

## Vélemény Bojtor András „A fotoindukált töltéshordozók komplex fizikája újszerű anyagokban” című doktori értekezéséről

A jelölt dolgozatában különböző összetételű és kristályossági fokú fémhalogenid-perovszkit napelemalapanyagokban vizsgálta a töltéshordozók rekombinációs dinamikájának hőmérsékletfüggését. Ezekből a vizsgálatokból vont le következtetéseket a rekombináció során végbemenő folyamatokra. Továbbá a széles tiltott sávú anyagok / félvezetők karakterizációjakor gondot okozó perzisztens fotovezetést vizsgálta, mérési eljárást dolgozott ki reprodukálható mérések végzésére, amelyek segítségével különböző módszerekkel előállított, perzisztens fotovezetést mutató minták is összehasonlíthatókká válnak. A témaválasztás időszerű: ahogy a jelölt is fogalmaz, az emberiség energiaéhsége csillapíthatatlan, szükséges az újszerű napelemanyagok kifejlesztése, működésük megértése – hasonló módon a félvezetőipar folyamatos fejlődése is arra kényszeríti a terület szereplőit, hogy olyan anyagokat használjanak, amelyek vizsgálata az eddigi technológiával csak részben végezhető el. A jelölt kutatásai e két intenzíven kutatott tudományterület ismereteinek bővüléséhez járulnak hozzá.

A jelölt munkáját 120 oldalas doktori értekezésben foglalja össze. A mű első egynegyedét a motiváció után a kutatások elméleti hátterének bemutatása teszi ki, ezt követi mintegy 10 oldalon az alkalmazott kísérleti technikák és minták tárgyalása. A következő három fejezetben, körülbelül 50 oldalon az eredményeit mutatja be a jelölt. Az eredményeket az összefoglaló és tézispontok követik, majd a saját publikációk, a dolgozatban használt rövidítések felsorolása, illetve a 200 elemet tartalmazó hivatkozáslista következik. A dolgozat az ábrák felsorolásával zárul. A jelölt tehát igyekezett a PhD értekezések klasszikus szerkezetét követni, bár egyes saját eredményeket bemutató fejezetek tartalmazznak olyan információkat, amelyek korábban már bemutatásra kerültek: pl. 4.1-es fejezet mintakészítésre vonatkozó adatok megismétlése, vagy az adaptív simítási eljárás ismételt leírása az 5. fejezetben anélkül, hogy hivatkozna a jelölt a 3.1.1 fejezetre.

A disszertáció nyelve angol, szaknyelvi szempontból megfelelő. A dolgozat ennek ellenére nehezen olvasható, gyakran kellett az eredeti publikációt segítségül hívnom a bemutatott eredmények és elméletek megértéséhez. Ennek okát pontosan nem sikerült megfejtennem, de több pontatlanság, figyelmetlenség nekem, mint a területen kevésbé jártas olvasónak nehezítették az olvasást. Ezekből párat összegyűjtve:

- a 4.4-es és az 5.6.a ábra esetén nem egyértelmű a szövegből, hogy a csökkenő vagy növekvő hőmérséklet / reflektált mikrohullámú jel szerint írja le a grafikonokon látható tendenciákat a jelölt
- a 4.2-es ábrán megjelenő  $\Delta G$  mennyiség definíciója csak a következő ábra értelmezésében jelenik meg
- a 2.11-es képlet és a 2.41-es formula megegyezik
- a perzisztens fotovezetés általános definíciója hiányzik (az oxigén vakanciákhoz köthető magyarázata szerepel csak a dolgozatban)
- a 2.4-es fejezet címében megjelenő multiband kifejezés, ami soha többet nem fordul elő a szövegben
- a koplánáris hullámvezetőt bemutató 3.1.2-es, és az üregeken alapuló mérési elrendezést bemutató 3.1.3-as alfejezetek sorrendje pont fordított, mint ahogy később az eredményeknél a mérések megjelennek – de ehhez kötődően említhetjük, hogy a koplánáris hullámvezetők definíciója/leírása is igen későn, csak a 3.1.2-es fejezetben jelenik meg, miközben a 2.3.1-es fejezetben már igencsak sokat olvashatunk róluk

Az ábráról elmondható, hogy jól szerkesztettek, szövegbeli hivatkozást tekintve hibát csak az 5.4-es ábránál találtam, amelyet a szövegben rosszul hivatkozta (nem hivatkozta) a jelölt. Az értekezés kereken 200 hivatkozást tartalmaz, amelyek a témához kapcsolódó, abban meghatározó tudományos közlemények. A felhasznált, meghivatkozott szakirodalom mennyisége megfelelő, alátámasztja a jelölt felkészültségét, jártasságát kutatási területének szakirodalmában.

