

PÁSZTÁZÓSZONDÁS MÓDSZEREK AZ MFA-BAN

Biró László Péter, Tapasztó Levente, Nemes-Incze Péter
HUN-REN EK MFA, Budapest

Gyulai professzor 2007-ben foglalta össze a *Fizikai Szemlében* gondolatait a pásztázószondás módszerekről [1].

A pásztázó alagútmikroszkóp (Scanning Tunneling Microscope), gyakori rövidítéssel STM, 1981-es publikálása után [2], szokatlanul rövid idővel, 1986-ban G. Binnig és H. Rohrer korszakalkotó eredményét fizikai Nobel-díjjal ismerték el. Ez a gyorsaság is fémjelzi az eredmények kivételes jelentőségét, ami abban nyilvánult meg, hogy az atomok „egyenként láthatóvá váltak”. Az idézőjelek többszörösen is indokoltak, mégis igaz az előbbi állítás. A módszer kivételes felbontási képességét az alagutazási folyamat sajátosságai adják, amely egy atomi skálán hegyes tű és a leképezett minta között zajlik [3]. Röviden: a leképezett vezető minta felszíne felett piezoelektromos aktuátorokkal néhány tized nanométeres távolságra a felület domborzatát lekövető módon mozgatunk egy atomi szinten hegyes fémtűt. A tű csúcsatomja és a minta atomjai között kialakuló, egyetlen atomnyi szélességű, szűk alagútcatornában az elektronok hol kisebb, hol nagyobb valószínűséggel „ugorhatnak át” az elektromosan előfeszített alagútközön, ami a minta helyi minőségétől függő, mérhető alagútáramot ad.

Az, hogy egy vezetőképes minta felszínén az egyes atomok térbeli elhelyezkedése leképezhetővé vált, számos új lehetőséget nyitott a kutatók előtt – ahogy azt az eltelt negyven év ékesen bebizonyította. Ezen lehetőségek tárháza mára akkorára bővült, hogy nincs olyan összefoglaló mű, amely egyben képes lenne bemutatni az elmúlt negyven év akárcsak főbb eredményeit is. A teljesség igénye nélkül, csupán néhányat kiragadva ezen területek közül, említhető az anyagok atomi skálán történő építése, módosítása [4], félvezető heteroátmenetek atomi szintű jellemzése [5], 2D anyagok heteroátmeneteinek [6] és ultragyors folyamatainak kutatása [7], de a vizsgált terület a kémiai folyamatokon át [8], a biológiáig terjed [9].

Az STM megalkotását rövid időn belül követte az atomierő-mikroszkóp (atomic force microscope, AFM) kifejlesztése [10]. A fő motivációt az adta, hogy az AFM a nem vezető minták leképezésére is alkalmas volt. Az tette

alkalmassá az AFM-et a szigetelő minták vizsgálatára is, hogy az STM-mel ellentétben a leképezést végző tű-szon- da és a minta között nem folyik alagútáram, hanem a van der Waals kölcsönhatás határozza meg a tű-minta kölcsönhatást. Ennek mérésére mikromegmunkálási eljárásokkal kialakított, vékony laprugón található tűt alkalmaznak. A laprugó lézeresen érzékelt deformációja méri a minta és a tű közötti kölcsönhatást. Az elmúlt évtizedekben az AFM és a belőle kialakult különféle leképezési módszerek még sokkal intenzívebb és szerteágazóbb fejlődésen mentek át, mint maga az STM. Így a Google Scholar adatbázisában csupán a 2020–2023-as időszakra rákeresve és az összefoglaló cikkekre szűkítve több mint 18500 találat az eredmény. Az aktuális tématerületek spektruma az elő anyag mechanikai tulajdonságainak vizsgálatától [11] a nanoskálán zajló elektrokémiai folyamatokon át [12] az újszerű nanopórusos anyagok jellemzéséig [13] és a sejtekben zajló folyamatokig [14] terjed.

Az STM története az MFA-ban (a továbbiakban MFA-ként utalunk az intézetre, amely 1990 és 2023 között ötször váltott nevet) 1991 nyarán kezdődött. Érdekes módon, az eszköz beszerzését két inkább elméleti kutató, Balázs Erzsébet és Kádár György kezdeményezték. A telepítéskor csúcskészüléknek számító, az RHK Technology által gyártott és 1 mikron² bepásztázásra képes STM első atomi felbontású felvételeit a kalibrációs mintának használt közel egykristályos pirolitikus grafit (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG) felszínén vettük fel. Gyulai professzor fő kutatási iránya természetesen adta,



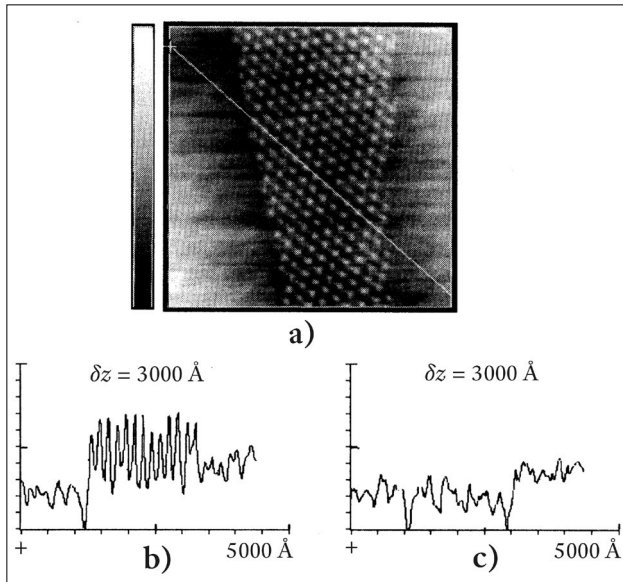
Biró László Péter a HUN-REN EK MFA Széchenyi díjas kutatóprofesszora, a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemen szerzett kitüntetéses fizikusi oklevelet 1979-ben, majd a Budapesti Műszaki Egyetemen mérnökfizikusi PhD fokozatot; az MTA rendes tagja, A Magyar Mérnökakadémia és az Academia Europaea tagja. Alapító osztályvezetője volt az MFA Nanoszerkezetek osztálynak, amelyet, 2015-ig vezetett. Számos hazai és nemzetközi kutatási projekt keretében járult hozzá a hazai nanotudományok kezdetéhez, elindította az MFA-ban a szén nanocsövek, a grafén és más 2D anyagok, valamint a fotonikus nanoarchitektúrák kutatását.



