

Bírálat

Fülöp Bálint

„Van der Waals heterostructures: from fabrication to hydrostatic pressure experiments”
című PhD értekezéséről

Fülöp Bálint doktori munkája réteges van der Waals anyagok heterostrukturáinak töltéstranszport mérésekkel való karakterizálásával foglalkozik. Ezen minták vizsgálata során néhány jól ismert hangolási paramétert lehet használni, amelyek függvényében lehet változtatni a 2D anyagok viselkedését. Ilyenek az elektromos és mágneses terek, illetve a mechanikai deformáció. F. Bálint a munkája során egy új „hangolási paramétert” vezetett be a BME eszköztárába: a hidrosztatikus nyomást. Ennek segítségével hangolhatók a minták rácsparaméterei, különösen a van der Waals síkokra merőlegesen, ahol a Young modulus nagyságrendekkel kisebb, mint a rétegekre párhuzamos irányban. Saját maga által fejlesztett mérési berendezésben nyomás hatására nagyságrendileg néhány %-al csökkenthető a vdW rétegek közti távolság. Saját mérések alapján megmutatta, hogy ezáltal kb. 70%-al növelhető a grafén – WSe₂ heterostruktúra Rashba spin-pálya együtthatója. Továbbá, vizsgálta BiTeI elvékonyítását egy elemi cella méretéig. Ezen témákból első szerzős cikkekkel rendelkezik, rangos folyóiratokban. Végezetül, a baseli Schönenberger csoporttal együttműködésben végzett kísérleteket pontszerű elektromos kontaktusok létrehozására. Ezek különösen hasznosak tudnak lenni topologikus elektron rendszerek vizsgálata esetében, mint pl a QH állapot. Használatuk által könnyen szétválasztható a minta él és a tömbi részének a vezetőképessége. Ebből a témából is keletkezett egy második szerzős cikk az Appl. Phys. Lett.-ben.

A disszertáció bevezetője logikusan van felépítve, a levezetések egyszerűek és követhetőek, a lényeges fizikára összpontosítanak, nem a technikai részletekre. Ez különösen gördülékennyé teszi a szöveget. Hivatkozás listája elegendő, néhány esetet kivéve megfelelő cikkekre hivatkozik. A dolgozatot olvasva azt a benyomást kaptam, hogy a jelölt mélységeiben érti és átlátja az általa használt módszerek fizikai és mérés-technikai hátterét. A bevezető elégséges információt tartalmaz a témában kevésbé jártások számára is. A saját eredményeket tartalmazó fejezetek megírása során erősen támaszkodik a cikkek szöveg és képi anyagára. Ezt véleményem szerint a szerzőnek sikerült megfelelően összefűznie egy koherens munkává. A fejezetek előtt különösen hasznosnak találtam a rövid összefoglalót, ami kiemeli a bemutatandó munka jelentőségét. Az összekötő szövegekben és általában a dolgozatban sajnos elég sok elírás van. Hibák csúsztak be az irodalmi jegyzékbe is. Több, nem korrekt angolsággal megírt mondatot találtam. Az ilyen hibák házivédés előtt még talán elfogadhatóak, de legalább a házivédés során jó lett volna alaposabban kiszűrni. Ezeket a hibákat itt nem sorolom, erről küldtem javítást pdf formájában a szerzőnek.

Megjegyzéseim (nem kell rá válaszolni):

1. A szerző a dolgozatban keverve használja a „I present/show...” és a „we...” megfogalmazásokat. Lásd például: 9. oldal: „I present...”, valamint 11. oldal „... we start with...”. Valójában jól körül van határolva a szövegben a szerző hozzájárulása a kísérletekhez, illetve a számolásokhoz. Szóval nyugodtan lehetne konzisztensen használni az „I present/show...” megfogalmazást.
2. A „topological” fogalmat két különböző értelemben használja: A minta és a kontaktusok geometriája, illetve az elektron rendszert jellemző topologikus tulajdonság (Chern szám). Ezek értelmére csak a szövegkörnyezetből lehet következtetni. Kevésbé tájékozott olvasókat könnyen félrevezetheti.
3. A bevezetőben a vdW kölcsönhatás leírása talán túl egyszerű. Picit részletesebb tárgyalást megérdemelt volna, mivel központi szerepe van a hidrosztatikus nyomás mérések esetében. Egy - két extra mondat még elfért volna az egyedi atomok közötti LJ fittelés és a páronkénti összegzésen túlmenően. Ugyanis jól ismert, hogy ez nem érvényes valódi rendszerekben, mint pl két atomsík közötti kölcsönhatás. Lásd pl.: Ambrosetti et al. Science 351, 1171–1176 (2016).
4. 64. oldal alja: Nem lehetséges, hogy a felületi szennyeződések miatt nem tapad a mintára a PC pecsét? A CHF₃/O₂ plazma ezeket ugyanúgy eltávolítja.



