

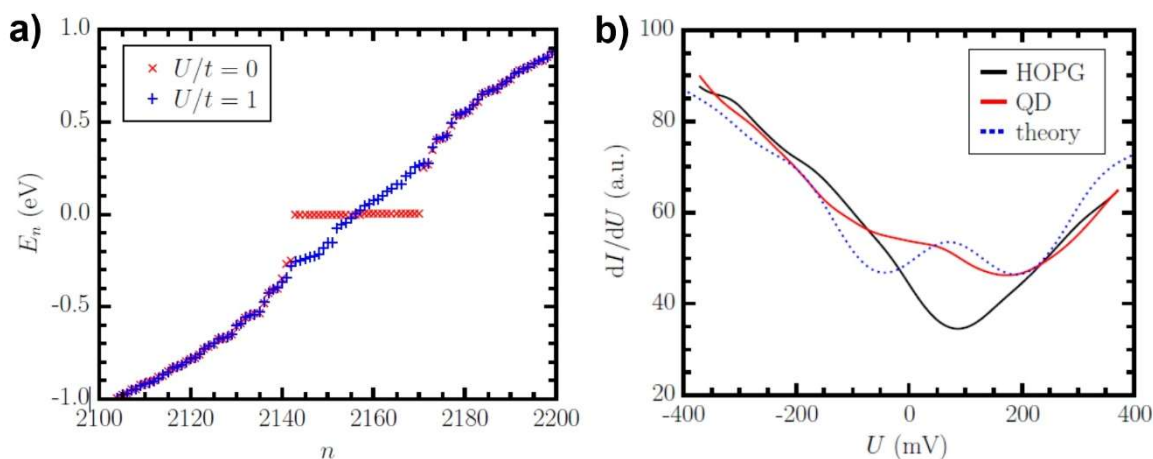
Válaszok Dr. Cserhádi Csaba bírálatára

Először is köszönöm Dr. Cserhádi Csabának az értekezésem alapos áttanulmányozását és konstruktív bírálói véleményét. A feltett kérdésekre az alábbi válaszokat adom:

1. A szerző a $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30° szuperstruktúrákat az elektronok völgyközi szórásával, illetve Umklapp-szórással magyarázza. Miért tekinthető az Umklapp-szórás kulcsfontosságúnak a grafén-pöttyök elektronikus állapotsűrűségében és milyen közvetlen hatással van ez a vezetőképességre és/vagy a sávszerkezetre?

Az alábbi 1a. ábrán a vizsgált grafénpöttyre kiszámolt energiaszintek láthatók. Elektron-elektron kölcsönhatás nélkül a Dirac-pontnál ($E = 0$ eV) degenerált energiaszintek vannak (piros), valamint ez alatt és felett 0.2 eV-os tiltott sáv jelenik meg. A Coulomb-kölcsönhatás bekapcsolásával a degeneráció megszűnik, az energiaszintek jobban eloszlanak ebben a tartományban (kék). Erre az esetre a számolt állapotsűrűség-karakterisztika (1b. ábra, pontozott kék vonal) jól megközelíti a mért spektrumot (piros vonal). Azt mondhatjuk, hogy az elektron-elektron kölcsönhatás módosítja a grafénpötty elektron-állapotsűrűségét, és a megváltozott eloszlásban lesznek olyan elektronok, amelyek Umklapp-szórásban vesznek részt az STM mérések során.

Az Umklapp-szórás közvetlen hatása a vezetőképesség csökkenése. Grafénpöttyök (vagy általában kvantumpöttyök) esetén még figyelembe kell venni, hogy egy-elektron tranzisztor (Coulomb-blokád) elrendezésben a pötty vezetőképessége a diszkrét energiaszinteken keresztül történik. Az elektron-elektron kölcsönhatás módosítja ezeket az energiaszinteket, így közvetlenül meghatározza, hogy milyen kapufeszültségnél vezet az eszköz.



1. ábra. I. Hagymási, P. Vancsó, A. Pálinkás, Z. Osváth, Phys. Rev. B **95**, 075123 (2017) nyomán.