Tapasztó Levente a Magyar Kutatási Hálózat Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének tudományos tanácsadója és Nanoszerkezetek Laboratóriumának vezetője. A Junior Prima díjjal kitüntetett Lendület és az ERC ösztöndíjas kutatócsoport vezetője. Fizikusi diplomát a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemen, PhD fokozatot az ELTE Fizika Doktori Iskolájában szerzett. 2023 óta az MTA doktora. Kutatási területe a nanoskálájú anyagtudomány, azon belül a kétdimenziós anyagok kutatása.

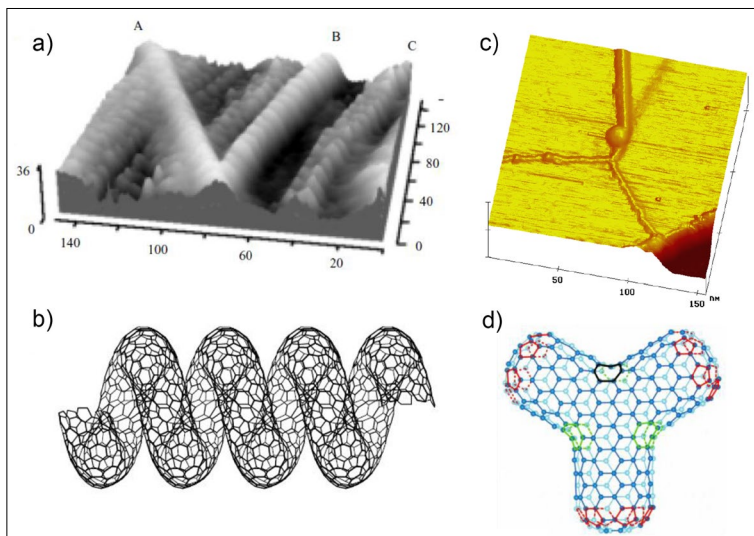


Nemes-Incze Péter 2013-ban doktorált az ELTE-n Biró László Péter témavezetése alatt. Munkája során grafén nanoszerkezetek előállítására összpontosított, illetve ezek vizsgálatára atomi skálán pásztázó alagútmikroszkópiával. Három évet töltött posztdoktori kutatóként Markus Morgenstern csoportjában az RWTH Aachenben, ahol a grafénben megfigyelhető mechanikai deformáció és kvantumpötty-fizikát, valamint más 2D anyagokat vizsgált STM segítségével. 2017-ben visszatért Budapestre és saját kutatócsoportját alapította az Energiatudományi Kutatóközpontban egy Lendület projektnek köszönhetően.



1. ábra. A 215 MeV energiára gyorsított Ne-ionokkal besugárzott HOPG felszínén megfigyelt moiré-szuperstruktúra. (a) Szürke skálájú topográfiai STM felvétel, a szürke skálának megfelelő magasságtartomány 0,38 nm; (b) vonalmetszet az (a)-ban látható, a topográfiai maximumokon áthaladó vonal mentén; (c) vonalmetszet két maximumsor között párhuzamosan a (b) vonalmetszettel. (Forrás: [15])

hogy a későbbiekben, gyorsított ionokkal besugárzott felületeket vizsgáltunk. Az első publikáció 1995-ben jelent meg a Physical Review B-ben, a nagy energiájú, 215 MeV energiára gyorsított Ne-ionokkal besugárzott HOPG felszínén megfigyelt nanostruktúráról [15]. Háromféle, jellegében erősen eltérő nanoszerkezetet figyeltünk meg: a) a kis energiájú kilökött céltárgyatomból dominánsan a nukleáris fékeződés tartományában okozott hibákat, b) olyan elnyújtott kiemelkedésekkel övezett krátereket, amelyeket a céltárgy felszínével nagy szöget bezáró pályán haladó, nagy energiájú (ez a dominánsam elektronikus fékeződés energiatarományára)



