

# Van der Waals heterostruktúrák: a mintakészítéstől a hidrosztatikai nyomás alatti mérésekig

FÜLÖP Bálint

Összefoglaló

Értekezésemben összefoglalom a doktori képzés során véghezvitt munkámat, amely átfogóan ún. *van der Waals* (vdW) *heterostruktúrák* építését, ezeken alapuló nanoáramkörök tervezését és nanotechnológiai kialakítását, valamint az így kialakított nanoáramkörökön végzett transzport kísérleteket foglal magában a szokványos alacsony hőmérsékletű és légköri nyomású környezetben, illetve alacsony hőmérsékletű, de magas nyomású környezetben.

Egy elméleti bevezető után ismertetem azt a száraz rétegezési összeállítási (*dry stacking assembly*) eljárást, amely az általam vizsgált heterostruktúrák legelterjedtebben használt módszere. Bemutatom az általam a doktori munka kezdeti szakaszában a BME Nanoelectronika Laborban felépített transzfer mikroszkópot, amely az eljárás során használt központi berendezés. Ezután tárgyalom a mintát körülvevő nanoáramkör építésének részleteit, és a szokványos alacsony hőmérsékletű transzport méréseket. Mutatok példákat is arra, hogy a megépített berendezés sokoldalúan felhasználható a vdW heterostruktúrák készítésén felül egyéb nanoszerkezetekben is.

A következő fejezetben bemutatom, hogyan sikerült a BiTeI kristály egy réteg vastag (egyetlen hármásréteg) mintáját elsőként előállítanom. A poláris struktúrájának köszönhetően a BiTeI kristályban hatalmas Rasba-típusú spin-pálya kölcsönhatás jelenik meg, ami ígéretes anyaggá teszi spintronikai alkalmazásokra, viszont ugyanezen okból a kristály levékonyítása nehéz. Egy módosított, arany felületre történő mechanikai exfoliációs eljárással egyetlen hármásréteg vastag, 50–100  $\mu\text{m}$  vízszintes kiterjedésű minták állíthatók elő. Pásztázó szondás mikroszkópai módszerekkel bizonyítom, hogy a fedés egyetlen hármásrétegből áll és majdnem teljesen folytonos olyan területeken, ami optikai mikroszkóppal észlelhető.

Az elektromos kontaktusok kialakítása kiemelt fontosságú a transzport mérésekben. Az általános gyakorlat a vdW heterostruktúrák kontaktálására az egydimenziós kontaktusok használata a grafén réteg peremén. Dolgozatomban bemutatok egy olyan megoldást, amikor belső pontkontaktusok alkalmazásával a grafénréteg belsejét kontaktáljuk, annak peremétől távol. Ez az elrendezés a kontaktusok topológikus elválasztását eredményezi mind egymástól, mind a grafén peremétől, ami a kvantált Hall állapotban szigetelő viselkedést eredményez. Erős mágneses térben végzett kísérletekkel sikeresen bemutattam ezen szigetelés létrejöttét.

A vdW heteroszerkezetek vizsgálatának egy érdekes iránya a rétegek közti kölcsönhatás változtatása hidrosztatikai nyomás alkalmazásával, a mintakészítést követően. Azonban a szokványos nanoáramkörökön végzett transzport kísérletek nem kompatibilisek a nagy nyomású környezettel. Bemutatok egy új, dugattyús nyomáscellába illő mintatartó fejre épülő kísérleti módszert, amelynek segítségével ez a probléma áthidalható, ezzel lehetővé téve nanoáramkörök hidrosztatikai nyomás alatti mérését anélkül, hogy a mintával szemben speciális követelményeket támasztanánk. Kísérletek végezhetők legalább 2 GPa nyomásig és 8–12 elektromos vezeték használatával, amelyeket elektrosztatikus kisüléssel szemben ellenálló szálkikötéses módszerrel lehet a mintára kötni. Bemutatom, hogy egy hexagonális bór-nitrid (hBN) védőréteg alkalmazásával hatékonyan védhetjük meg a grafén réteget a nyomásközvetítő közegként használt kerozin káros kémiai hatásától.

A hidrosztatikai nyomás hatására a rétegek összébbnyomódását várjuk, ami megnöveli a rétegek közti kölcsönhatást. A dolgozatomban zárásaként az új nagy nyomású berendezéssel egy hBN/grafén/WSe<sub>2</sub> heterostruktúrára vizsgáltam a megnövekvő rétegek közti kölcsönhatás szerepét a transzport kísérletekben. Ismert, hogy a WSe<sub>2</sub>-ből származó spin-pálya kölcsönhatás átöröklődik a grafénbe az ilyen struktúrákban. Mágneses vezetőképesség méréseket végeztem négy beállított nyomásértéken légköri nyomásról indulva egészen 1.8 GPa-ig. Egyértelmű átmetetet találtam gyenge lokalizációs és gyenge antilokalizációs effektusok között a nyomás növelésével. Alapos adatelemzés és kiegészítő tervezérelt mérések segítségével a kiralitás és a spin-pálya effektusok hatását szétválasztottam. Megmutattam, hogy az észlelt jelalakváltozás a Rasba spin-pálya paraméter mintegy 70%-os megnövekedéséből származott, ami egybevág az elméleti várakozásokkal.