2. *Megmutatta, hogy összefüggés van a Moiré-szuperstruktúra periódusának változása és a grafén lokális állapotsűrűsége közt. Milyen gyakorlati alkalmazásokban lehet releváns ez a jelenség?*

A lokális állapotsűrűségben (LDOS) másodlagos minimumok (másodlagos Dirac-pontok) jelennek meg, amelyek energiája fordított arányban változik a moiré-periódussal. Ez gyakorlatilag további lehetőséget ad a vezetőképesség kapufeszültséggel való szabályozására. Így például a másodlagos LDOS minimumot megcélzó kapufeszültséggel stabil áramminimum állítható be a megfelelő Moiré-eszközön, ami adott esetben egy harmadik állapotot jelenthet a hagyományos be/ki állapotok mellett. Ezért a jelenség a hármas alapú (ternáris) logikai kapuk építésénél lehet releváns.

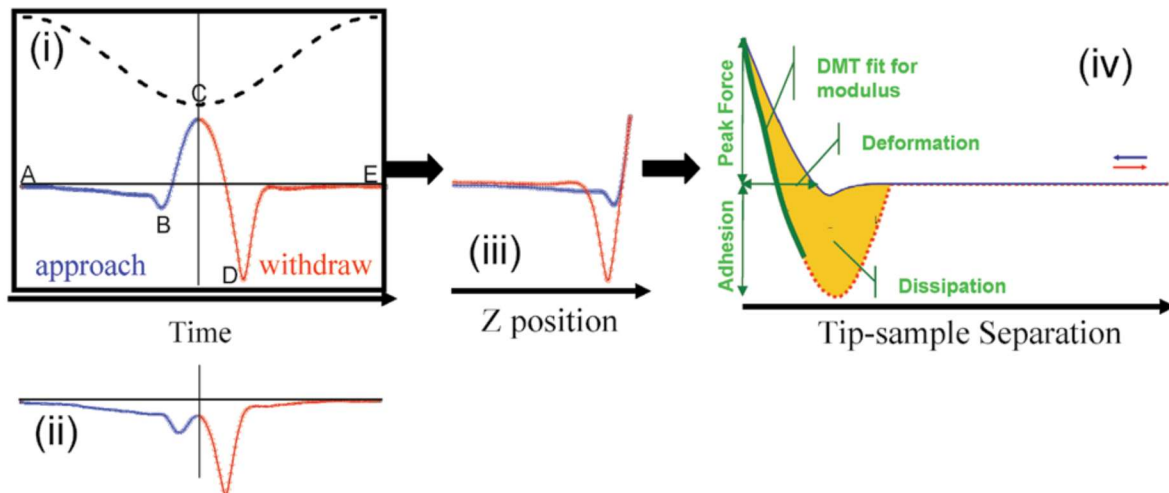
Kiemelt fontosságúak a nagy moiré-periódusú, vagyis a kis (1° körüli) elforgatási szögű rendszerek, ahol ún. lapos sávok alakulnak ki, és egészen kismértékű kapufeszültség-változtatás nagy vezetőképesség-változást eredményez. Ez lehetővé teszi a lényegesen kisebb fogyasztású tranzistorok, processzorok kialakítását, amelyek nem melegednek. Továbbá, a lapos sávokban jelentős az elektron-korreláció, és a kapufeszültség állításával szigetelő, vezető, vagy szupravezető állapot kapcsolható be. Így ugyanaz az eszköz különböző időpontokban lehet memóriaegység, logikai kapu, vagy szupravezető összeköttetés.

