

BÍRÁLAT

Krisztián Dávid „Development of recombination lifetime measurement methods for photovoltaic applications” c. PhD értekezéséhez

Bevezetés

A doktori disszertáció a rekombinációs élettartam meghatározására szolgáló új mérési módszerek kidolgozását mutatja be. A fejlesztett rendszerek és technikák félvezető alapanyagok — elsősorban egykristályos Si öntvények és szeletek — gyors, érintés- és roncsolásmentes minősítését teszik lehetővé, az általában ismert módszerekhez képest nagyobb pontosság mellett.

A disszertáció angol nyelvű, hivatkozások nélküli tartalmi része közel 100 oldal terjedelmű. A dolgozat jól szerkesztett, igényes nyelvezetű munka, amely csak elvétve tartalmaz elírásokat vagy félreérthető megfogalmazásokat. A szövegbe illesztett ábrák esztétikusan kivitelezettek, és hatékonyan támogatják a mondanivaló megértését. A dolgozatot összesen 211, szakterületileg releváns hivatkozás egészíti ki. A disszertáció egy rövid bevezetést követően (1. fejezet) szakkönyvi alapossggal, jól követhető módon ismerteti a fotovoltaiikus alkalmazások szempontjából lényeges napelem típusokat és töltéshordozó-rekombinációs mechanizmusokat (2. fejezet), valamint a kutatási területen alkalmazott mérési módszereket (3. fejezet). Az új tudományos eredmények az ezt követő három fejezetben kerülnek bemutatásra: a BME-n fejlesztett mérőrendszer kalibrálása (4. fejezet), vastag szilícium minták rekombinációs dinamikájának vizsgálata (5. fejezet), valamint három ismert kísérleti technika integrálása egyetlen eljárássá (6. fejezet). A legfontosabb eredményeket a szerző öt tézispontban foglalja össze (7. fejezet).

A PhD témaválasztás több szempontból is szerencsés. Egyrészt valós ipari igény mutatkozik a folyamatosan változó szilíciumalapú napelemanyagok minősítésének gyorsabb és megbízhatóbb módszereire; másrészt az ehhez kapcsolódó technikák fejlesztése mélyreható félvezetőfizikai és méréstechnikai ismereteket kíván. Ezeknek köszönhetően a munka egy kiváló és követendő példája az egyetem és az ipar közötti Kooperatív Doktori Programnak. A dolgozat számos, az ipari alkalmazás szempontjából is kiemelten jelentős új eredményt tartalmaz, amelyek egy része egyelőre nem került publikálásra. Ezek közül külön említést érdemel az 5.3 fejezetben ismertetett iterációs eljárás, amelyet 1D és 3D szimulációs módszerek is támogatnak. A jelölt által kidolgozott technika lehetővé teszi a napelemgyártásra szánt szilícium öntvények gyors és nagy pontosságú, töltéshordozó-élettartam alapú minősítését.

Kérdések és észrevételek

1. A szerző a 2.2.1 pontban bevezeti az elektronok és lyukak közötti Coulomb kölcsönhatást is figyelembe vevő ambipoláris mozgékonyaság fogalmát. A későbbiekben — pl. az injektált töltéshordozó-koncentráció vagy vezetőképesség meghatározásakor (3.2 és 5.14 egyenletek) — viszont e helyett szimpla összegzést használ ($\mu_{sum} = \mu_n + \mu_p$). Mennyire jogos vagy tudatos az elektromos tér okozta sodródási (drift) effektus mellőzése a tárgyalásból?