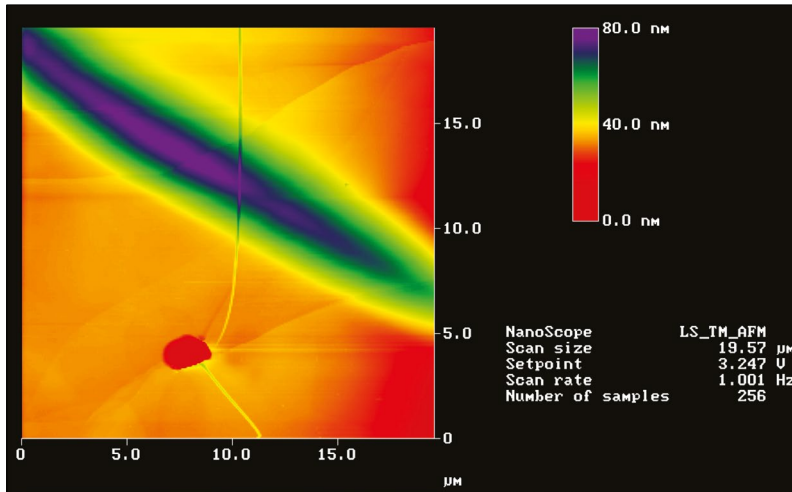
2. ábra. STM-felvételek spirálrugó-szerűen feltekert szén nanocsövekről (a); és a megfelelő szerkezeti modell (b). Szén nanocsövek Y elágazásáról készült STM-felvétel (c) és egy Y elágazás elvi szerkezeti modellje (d). (Források (a) és (b): [17]; (c) és (d): [20])

kilökött céltárgyatomból okoztak, és c) olyan atomi léptékű, moiréjellegű szuperstruktúrát mutató nyomokat, amelyeket a céltárgy felszínével párhuzamosan, néhány atomi réteg mélységben haladó kilökött céltárgyatomból okoztak (1. ábra). Látható a vonalmetszetekből. Hogy a maximumok közötti távolság mintegy nyolcvanszor nagyobb, mint 2,4 Å, a grafitra jellemző atomi maximumok távolsága.

1996-tól az MFA-ban folyó, STM-re alapuló kutatások fókuszába a szén nanocsövek kutatása került, szoros együttműködésben a belgiumi Namuri Egyetem (University of Namur) kutatóival. Elsőként sikerült megmutatni, hogy katalitikus úton is előállíthatók egyfalú (egy atomi rétegből álló) szén nanocsövek [16]. A későbbiekben számos, különleges formájú szén nanocső-alakzat, úgymint a szén nanocső-spirálok, és a szén nanocsövek Y elágazásai kerültek az MFA-ban folyó STM munka fő témái közé [17–20] (2. ábra).

Az első AFM-felvételeket, 1996-ban Erlangenben készítettük az Institute für Integrierte Schaltungenban. A lehetőség Gyulai professzor és Ryssel professzor – aki az IIS igazgatója volt – évtizedeken átívelő barátságának volt köszönhető. A minták nagy energiájú ionokkal besugárzott kristályos anyagok voltak, HOPG, csillám (muszkovit) és Si. Mivel a szokványos, felületre merőleges besugárzási geometria helyett elsőként alkalmaztunk újszerű, a minta felszínével párhuzamos besugárzást, számos új alakzatot sikerült leképezni, amit korábban még sohasem: az ionok behatolási mélységének tartományában kialakuló nukleáris fékeződési kaszkádokat [21] és a Si-kristályban a különböző fékeződési mechanizmusoknak megfelelő tartományokban kialakuló jellegzetes hibákat [22]. Végül – meglepetésünkre – a nagy energiájú ionokkal besugárzott HOPG-mintákon is megtaláltuk a szén nanocsöveket [23, 24]. Ezek a szén nanocsövek a céltárgy felszínén a nagy energiájú kilökött céltárgyatomból által keltett porlasztási kráterekből kilépő, gerjesztett állapotú szénatomokat tartalmazó felhőből kondenzálódnak, mégpedig úgy, hogy legalább egyik végük le van horgonyozva (3. ábra).

2004 után is a szén maradt a kutatások fókuszában, de ez már a grafén és a 2D anyagok kora volt. Az első atomi vékony (kétdimenziós – 2D) kristály, a grafén felfedezése után szinte azonnal a szilárdtestfizikai és anyagtudományi kutatások középpontjába került – elsősorban egyedülálló anyagi tulajdonságainak és különleges elektronszerkezetének köszönhetően. A pásztázószondás módszerek különösen jól alkalmazhatók a grafén és általában a 2D kristályok vizsgálatára, hiszen az anyagok felületét képezik le és ebben az esetben a teljes kristály felületi atomokból áll, vagyis teljes egészében hozzáférhető a pásztázószondás módszerek számára. Ez egyedülálló lehetőséget kínál az



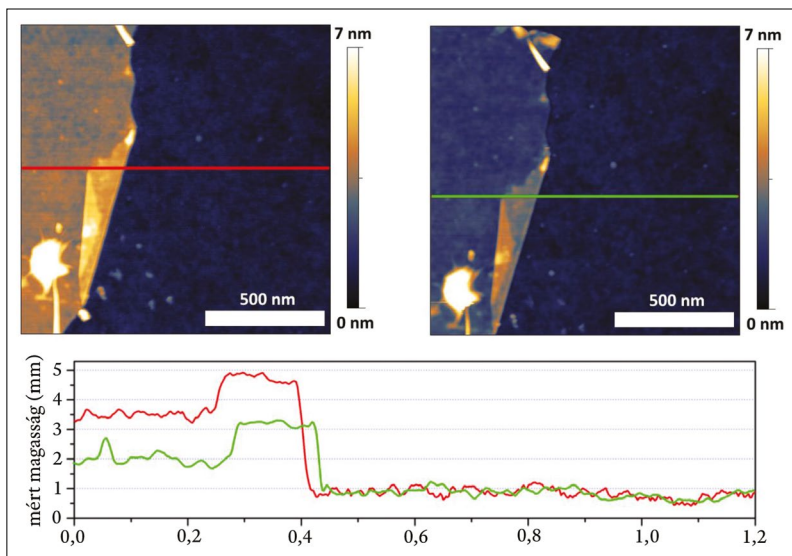
3. ábra. 156 MeV energiájú Xe-ionokkal besugárzott HOPG céltárgy felszínén keletkezett porlódási kráterről készült topográfiai AFM-felvétel. A kráter szájától induló két világosabb színű „fonálszerű alakzat” szén nanocső, amelyek a kráterből kiporlódott szénatomokból kondenzálódtak. Egyikük áthalad a grafit egy felületi gyűrődésén, de látható a színkontrasztból, hogy nem követi tökéletesen a gyűrődést