3. *A szerző összehasonlító AFM- és STM-nanoindentációt végzett grafén-buborékokon. Milyen előnyei és korlátai vannak az STM-tű mechanikai erőhatásainak becslésében a klasszikus AFM-mérésekhez képest a felfüggesztett grafén vizsgálata során?*

Az STM-tű által kifejtett mechanikai erő becslésénél nem igazán tudnék előnyöket felsorakoztatni az AFM-mérésekhez képest, ennek inkább csak korlátai vannak. Ilyen korlát például, hogy nem ismerjük az STM tű pontos alakját és görbületi sugarát (AFM tű esetén vannak erre vonatkozó névleges adataink). A mért topográfia alapján az STM-tűnek csupán a *maximális* görbületi sugarára tudtam becslést adni, amivel egy adott benyomódás elérhető a felfüggesztett grafénon (43. ábra). Egy másik korlát vagy hibaforrás a grafén benyomódásának pontos meghatározása. A 43b. ábrán mutatott vonalmetszeteken látszik, hogy a felfüggesztett grafénon végzett mérések sokkal zajosabbak, főleg kis előfeszítéseknél, az AFM-mérésekhez képest. Ez abból adódik, hogy az alagútáram, mint a leképezés visszacsatoló paramétere, nagyon érzékeny a felfüggesztett grafén vertikális mozgásaira.

Az STM méréseknél fellépő erők becslésénél főleg annak megállapítása volt a cél, hogy milyen leképezési paraméterek mellett (előfeszítés, alagútáram) jelentkeznek az AFM méréseknél használt nagyságrendbe eső taszító erők.

4. A dolgozatban több helyen szerepel az ún. Peak Force üzemmód. A 3. fejezetben bemutatja ezt az analitikai módszert. Arra kérem, ismertesse részletesebben ezt a vizsgálati módszert!



2. ábra. Quantitative Mechanical Property Mapping at the Nanoscale with PeakForce QNM, Bruker Application Note #128, page 2.

PeakForce üzemmódban az AFM tű a rezonancia-frekvenciájánál (~300 kHz) jóval kisebb frekvencián (1 – 2 kHz) rezeg. A 2. ábrán az egy rezgési periódusnak megfelelő túmozgást és a mintával való kölcsönhatásból származó erőket követhetjük nyomon. Az (i). ábrán az erő az idő függvényében látható a mintához közelítő (kék), valamint a mintától távolodó (piros) szakaszon. A „C” pont jelöli a legnagyobb erőt (peak force), amelynek értéke állítható (itt a taszító erők tartományában van). Az (ii). ábra azt mutatja, hogy ez az érték a vonzó erők tartományában is lehet. A (iii)-(iv). ábrákon ugyanúgy az erő van ábrázolva, a Z piezo helyzetének függvényében, illetve a tű-minta távolság függvényében.

Pásztázás során a visszacsatoló rendszer a beállított legnagyobb erőt tartja állandónak. Minden mérési pontban (amelyhez topográfiai adatot rögzít) a rendszer mér egy vagy több teljes erő-távolság görbét is, és azt valós időben ki is elemzi. Alapesetben maguk az erő-távolság görbék nem kerülnek rögzítésre, csupán az ezekből valós időben származtatott mennyiségek. Ezek a mennyiségek, ahogy a (iv). ábra is szemlélteti, az adhézió, disszipáció, deformáció, és a Young-modulus. Ez azt jelenti, hogy a topográfiai felvételekkel egyidejűleg adhéziós, disszipációs, stb. térképek is készülhetnek, a topográfiával megegyező felbontással.

5. Láttuk, hogy Ar^+ ionos besugárzással hangolható a grafén hullámossága. Hogyan értelmezhető a grafén kristályos szerkezetének doménméret-csökkenése a Raman-mérések alapján, és milyen összefüggés van a szerkezeti hibák és az optikai válasz között?

A szerkezeti hibák (pl. vakanciák, élek, szemcsehatárok) szórócentrumokat jelentenek az elektronok számára. A D-csúcs megjelenését a Raman-spektrumokban ezek a hibák okozzák: a lézerral gerjesztett elektron átadja energiájának egy részét egy nagy impulzusú fononnak, majd a hibahelyen történő rugalmas visszaszórás teszi lehetővé az elektron fénykibocsátással járó rekombinációját (lásd a 23. ábra a disszertációban).