Kérdések:

1. Miért fontos BiTeI-ből egyréteget előállítani? A 4. fejezet bevezetőjéből nem teljesen világos nekem, hogy miért is lenne érdemes ezzel bajlódni. Végül a Rashba spin-pálya kölcsönhatás tárgyalása során bukkan fel a motiváció, az irodalomra hivatkozva. Ezután továbbra is valamelyest ködös marad a motiváció, hacsak el nem olvasom a hivatkozott cikkeket. Megérdemelt volna ez a téma egy jóval részletesebb motivációt. Ennek hiányában nem teljesen áll össze a kép. Pl egyrétegben a Rashba paraméter kb. a harmada a „bulk” értéknek. Ez jó nekünk, vagy nem? Többretegeket is be lehet integrálni heteroszerkezetekbe, mint pl BiTeBr esetében¹, ebben az esetben mi lenne az előnye az egyrétegnek? Ezek fontos kérdések, amelyekre érdemes választ adni expliciten kifejtve. Az is helyénvaló motiváció, hogy „csináljuk meg és majd kiderül”, de ezt érdemes leírni.
2. Mágneses térben csak elektron-elektron kölcsönhatások tudják felhasítani a völgy degenerációt? (28. oldal).
3. A hőmérsékleti kiszélesedés véleményem szerint alá van becsülve (45. oldal). A szerző a termikus kiszélesedést kT -nek, azaz kb 26 meV-nak saccolja szobahőmérsékleten. Ez egy nagy alábecslésnek tűnik. A hőmérsékleti kiszélesedést a Fermi függvény kiszélesedésére vezetjük vissza. Különböző mérési módszerek esetén, empirikusan megállapítható, hogy hasonlóan kb. $3kT$ körüli egy Dirac delta állapot energiabeli kiszélesedésének a félértékszélessége. Lásd pl. STM² és ARPES³ esetében. Töltéstranszport mérésekben nem vagyok annyira jártas, de 1D vezető csatornák elmosódása is akkor következik be, ha a szintek közötti energia felhasadás mértéke kb. $4kT$ -vel összemérhető (lásd pl. QPC mérés: Thomas Ihn könyv 180. oldal). Miért használ ilyen alacsony értéket a tárgyalásban?
4. Egyrétegű, illetve vastagabb BiTeI kristályok felületén figyelt-e meg IBiTe – TeBiI rétegződési hibákat? Lásd pl. [4, 5]. Az ilyen rétegződési hibák egyes mintákban nagyságrendileg 100 nm-ként követik egymást.
5. A 61. oldal alján levő szöveg és a 4.7-es ábra látszólag ellentmondásban van egymással. A szöveg azt állítja, hogy a számolt PDOS összhangban van a dI/dV méréssel. Az ábra alapján ez azonnal látható, hogy nem igaz. A PDOS a $-0.5 / 0.5$ eV tartományban növekedő értékkel rendelkezik, míg a dI/dV -0.5 -ről 0 V feszültségig csökken, majd újra növekedik 0.5 V-ig. Ez a moduláció jóval nagyobb, mint az ábrán látható hibahatár. Kérem ezt az ellentmondást feloldani.
6. Az arany hordozó hogyan befolyásolja az egyréteg BiTeI Rashba paraméterét?
7. A nyomáscellában levő nyomást hogyan kalibrálták? Honnan lehet tudni, hogy a cella belsejében, a mintánál valóban 1.8 GPa nyomás van? Van valamilyen minta, amelynek a viselkedését ismerjük ebben a hidrosztatikus nyomás tartományban? Mekkora a nyomás értékek hibája (pl a 7.7 ábrán)?
8. A kerozin miért dőpolja a grafént? Nem apoláros szénhidrogének alkotják? Ezeknek általában távol van a HOMO, LUMO szintjük a grafén Fermi nívótól, emiatt várhatóan elenyésző a töltéstranszfer.
9. A hidrosztatikus nyomásnak milyen hatása van az 1D élkontaktusokra?
10. A grafén mintában levő mechanikai deformáció miatt kialakuló pszeudomágneses tér milyen hatással lenne a WL/WAL mérésekre? Ez is egy jelentős effektus, ami megváltoztatja a töltéshordozók fázisát.

¹ Kovács-Krausz, Z. *et al.* Electrically Controlled Spin Injection from Giant Rashba Spin-Orbit Conductor BiTeBr. *Nano Lett.* **20**, 4782–4791 (2020)

² Morgenstern, M. Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of graphene on insulating substrates. *Phys. Status Solidi* **248**, 2423–2434 (2011)


³ Levy, G., Netke, W., Ludbrook, B. M., Veenstra, C. N. & Damascelli, A. Deconstruction of resolution effects in angle-resolved photoemission. *Phys. Rev. B* **90**, 045150 (2014)

⁴ Tournier-Colletta, C. *et al.* Atomic and electronic structure of a Rashba p-n junction at the BiTeI surface. *Phys. Rev. B* **89**, 085402 (2014)

⁵ Fiedler, S. *et al.* Defect and structural imperfection effects on the electronic properties of BiTeI surfaces. *New J. Phys.* **16**, 075013 (2014)



Összefoglalásként megállapítom, hogy a tézispontok jól megalapozottak és ezeket elfogadom új tudományos eredményként. A jelölt által elért új tudományos eredmények, valamint a disszertáció egyaránt megfelelnek a PhD fokozatszerzés általános követelményeinek. Javaslom a dolgozat nyilvános vitára bocsájtását. A doktori disszertációra a „summa cum laude” minősítést javaslom, amennyiben kielégítő válaszok érkeznek a kérdéseimre.



Nemes-Incze Péter

Energiatudományi Kutatóközpont
Tudományos munkatárs

2022. 07. 10

Budapest