anyagokban végbemenő jelenségek részletesebb tanulmányozására, hiszen szinte minden folyamat a felületen, a „szemünk előtt” játszódik le, nem mélyen elrejtve a tömbi anyag belsejében. Az egyik sokat vitatott kérdés a szilíciumoxid hordozón található grafén vastagságát illetően – ha jobban belegondolunk, nem is annyira magától értetődő, mit is értünk egy egyetlen atom vastagságú lemez vastagsága alatt – az MFA-ban Nemes-Incze Péter oldotta meg [25].

Az a tény, hogy a pásztázószondás módszerek (AFM, STM) már fejlettek voltak a grafénbeli Dirac-elektronok felfedezésekor, jelentősen elősegítette a kétdimenziós

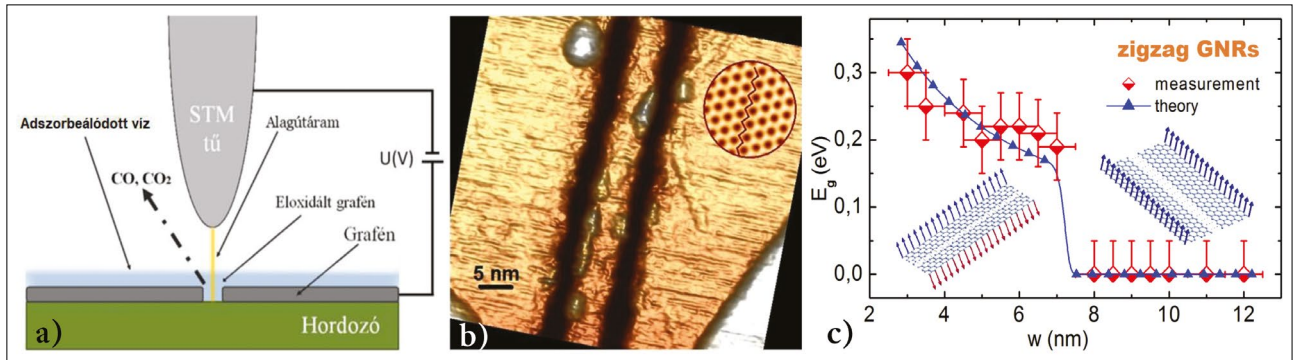
van der Waals-anyagok kutatását és alkalmazását. Azonban érdemes óvatosan eljárni, amikor már jól ismert módszereket új kutatási területeken próbálunk alkalmazni. Ezzel a kérdéssel szembesültünk, amikor azt próbáltuk megállapítani, hogy valójában milyen vastag egy grafénréteg, amely az előállítás után, tipikusan SiO₂ felületen található. A mérendő probléma ilyenkor precízebben megfogalmazva az, hogy mennyire magas lépcsőt képez a grafén- vagy többrétegű grafitkristály a SiO₂ hordozó felületén. Erre a kérdésre a válasz elsőre egyszerűnek tűnhet: a grafénrétegek közötti van der Waals-kötéstávolság, ami 0,336 nm. Ugyanakkor azt tapasztaltuk, hogy a mérési eredmények igen változatosak, és a mért érték akár 0,3 nm-től 1 nm-ig is terjedhet (4. ábra). Sőt, bizonyos esetekben a grafén a SiO₂ felületen bemélyedésként is megjelent.

Szisztematikus mérések alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a mérési eltérések oka az atomerő-mikroszkóp tűjének a grafén és az SiO₂ hordozó közötti különböző mechanikai kölcsönhatásaiban rejlik. Méréseink során azt találtuk, hogy ha a tű és a minta közötti erő erősen taszító jellegűre választjuk, akkor kiküszöbölhető ez a furcsa mérési anomália. Ez a tapasztalat jól rávilágít arra, hogy még a legegyszerűbb mérési feladatok is megfelelő körültekintést igényelnek. A cikkünk, amelyben részletesen bemutatjuk ezt a mérési műterméket és javaslatokat teszünk a helyes mérési eljárásokra, több mint 700 hivatkozást kapott a publikálása óta.



4. ábra. Egy háromrétegű grafén mintának két különböző pásztázási paraméterrel mért ugyanazon területe. Látható, hogy a rétegek hordozóhoz képest mért magassága erősen eltér a bal és jobb képen. Ennek az oka ott keresendő, hogy az AFM-tű más mechanikai kölcsönhatásban van a SiO₂ hordozó és a grafénkristály felületével. A helyes magasságmérés a jobb oldali ábrán valósul meg, olyan körülmények között, ahol a tű és a minta közötti erő erősen taszító jellegűre van beállítva