Ar^+ ionos besugárzás esetén valóban, egyedi ponthibák jönnek létre a szerkezetben, nem szemcsehatárok, ezért kristályos domének helyett inkább a hibák közti átlagos távolságról beszélhetünk, illetve ennek csökkenéséről. A disszertációban található 38. összefüggés szerint a D-csúcs és a G-csúcs intenzitásának aránya fordítottan arányos a hibák közti átlagos távolság (L_a) négyzetével: $I_D/I_G = C(\lambda)/L_a^2$. A hibasűrűség növekedésével az I_D/I_G arány is növekszik. Az összefüggés $L_a \approx 5 \text{ nm}$ -ig írja le jól a hibák közti átlagos távolság csökkenését. Ennél nagyobb hibasűrűségnél az I_D/I_G arány csökkenni kezd.

6. *A grafénnel fedett Ag és Au nanorészecskék stabilitása és plazmonikus tulajdonságai több kísérletben is bemutatásra kerülnek. Milyen szerepet játszik a grafén réteg vastagsága és hibasűrűsége a plazmonrezonancia hosszú távú stabilitásában és a gőzérzékelési szelektivitásban?*

A grafén ugyan egyetlen szénatom vastagságú anyag, viszont fedőréteggént – amint az Ag nanorészecskék esetén láttuk – jelentős szerepet tud játszani a plazmonrezonancia hosszú távú stabilitásának megőrzésében. Két- vagy néhányrétegű grafén alkalmazásával valószínűleg nagyobb stabilitás érhető el, viszont ilyenkor az érzékelendő molekulák is távolabb kerülnek a nanorészecskéktől, így kisebb lokális elektromos terekkel hatnak kölcsön, mint amekkorák a nanorészecskék közvetlen közelében kialakulnak. Ez pedig az érzékenységet csökkenti.

A hibákat tartalmazó grafén védőréteg – ahogy Ag nanorészecskék esetén megmutattuk – egyes gőzökre növeli az érzékenységet, másokra viszont csökkenti, így a ponthibák létrehozása hasznos lehet a szelektív érzékelésben. A ponthibák típusát és a hibasűrűséget viszont valószínűleg optimalizálni kell, mivel pl. a többszörös vakanciák (amelyek átengedhetik a légköri szennyezőmolekulákat) és a túl nagy hibasűrűség a hosszú távú stabilitás rovására mehet. Ez főleg Ag nanorészecskék esetén fontos, amelyek különösen érzékenyek a környezeti hatásokra.

7. *A grafént immár két évtizede ígéretes anyagként tartják számon, ugyanakkor ipari szintű alkalmazása csak nagyon lassan körvonalazódik. Hogyan látja, milyen területeken van reális esély arra, hogy a grafén (illetve a grafén alapú hibrid nanoszerkezetek) szélesebb körben elérhető, ipari szintű alkalmazásokat nyerjenek a közeljövőben?*

Már létező, kereskedelemben kapható termékek:

- grafén tartalmú membránok fül- és fejhallgatókban (pl. <https://maxell.com.hk/products/audio/graphene-true-wireless-earphone-3>, <https://www.oragraphene.com/gq-headphones>)
- egyes Huawei okostelefonoknál (Mate szériából) grafént alkalmaznak a hatékonyabb hőelvezetéshez (<https://www.huaweicentral.com/huawei-flaunts-ice-cutting-mate-x6-graphene-cooling-sheet-at-mwc25>)
- grafén tartalmú szuperkondenzátorok: <https://www.skeletontech.com/ultracapacitor-technology>
- repülőiparban (Airbus, Boeing): grafén használata különböző szerkezeti elemekben (könnyebb és erősebb vázak), jégtelenítésre (fűtőszál funkció), villámcsapás elleni védelemre (vezető bevonat), stb.

- különböző grafén alapú szenzorok: Graphenea (<https://www.graphenea.com/collections/buy-gfet-models-for-sensing-applications>), Paragraf (<https://www.paragraf.com>)

A Graphene Flagship honlapján található legújabb technológiai és innovációs ütemterv (<https://graphene-flagship.eu/industrialisation/roadmap>) szerint a grafén a közeljövőben (2030-ig) többek között az alábbi területeken nyerhet szélesebb körben alkalmazást:

- multifunkcionális építőanyagok
- nagyfrekvenciás elektronika
- hajlítható mobileszközök
- neurális interfészek.

Budapest, 2026.04.20



Osváth Zoltán