

# Grafén-alapú heteroszerkezetek vizsgálata nyomás alatt

Bálint SZENTPÉTERI

Témavezető: Péter MAKK

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2025

## Összefoglaló

A PhD értekezésemben a nyomás hatását vizsgáltam grafén-alapú heteroszerkezetekre elektromos transzport mérések segítségével. Külön figyelmet fordítottam a heteroszerkezetek elektronikus és transzport tulajdonságainak vizsgálatára, mint például, hogy hogyan változik a sávszerkezet, a spin-pálya kölcsönhatás, valamint egyes szórési mechanizmusok erőssége hidrosztatikus nyomás alatt.

Megvizsgáltam egy mágikus szög körüli csavart dupla kétrétegű grafén elektronikus tulajdonságait. Mind termikus aktiváció, mind feszültség bias alatti mérésekből meghatároztam az egyrészeccs moiré tiltott sávokat, melyek alapján azt találtam, hogy nyomás növelésével csökkentek és teljesen be is záródtak ezek a tiltott sávok. Hogy ezt elméletileg igazoljuk, a Bistritzer-MacDonald modell segítségével kiszámoltam a moiré tiltott sávok nyomásfüggését, amely kvalitatív egyezést mutatott a kísérletekkel. Magnetotranszport mérésekben a Brown-Zak oszcillációk elemzésével igazoltam, hogy a csavarszög nem függ a nyomástól. Továbbá megfigyeltem a korrelációs effektusok csökkenésének jeleit is: feles betöltésnél a korrelációs gap bezáródását figyeltem meg nyomás hatására, valamint a töltésemlegességi pontban a tiltott sáv szokatlan mágneses térfüggést mutatott.

A következő részben  $\text{WSe}_2$  és kétrétegű grafén-alapú heteroszerkezetekben a közelségi (*proximity*) effektussal indukált spin-pálya kölcsönhatást vizsgáltam hidrosztatikus nyomás alatt. A heteroszerkezeteket alacsony hőmérsékletű magnetotranszport mérésekkel tanulmányoztam. Shubnikov-de Haas oszcillációkban két Fermi-felületet figyeltem meg a spin-pálya kölcsönhatás (SOC) következtében spin felhasadt sávok miatt. Kiszámoltam alacsony energiákon a sávszerkezet, melyből pedig numerikusan kiszámoltam véges SOC jelenlétében a Fermi-felületeket. A számolásokból azt találtam, hogy nagy töltéssűrűségeknél a sávok felhasadásáért főként a Rashba-típusú SOC felel. A Rashba-típusú SOC meghatározásához illesztettem a modellt a kísérletekre és azt találtam, hogy a SOC erőssége nőtt a nyomás hatására. Az Ising-típusú SOC erősségét is meghatároztam kvantum Hall mérések segítségével. Ehhez mértem a Landau szintek keresztezési pontjait különböző mágneses tereknél. Kiszámoltam numerikusan a Landau szintek keresztezési pontjait a SOC függvényében, amit a  $\nu = \pm 3$  Landau nívók betöltéseinek mért keresztezési pontok pozícióira illesztettem meghatározva az Ising-típusú SOC erősségét. Azt találtam, hogy a Rashba-típusúhoz hasonlóan nőtt a nyomás alatt.

Végül, nagy mobilitású, hBN rétegek közé helyezett egyrétegű grafénból készült eszközök transzport tulajdonságait vizsgáltam. Térvezérlésű mérésekben megfigyeltem, hogy a fő szórési mechanizmust, ami a grafén alacsony hőmérsékletű ellenállásáért felelős, a hosszú hatótávú szórások okozzák, és ez a mechanizmus dominál a nyomás alatt is. Ezt Shubnikov-de Haas oszcillációs mérésekben szintén megfigyeltem. Megfigyeltem, hogy a nyomás hatására mind a rövid- és mind a hosszútávú szórási ráták megnőnek csökkentve a minta mobilitását. Gyenge-lokalizációs mérések segítségével megfigyeltem, hogy a fodrozódás (*ripples*) térfogata megnő a nyomás hatására, ami konzisztens a megnőtt szórási rátákkal a nyomás alatt. Továbbá megfigyeltem gyenge-lokalizációs mérésekben, hogy a rövidtávú szórás feltehetően főként a minta szélein történő szóródás okozza, melynek nyomásfüggése elhanyagolható. Mágneses fókuszálás segítségével meghatároztam, hogy a szórési mechanizmust nem változtatja meg a nyomás, és elhanyagolható szerepe van a elektron-elektron és az elektron-fonon csatolás együttes szerepére a mágneses fókuszálás jelének eltűnésében a hőmérséklet növelésével. Hőmérsékletfüggő mérésekben megfigyeltem, hogy az elektron-akusztikus fonon csatolásnak elhanyagolható a nyomásfüggése, és megmutattam, hogy a hordozó keltette felületi fonon-elektron csatolás erőssége nő a nyomás hatására.

A kísérleti eredményei a tézisének betekintést nyújtanak abba, hogy milyen fontos a rétegek közötti csatolás van der Waals anyagokban valamint, hogy ezek hangolhatók nyomással. A közeli jövőben úgy gondolom, hogy sok tanulmány fog születni a nyomás hatásáról mindenféle heteroszerkezeten különösképpen a csavart szerkezeteken.