A grafén egyik legígéretesebb tulajdonságának már a kezdetektől azt tartották, hogy kiválóan vezeti az elektromos áramot. Töltéshordozóinak mozgékonyága szobahőmérsékleten is kiemelkedően magas, vagyis egységnyi elektromos tér igen nagy sebességre tudja felgyorsítani őket – így alkalmazásként azonnal ultragyors és ultra-kisfogyasztású, grafénalapú elektronikai eszközöket vizionáltak. Ezzel együtt megjelent az igény, hogy a grafén sáv szerkezetében tiltott sávot hozzunk létre, hiszen a digitális elektronika működése félvezető eszközökre alapul, a grafén pedig eredeti formájában (fél-) fémes viselkedést mutat. Ugyanakkor az is nagyon fontos, hogy úgy tegyük félvezetővé a grafént, hogy közben a töltéshordozóinak kiemelkedően magas mozgékonyágát megőrizzük. Elméleti számolásokkal megmutatták, hogy amennyiben a kétdimenziós grafénsíkból, nanométeres szélességű szalagokat vágunk ki, azok



5. ábra. a) Az STM-litográfias módszer vázlatos működési elve. b) STM-litográfiaival létrehozott 5 nm széles cikcakkélú grafén nanoszalag STM-képe. c) A cikcakkélú grafén nanoszalagok tiltott sávja a szalag szélességének függvényében éles félvezető-fém átmenetet mutat, amely a szalagok spinpolarizált élei közötti mágneses csatolás antiferro-ferromágneses átkapcsolásával magyarázható. (Forrás: [27])

félvezető-elektronszerkezettel is rendelkezhetnek, a szalag szélességének és éleinek kristálytani iránya függvényében. Megvolt tehát a recept a félvezető grafén szerkezetek (nanoszalagok) létrehozására, de nem volt hozzá megfelelő eszköz.

A feladatot elsőként Tapasztó Leventének sikerült megoldania az MFA-ban. A nanoméretű szerkezetek létrehozására legelterjedtebben használt eszköz az elektronsugaras litográfia volt, azonban ennek sem a pontossága (felbontása) nem volt megfelelően nagy, sem az élek kristálytani irányait nem lehetett kontrollálni az eljárás során. Ekkor merült fel bennünk az ötlet, hogy az STM-et lehetne alkalmazni grafén nanoszalagok létrehozására is. Az STM azon képessége, hogy a leképezésnél szokásoshoz képest jelentősen nagyobb feszültségek (5–10 V) alkalmazásával a minták felülete módosítható, már korábban is ismert volt, azonban ennek a módosításnak a pontossága, ugyanúgy a néhány 10 nm-es tartományban mozgott, mint az elektronsugaras litográfia esetében. Ennek oka az, hogy a megmunkálást ultranagy vákuumban végezték, így addig kellett növelni a tű és a minta közé kapcsolt feszültséget (10 V), míg az STM-tűből kilépő elektronok energiája elegendően nagy volt, hogy a minta felületén a kötéseket felszakítsa. Ám ebben a feszültségtartományban az elektronok már nem alagutazással, hanem téremisszióval léptek ki az STM tűből, vagyis a csatorna, amelyben az elektronok haladtak a minta felé jelentősen kiszélesedett.

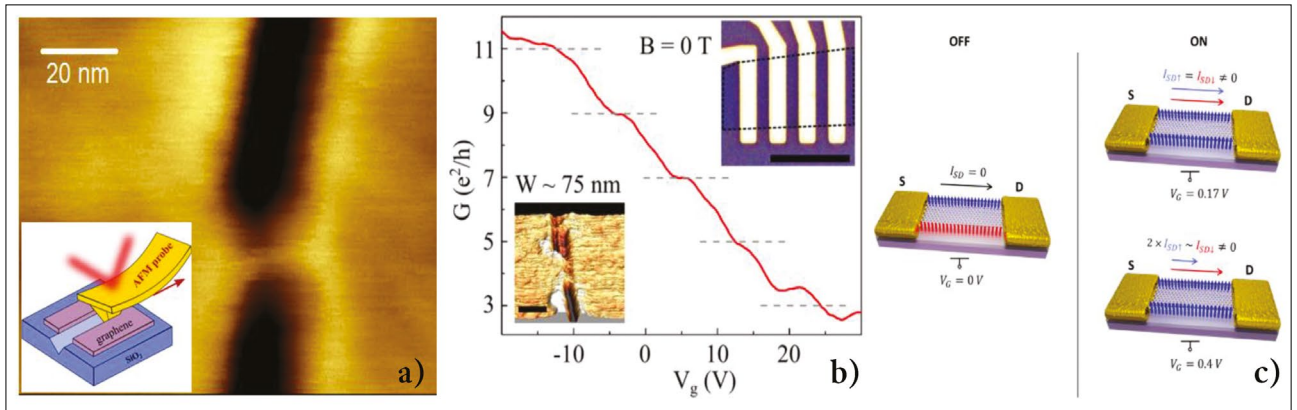
Az a körülmény, hogy mi nem ilyen feltételek között, hanem levegőn optimalizáltuk az STM-litográfias folyamatot, óriási előny jelentett, ugyanis a felületre adszorbeálódott víz segítségével a módosítást nem pusztán az elektronok becsapódása végezte, hanem azt egy kémiai marási folyamat segítette. Így sokkal kisebb küszöbfeszültségen (2–3 V) indult meg a minta módosítása (a grafén átvágása), vagyis sokkal kevésbé szélesedett ki az alagútcatorna. Ennek köszönhetően sikerült minden korábbinál pontosabbá tenni az STM-litográfias eljárást és kidolgozni a grafén nanomegmunkálásának legpontosabb módszerét, amellyel akár 2 nm széles grafén nanoszalagokat is reprodukálhatóan létre tudunk hozni (5. ábra). Ez a megmunkálás egy nagyságrenddel pon-

tosabb a korábbi módszerekhez viszonyítva. Továbbá kihasználva az STM atomi felbontású leképezési képességét, a STM-litográfiaiban a szalagok éleit, a grafénrács jól meghatározott kristálytani irányjaiban tudtuk kialakítani.