2. A 64. oldalon $\tau_b=100\ \mu\text{s}$ és $\tau_b=10\ \text{ms}$ értékek szerepelnek, szemben az 5.4d ábra vízszintes tengelyén szereplő τ_{SRH} mennyiséggel. Van-e jelentősége ennek a különbségnek?
3. A 15. oldalon szereplő elektron/lyuk mozgékonyság értékek hányadosa (μ_e/μ_h) közel 3 (2,98). Nem mond ez ellent a 90. oldalon szereplő $f=2,25$ -ös értéknek? Mi okozza az eltérést?
4. A 6.3.2 alpontban nem teljesen világos, hogy miért a 10-20%-os G_p/G_{ss} arány adódott optimálisnak? Ott a „leglaposabb” a 6.10 ábrán látható trendvonal? Vagy másban keresendő az ok?
5. A 4.6. ábrán összesen 7-7 (p- és n-típus) vastagsághoz rendelt pont szerepel, míg a 3.9. ábra 8-8 különböző vastagságot mutat. Történt-e a legvékonyabb mintákon is töltéshordozó élettartam mérés? Ha igen, akkor mennyire illeszkedtek azok a trendvonalra? Ezekre is igaz, hogy a felületi rekombinációs élettartam kifejezésben (2.32 egyenlet) a második tag dominál?
6. Az örvényáramú érzékelő detektálási mélysége a körfrekvencia gyökével fordítottan arányos (3.1 egyenlet). Mekkora volt az alkalmazott ω és milyen korlátja van a csökkentésnek?
7. A 4.5b ábrán a mért élettartam görbe a Klasseen modellel összhangban minimumot vesz fel az 10^{15} - $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ tartományban. Mi okozza mégis a két görbe közötti eltérést, valamint a későbbi fejezetekben ismertetett módszerekhez képesti nagyobb zajt?
8. Az 4.5 ábrán szereplő görbe alakja valóban közelebb áll egy negatív kitevőjű exponenciális függvényhez, mint a korábbi feszültségjel-lecsengés. Ennek szemléltetésére azonban alkalmasabb lenne a szemilogaritmikus ábrázolás. Hogyan mutatnak úgy a mérési pontok?
9. Honnan származnak a 66. és 69. oldalon szereplő felületi rekombinációs sebesség értékek (10^2 és $10^6\ \text{cm/s}$)?
10. A kutatás során vizsgált minták jellemzően napelem alapanyagok. A bemutatott módszerek alkalmazhatók-e a chipgyártást kiszolgáló elektronikai minőségű szeletekre? Mennyiben különböznek az elvárások és lehetőségek ebben az esetben?
11. Véleményem szerint a disszertáció egyik legértékesebb eredményét foglalja össze a 3. tézispont, melyhez a szerző egy előkészületben lévő kéziratot említ. Milyen stádiumban van ennek megírása vagy bírálati eljárása?
12. Inkább kíváncsiság, mint szakmai kritika: Az örvényáramú detektálás pontosítására a jelölt bevezeti a mélységi érzékenységi függvényt (5.13), mely a tárgyalás egyik kulcseleme. Ehhez a jelölt egy elsőszerzős publikációt is rendel [211]. Mi az oka, hogy ez végül nem kapcsolódott egyik tézispontoz sem?

Apróbb szakmai, formai és nyelvi észrevételek:

- Hasznos lett volna egy összefoglaló táblázat a disszertációban szereplő rövidítésekről és fizikai mennyiségekről
- A „smart laser control” kifejezés nem szerencsés egy tudományos dolgozatban
- 3.10c ábra: a szöveg alapján inkább n-p-n vagy p-n-p adalékolás fentről lefelé, p-p-p helyett
- Fig. 5.9 képaláírás: 7.5 mm, 7.5 cm helyett
- 68. old.: (Equation 5.9.)
- 61. old.: 3B laser class ($2 \cdot 10^{19} \dots$)
- Fig. 5.1 képaláírás: decay is due to the....

- 70. old: „see Fig 5.4c” helyett szerintem „5.4b”
- A munka motivációjának és hátterének megismeréséhez nagyon hasznos az egyes fejezek elején szereplő vastagbetűvel szedett bekezdés

Tézispontok

A felsorolt öt tézispont világosan megfogalmazott, és jól összegzi a dolgozat legfontosabb tudományos eredményeit. Kivételt képez a második tézispont, amelyet célszerűbb lett volna tömörebben, vagy két külön pontban megfogalmazni. A tézispontokhoz két elsőszerzős folyóiratcikk és egy elsőszerzős konferenciakiadványban megjelent publikáció kapcsolódik. Bár kisebb stilisztikai és szerkezeti megjegyzések felmerültek, a tézispontok egyértelműen a jelölt önálló munkáján alapulnak, és új tudományos eredményeket fogalmaznak meg. A jelölt munkája meggyőző példája a kutatási és ipari célkitűzések szinergiájának.

Összefoglalás

A fentiekben megfogalmazott észrevételek nem csökkentik a dolgozat tudományos értékét. Az értekezés színvonala kiemelkedő; az új eredmények korszerűek, és az ipari alkalmazhatóság szempontjából is jelentősek. A disszertációt alkalmasnak tartom a nyilvános vitára, és meggyőző védelem esetén a PhD fokozat odaítélésére.

Budapest, 2025. május 28.



.....
Volk János, PhD
tudományos főmunkatárs
HUN-REN EK-MFA