizárólag az alapkutatások körébe tartoznak, mert jelen pillanatban az alap fizikai és kémiai tulajdonságok feltárása a legfontosabb. A bevezetőben ismertetett tranzisztorok példája jól mutatja, hogy egy ötlet és a megvalósítása között akár évtizedek is eltelhetnek.

Forrás: <https://bitport.hu/molekularis-elektronika-atomi-leptekkel>

Válogatta: Fonyó Istvánné