STM-litográfias eredményeink a *Nature Nanotechnology* folyóirat címlapjára kerültek [26], a módszert leíró publikációt mára már több mint ezren hivatkozták. Gyulai professzornak is nagyon tetszett a módszer, amelyet „nano-plazmapisztolynak” nevezett. Rendelkezésünkre állt tehát egy megfelelő pontosságú nanomegmunkálási eljárás, amellyel előre tervezett tulajdonságokkal (tiltottsáv-szélességgel) rendelkező félvezető nanoszalagokat tudunk létrehozni. A grafén nanoszalagok atomi és elektronszerkezetének összefüggéseit így először tudtuk szisztematikus módon kísérletileg feltárni, amely egy meglepő új eredményhez is vezetett. Alagútspektroszkópiai mérésekkel megfigyeltük, hogy a keskeny cikcakkélú szalagok esetében kialakuló tiltott sáv eredete a szalagok élein kialakuló mágneses rend. Eredményeinket a *Nature* folyóirat közölte [27] és mára már közel nyolcszáz másik munka hivatkozta.

Az STM-litográfianak elengedhetetlen feltétele a vezető hordozó, ezért a létrehozott nanoszalagokat nem lehetett direkt módon elektronikai eszközökbe integrálni. Ennek megoldására is kidolgoztunk egy atomerő-mikroszkópos nanomegmunkálási eljárást, amelynek lényege, hogy az AFM-tűvel a grafént a magas szimmetriájú kristálytani irányai mentén hasítjuk. Ilyen módon sikerült az AFM-litográfias eljárás pontosságát is megjavítanunk, lehetővé téve mindössze 10 nm széles grafén szerkezetek létrehozását AFM-litográfiaival (6. ábra), amelyeket nanoelektronikai eszközökbe integrálva minden korábbinál robusztusabb működésű grafénalapú kvantum pontkontaktus-eszközöket tudunk létrehozni [28].

Elméleti számításokkal azt is megmutattuk, hogy amennyiben 10 nm-nél keskenyebb cikcakkélú szalagokat integrálni tudnánk egy egyszerű tévezérlésű tranzisztorkonfigurációba, a hátsó kapuelektrodával egyaránt vezérelhető lenne a grafén nanoszalagon keresztül folyó töltés- és spináram.

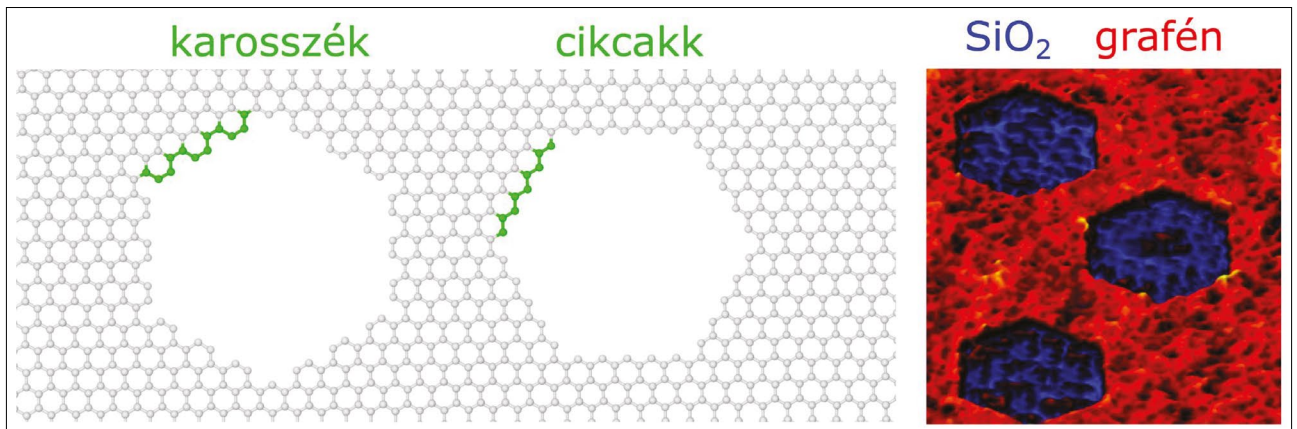


6. ábra. a) Egy AFM-litográfiával létrehozott mindössze 10 nm széles grafén nanohíd AFM-képe. b) A grafén nanohídra alapuló kvantumos működésű elektronikai eszköz, amely a vezetőképesség-quantum egész számú többszöröseinél mutat platókat. c) Cikcakkos grafén nanoszalagra épülő elektronikai eszköz elvi vázlata, amely a töltés- és spináramot egyaránt képes vezérelni egy egyszerű kapuelektrodával. (Forrás: [28])

Az STM-litográfias eljárással végzett kísérleteinkben sikeresen megmutattuk, hogy a grafén kristálytani irányba való megmunkálása kulcsfontosságú. Ezen túlmenően szükség lenne egy jól skalázható megmunkálási módszerre. A megoldást szinte véletlenül találta meg Nemes-Incze Péter, a *Nature Nanotechnology* egy korábbi számában megjelent cikkéből inspirálódva. Ebben a munkában szén nanocsövekkel „nanocsatornákat” hoztak létre SiO_2 felületen, magas hőmérsékleten és oxigénmentes környezetben végzett hőkezeléssel. A kísérlet során a szén nanocsövek a SiO_2 hordozót redukálták SiO -ra, míg a szén maga oxidálódott, CO -t képezve. Mindkét reakciótermék 800 Celsius fok körüli hőmérsékleten elhagyja a felületet, nanométeres szélességű marási csatornákat hagyva maga után. Laborunkban ezt a reakciót graféne is alkalmazva felfedeztük, hogy a grafén szélei és rácshibái mentén 700°C -on megindul a redukálási reakció. Azonban meglepő módon a marás kizárólag a karosszék (armchair) irányokban haladt, cikcakkéleket hagyva hátra. Ezen mintáinkat részletesebb vizsgálatnak alávetve, a stuttgarti Max Planck Intézet munkatársaival együttműködve, Raman-spektroszkópiás mérésekkel bizonyítottuk, hogy a cikcakkélek kristálytani orientációjukban