A jelölt eredményeit 5 tézispontban foglalta össze, amelyek alapját 4 publikáció képezi, amelyeknek első szerzője a jelölt. A dolgozat benyújtásakor az egyik tudományos közlemény még előkészítés alatt volt, de az eltelt időben már ez a publikáció is elfogadásra került, megjelent (<https://doi.org/10.3390/nano14211742>) csak némileg eltérő címmel, de a vonatkozó fejezet és a megjelent publikáció ábra anyagát összevetve azonos tartalommal. A tézisek alapját képező 4 közlemény mellett a jelölt további 6 publikáció társszerzője, így a publikációkra vonatkozó feltételeknek eleget tesz.

Kérdéseim, megjegyzéseim:

1) általános megjegyzés:

- Mi a különbség a TRMCD - transient microwave photoconductivity decay és a  $\mu$ PCD - microwave photoconductivity decay mérés technikák között? Amennyiben ugyanazt jelölik, szerencsés lett volna csak az egyiket használni az értekezésben.

2) 4-es fejezet:

- A 4.1-es alfejezetben két hőmérsékleti tartomány is megjelenik, mint vizsgálati tartomány: 4-270K, illetve 4-300K – melyiket kell valós tartománynak elfogadnunk?
- Miért tetszőleges egységben vannak a  $\Delta G$  adatok megadva, ha azok egy feszültség adatsor illesztéséből származnak és az exponens előtti amplitúdót jelentik?
- A 4.3-as ábrán a 10K-es hőmérséklethez tartozó görbén egy határozott hullámszám figyelhető meg. Mi állhat ennek a hátterében?
- A 4.4-es ábrán a töltéshordozó élettartamban pontosan ott figyelhető meg egy jelentős csökkenés, ahol a  $\Delta G$  amplitúdóban kiugrás van. Ez egy valós csökkenés, vagy esetleg valamiféle korreláció az illesztési paraméterek között? Amennyiben valódi változás, mi állhat a hátterében?
- A 4.1-es táblázat alatti második bekezdésben (A small drop...) azt írja a jelölt, hogy egy kis esés figyelhető meg a klór és a bróm tartalmú minták esetén az ortorombos – tetragonális fázisátmenetnél – de az a mondatból nem derül ki, hogy melyik mennyiség esetén kell keresnünk ezt a változást. A vonatkozó cikk alapján az élettartam görbéket kell vizsgálnunk, bár a publikáció alapján a bróm és a jód tartalmú minták esetén van ilyen kis esés. Kérem, pontosítsa, hogy melyik görbék esetén kell az esést keresnünk, a hőmérséklet növelés vagy csökkenése esetén beszélhetünk esésről és kérem, tisztázza a vonatkozó publikációval való ellentmondást.
- Vizsgálta-e a jelölt a 4.5-ös fejezetben megjelenő különböző rendezettségű minták abszorpciós / szórási tulajdonságait a gerjesztési hullámhossza? A minták fényképe alapján a túszerű minta vékonyabb, mint a másik két minta, ugyanakkor matt felületű, így várhatóan mások az optikai tulajdonságai, más mélységig jut el benne a gerjesztő fény, más az elnyelt fényteljesítmény. Okozhatja-e ez a túszerű minta esetén megfigyelt kisebb fotovezetést?
- Vizsgálta-e a jelölt valamilyen módszerrel a minták rendezettségét / kristályossági fokát? A bróm tartalmú minták esetén még van az olvasónak valamilyen elképzelése a fényképek alapján a szerkezet rendezettségére vonatkozóan, de a jód tartalmú minták esetén – fénykép hiányában – még csak a külső megjelenés alapján sem tudunk következtetni.