és atomi struktúrájukban is szinte tökéletesek [29]. A módszer kulcsfontosságú tulajdonsága, hogy rendkívül jól kontrollálható, mivel csak hibahelyekről indul a marási folyamat. Ezt kihasználva, AFM-tűvel létrehozott hibahelyekkel meghatározhattuk a kémiai marás kiindulási pontjait (7. ábra). Így akár 35 nm széles grafén nanoszalagokat is sikerült előállítani [30].

A grafén mellett egyre hangsúlyosabban kezdünk vizsgálni más kétdimenziós anyagokat, például molibdén-diszulfidot, amelynek először sikerült atomi felbontásban leképezni natív szerkezeti hibáit, illetve megfigyelni egy új oxidációs folyamatát, ahol az O-atomok egyedi kénatomokat lecserélve épülnek be a kétdimenziós MoS_2 kristály rácsába. Ezzel párhuzamosan a pásztázószondas eszközparkon is komoly fejlesztések történtek az időközben elnyert Lendület-és ERC-projekteknek köszönhetően. Két alacsony hőmérsékletű STM- és spektroszkópiás méréseket is lehetővé tevő berendezéssel bővítettük az eszközeinket, amelyekkel az anyagok elektronszerkezetének olyan apró részletei is megfigyelhetők, mint egy 10 meV-os tiltott sáv, vagy az élekre lokalizált elektronállapotok. Az általunk vizsgált anyagok köre is tovább bővült topologikus szigetelő



7. ábra. Különböző kristálytani orientációjú lyukak a grafénben. A jobb oldali AFM-felvételen előre megtervezett pozícióban kimart, 500 nm oldalhosszúságú, cikcakkélekkel rendelkező nanolyukak

anyagokkal, illetve a kétdimenziós anyagok kontrollált elforgatásával létrehozható moiré-szuperrácsok és két-dimenziós heteroszerkezetek vizsgálatával.

A Gyulai professzor ionsugaras témáiból harminc évvel ezelőtt elindult pásztázószondás módszereken alapuló munkából mára egy nemzetközi szinten is elismert kutatócsoport alakult ki, amely a kétdimenziós anyagok kutatásának kiemelkedően sikeres művelője.

Irodalom

1. Gyulai J.: Nanotudomány, nanoetchnológia. *Fizika Szemle* 2007/2, 71. <http://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz0702/gyulai0702.html>
2. Binnig Q., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.: Tunneling through a controllable vacuum gap. *Appl. Phys. Lett.* 40, (1982) 178–180.
3. Márk G. I.: Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban. *Fizikai Szemle* 2006/6, 190. <http://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz0606/mark0606.html>
4. Ko W., Ma C., Nguyen G. D., Kolmer M., Li, A.: Atomic-scale manipulation and in situ characterization with scanning tunneling microscopy. *Advanced Functional Materials* 29(52), (2019) 1903770. <https://doi.org/10.1002/adfm.201903770>
5. Peng W., Wang H., Lu H., Yin L., Wang Y., Grandidier B., Yang D., Pi X.: Recent progress on the scanning tunneling microscopy and spectroscopy study of semiconductor heterojunctions. *Small* 17(50), (2021) 2100655. <https://doi.org/10.1002/sml.202100655>
6. Kahn E., Liu M., Zhang T., Liu H., Fujisawa K., Bepete G., Ajayan P. M., Terrones M.: Functional hetero-interfaces in atomically thin materials. *Materials Today* 37(August), (2020) 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.02.021>
7. Mogi H., Arashida Y., Kikuchi R., Mizuno R., Wakabayashi J., Wada N., Miyata Y., Tanihara A., Yoshida S., Takeuchi O., Shigekawa H.: Ultrafast nanoscale exciton dynamics via laser-combined scanning tunneling microscopy in atomically thin materials. *Npj 2D Materials and Applications* 6(1), (2022) 72. <https://doi.org/10.1038/s41699-022-00345-1>
8. De Feyter S., De Schryver F. C.: Two-dimensional supramolecular self-assembly probed by scanning tunneling microscopy. *Chemical Society Reviews* 32(3), (2003) 139–150. <https://doi.org/10.1039/b206566p>
9. Ghoderao P., Sahare S., Lee S.-L., Sonar P.: Envision and appraisal of biomolecules and their interactions through scanning probe microscopy. *Small Structures* (2023) 2200273. <https://doi.org/10.1002/ssr.202200273>
10. Binnig G., Quate C. F., Gerber C.: Atomic force microscope. *Physical Review Letters* 56(9), (1986) 930–933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
11. Norman M. D. A., Ferreira S. A., Jowett G. M., Bozec L., Gentleman E.: Measuring the elastic modulus of soft culture surfaces and three-dimensional hydrogels using atomic force microscopy. *Nature Protocols* 16(5), (2021) 2418–2449. <https://doi.org/10.1038/s41596-021-00495-4>
12. Shi X., Qing W., Marhaba T., Zhang W.: Atomic force microscopy – Scanning electrochemical microscopy (AFM-SECM) for nanoscale topographical and electrochemical characterization: Principles, applications and perspectives. *Electrochimica Acta* 332, (2020) 135472. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135472>
13. Allendorf M. D., Dong R., Feng X., Kaskel S., Matoga D., Stavila V.: Electronic devices using open framework materials. *Chemical Reviews* 120(16), (2020) 8581–8640. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00033>
14. Dufrene Y. F., Viljoen A., Mignolet J., Mathelié-Guinlet M.: AFM in cellular and molecular microbiology. *Cellular Microbiology* 23(7), (2021) 1–12. <https://doi.org/10.1111/cmi.13324>
15. Biró L. P., Gyulai J., Havancsák K.: Scanning-tunneling-microscope investigation of a 215-MeV Ne-irradiated graphite surface. *Physical Review B* 52(3), (1995) 2047–2053. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.2047>
16. Biró L. P., Lazarescu S., Lambin P., Thiry P. A., Fonseca A., Nagy J. B., Lucas A. A.: Scanning tunneling microscope investigation of carbon nanotubes produced by catalytic decomposition of acetylene. *Physical Review B* 56(19), (1997) 12490–12498. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.12490>
17. Biró L. P., Lazarescu S. D., Thiry P. A., Fonseca A., Nagy J. B., Lucas A. A., Lambin P.: Scanning tunneling microscopy observation of tightly wound, single-wall coiled carbon nanotubes. *Europhysics Letters (EPL)* 50(4), (2000) 494–500. <https://doi.org/10.1209/epl/i2000-00296-0>
18. Biró L. P., Ehlich R., Osvath Z., Koós A. A., Horváth Z. E., Gyulai J., Nagy J. B.: From straight carbon nanotubes to Y-branched and coiled carbon nanotubes. *Diamond and Related Materials* 11, (2002) 1081–1085.
19. Osvath Z., Koós A. A., Horváth Z. E., Gyulai J., Benito A. M., Martínez M. T., Maser W. K., Biró L. P.: Arc-grown Y-branched carbon nanotubes observed by scanning tunneling microscopy (STM). *Chemical Physics Letters* 365, (2002) 338–342.
20. Biró L. P., Ehlich R., Osvath Z., Koós A., Horváth Z. E., Gyulai J., Nagy J. B.: Room temperature growth of single-wall coiled carbon nanotubes and Y-branches. *Materials Science and Engineering: C* 19(1–2), (2002) 3–7. [https://doi.org/10.1016/S0928-4931\(01\)00405-2](https://doi.org/10.1016/S0928-4931(01)00405-2)
21. Biró L., Gyulai J., Havancsák K.: Scanning probe microscopy investigation of nanometer structures produced by irradiation with 200 MeV ions. *Vacuum* 50(3–4), (1998) 263–272. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(98\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(98)00051-7)
22. Biró L. P., Gyulai J., Havancsák K., Didyk A. Y., Bogen S., Frey L.: Use of atomic-force microscopy and of a parallel irradiation geometry for in-depth characterization of damage produced by swift Kr ions in silicon. *Physical Review B* 54(17), (1996) 11853–11856. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.11853>
23. Biró L. P., Márk G. I., Gyulai J., Havancsák K., Lipp S., Lehrer C., Frey L., Ryssel H.: AFM and STM investigation of carbon nanotubes produced by high energy ion irradiation of graphite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 147, (1999) 142–147.
24. Biró L. P., Szabó B., Mark G. I., Gyulai J., Havancsák K., Kürti J., Dunlop A., Frey L., Ryssel H.: Carbon nanotubes produced by high energy ($E > 100$ MeV), heavy ion irradiation of graphite. *Nuclear Instruments Methods* 148, (1999) 1102–1105. <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0168583X98007381>
25. Nemes-Incze P., Osvath Z., Kamarás K., Biró L. P.: Anomalies in thickness measurements of graphene and few layer graphite crystals by tapping mode atomic force microscopy. *Carbon* 46(11), (2008) 1435–1442. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.06.022>
26. Tapasztó L., Dobrik G., Lambin P., Biró L. P.: Tailoring the atomic structure of graphene nanoribbons by scanning tunnelling microscope lithography. *Nature Nanotechnology* 3(7), (2008) 397–401. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.149>
27. Magda G. Z., Jin X., Hagymási I., Vancsó P., Osvath Z., Nemes-Incze P., Hwang C., Biró L. P., Tapasztó L.: Room-temperature magnetic order on zigzag edges of narrow graphene nanoribbons. *Nature* 514(7524), (2014) 608–611. <https://doi.org/10.1038/nature13831>
28. Kun P., Fülöp B., Dobrik G., Nemes-Incze P., Lukács I. E., Csonka S., Hwang C., Tapasztó L.: Robust quantum point contact operation of narrow graphene constrictions patterned by AFM cleavage lithography. *Npj 2D Materials and Applications* 4(1), (2020) 43. <https://doi.org/10.1038/s41699-020-00177-x>
29. Krauss B., Nemes-Incze P., Skakalova V., Biro L. P., von Klitzing K., Smet J. H.: Raman scattering at pure graphene zigzag edges. *Nano Letters* 10, (2010) 4544–4548. <https://doi.org/10.1021/nl102526s>
30. Nemes-Incze P., Magda G., Kamarás K., Biró L. P.: Crystallographically selective nanopatterning of graphene on SiO₂. *Nano Research* 3(2), (2010) 110–116. <https://doi.org/10.1007/s12274-010-1015-3>