3) 5-ös fejezet:

- Az 5.3-as ábrán bemutatott fotoluminszcencia lecsengési görbe illesztéséhez kétkomponensű exponenciális függvényt használt a jelölt. Véleménye szerint milyen fizikai folyamatok köthetők a két szignifikánsan eltérő időállandójú lecsengéshez (3ns vs 50ns)?
- Mi a kapcsolat az 5.2-es ábrán látható adatok és az 5.5-ös ábrán látható adatok között? Az 5.2-es ábrán a ~20K-hez tartozó görbe maximuma 1.7mV, az 5.5-ös ábrán a 20K-hez tartozó görbe - a 100K-es görbe általi takarás ellenére jól megállapítható módon – 20-30 mV feletti értékeket is elér (ezt megerősíti az 5.6-os ábra is). A dolgozat szövege és az 5.5-ös ábrán látható fénykép alapján mindkét esetben kb. 2mm x 2mm-es kristályon történt a mérés. Ehhez kötődően: az 5.4-es ábráról leolvasható, hogy a minta jelenléte 10mV-os jelszint eltolódást jelent, és a teljes hőmérséklet tartományon pár mV-nyi jelszint eltérést okoz a minta hőmérsékletének változása. Ezt az 5.2-es ábra adataival összevetve nem győzi meg az olvasót arról, hogy nem a hőmérséklet hatása jelenik meg a hosszú élettartam értékekben – viszont ha az 5.5-ös ábra adataival vetjük a görbéket össze, akkor egyből kizárhatjuk, hogy a hosszú élettartam a minta hőmérsékletének változásától függ. Kérem, tisztázza a helyzetet.
- Még mindig az 5.4-es ábránál maradva: a rendszer minta nélküli reflexióját vizsgálva kb. 250K környékén egy éles minimumot látunk. Ez valódi beesés, vagy mérési zaj/pontatlanság - mi állhat a minimum hátterében?
- Az 5.5-ös ábrán látható, a vonatkozó publikációban pedig még feltűnőbb, hogy a 200K-hez tartozó lecsengési görbe 4 ms-ig eltart, de a görbék alapján számolt élettartam adatok csak 1 ms-ig vannak bemutatva. Laikusként a lecsengési görbék jel/zaj viszonya 2 ms-ig még nem tűnik olyan rossznak, hogy ne próbálkoznék meg az élettartam adatok kiszámolásával/bemutatásával. (Hasonló figyelhető meg a 294 K-hez tartozó adatok esetén is, bár ott tényleg hamar a zajba vész a lecsengési görbe.) Milyen élettartamok adódnak a 200 K-es mérés esetén hosszabb mérési időknél? Befolyásolná-e ez az 5.6.a ábrán látható dinamika görbéket, illetve a nagy élettartammal jellemezhető plató kialakulását?

4) 6-os fejezet:

- Mivel magyarázza, hogy a megvilágító teljesítmény szakaszos emelésekor a 6.2-es ábra alapján a mozgékonyosság nem monoton módon növekszik, hanem a fényteltjesítmény növelését követően csak kisebb visszaesés után kezd el ismét növekedni?
- Milyen egyéb olyan módszereket használ a félvezető ipar – ha vannak egyáltalán ilyenek -, amelyek segítségével a perzisztens fotovezetést mutató minták transzport paramétereinek mérése valósítható meg olyan módon, hogy a különböző mintákon végzett mérési eredmények összehasonlíthatóak? Ezek rövid bemutatása, felsorolása megerősítette volna az utolsó tézis pont újdonságtartalmát.

**Összegzőképpen:** A bemutatott tudományos eredmények szintje teljes mértékben megfelel a PhD értekezések feltételeinek. Az eredmények jól publikáltak, a szakma által elismert nemzetközi folyóiratokban jelentek meg, értékes hozzájárulást jelentenek a választott kutatási területhez. A téziseket a jelölt új tudományos eredményeiként elfogadom, a dolgozat nyilvános vitára bocsátását javaslom, sikeres védelem esetén a doktori fokozat odaítélését támogatom.

Szeged, 2024. 11. 25.



Budai Judit

tudományos főmunkatárs  
ELI-ALPS Kutatóintézet, ELI-HU Nonprofit Kft.

