

Doktori bírálatra adott válaszok

Szeretném megköszönni Dr. Volk Jánosnak, hogy elvállalta a PhD dolgozatom bírálatát. A bírálatot a szűk határidő ellenére időben megkaptam, így lehetővé vált a nyilvános védés megtartása 2025. 06. 19-én. A feltett kérdéseket és észrevételeket jogosnak tartom, ezekre legjobb tudásom szerint válaszoltam. A kérdések nagyban hozzájárultak számomra is több kérdés mélyebb megértéséhez és ezek bemutatása érzésem szerint javítja a dolgozat bemutatásának színvonalát is. Köszönöm továbbá, hogy a bíráló javasolja a PhD fokozat megítélését sikeres védés esetén.

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 ($\mu_{\text{sum}} = \mu_n + \mu_p$). Mennyire jogos vagy tudatos az elektromos tér okozta sodródási (drift) effektus mellőzése a tárgyalásból?

Köszönöm a kérdést. Valóban fontos, hogy egyértelműen megkülönböztessük a mozgékonyaságok különböző összevonásait. A hivatkozott esetekben a gerjesztett töltéshordozók által okozott lokális vezetőképesség-növekmény kiszámításához használtam a mozgékonyaság adatot. Ekkor $\Delta\sigma(x, t) = e \cdot \Delta n(x, t) \cdot \mu_e(x, t) + e \cdot \Delta p(x, t) \cdot \mu_h(x, t) = e \cdot \Delta n(x, t) \cdot \mu_{\text{sum}}(x, t)$, kihasználva az elektron és lyuk koncentrációk egyenlőségét. Ez tehát a lokálisan mérhető fizikai vezetőképessége a mintának.

Ezzel ellentétben, amikor magát a $\Delta n(x, t)$ térbeli eloszlást határozom meg, akkor a drift jelenséget mindenképpen figyelembe kell venni. Ennek a kézenfekvő módja az ambipoláris mozgékonyaság (és diffúziós együttható) bevezetése.

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?

Köszönöm az észrevételt, valóban τ_{SRH} lett volna a helyes jelölésmód, hiszen a tömbi élettartamban az intrinsic rekombinációnak is fontos szerepe lehet. A vizsgált szimuláció esetében:

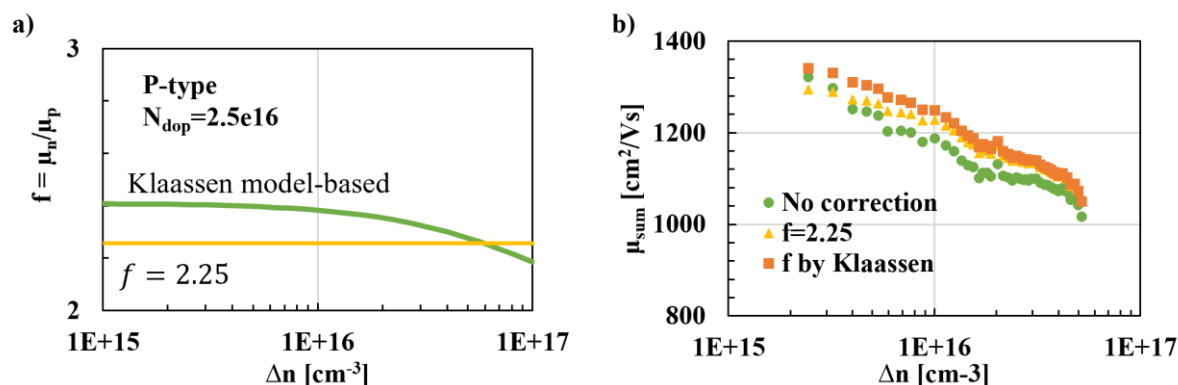
$$\frac{1}{\tau_b(\Delta n, N_{\text{dop}})} = \frac{1}{\tau_{\text{SRH}}} + \frac{1}{\tau_{\text{intr}}(\Delta n, N_{\text{dop}})}$$

3. A 15. oldalon szereplő elektron/lyuk mozgékonyaság 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?

Jogos a bírálói észrevétel, a két érték között valóban jelentős különbség van. A Drude-modell értelmében a mozgékonyaság a momentum relaxációs időtől és az effektív tömegtől függ: $\mu = \frac{e\tau_m}{m^*}$.

Az $f=2.25$ -ös érték a lyukak és elektronok effektív tömegének arányából adódik, míg a Klaassen-modellben figyelembe vannak véve a különböző szórási folyamatok is. Az előbbit a 6. fejezetben azért használtam, hogy prezentáljam egy más mozgékonyaság-

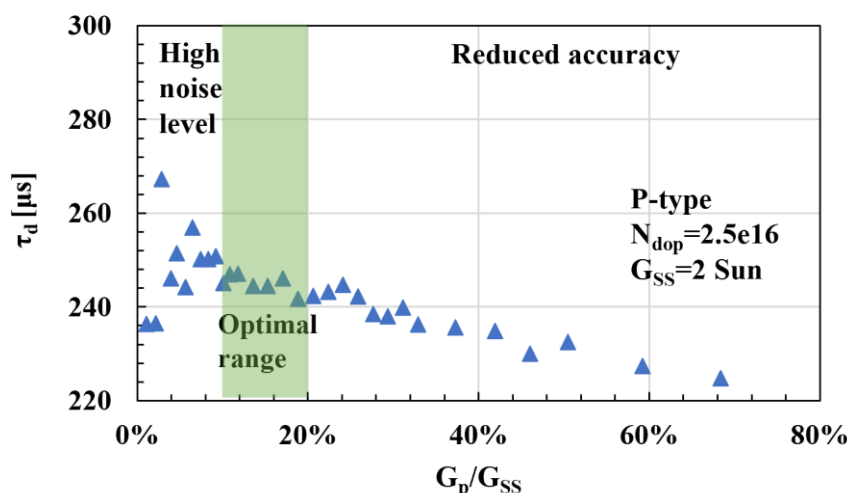
modelltől teljes egészében független kiértékelési módszert - mivel kívánt lenne a mozgékonyág injekció változásának tisztán kísérleti meghatározása - és annak hibáját.



A dolgozat 6.11-es ábrája. Az a) alábrán az elektron és lyuk mozgékonyágainak arányát mutatom a két alkalmazott módon. A b) ábrán pedig az eredményként meghatározott mozgékonyágösszeg látható a különböző arányokkal számított korrekciók után.

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 pontok trendvonal? Vagy másban keresendő az ok?

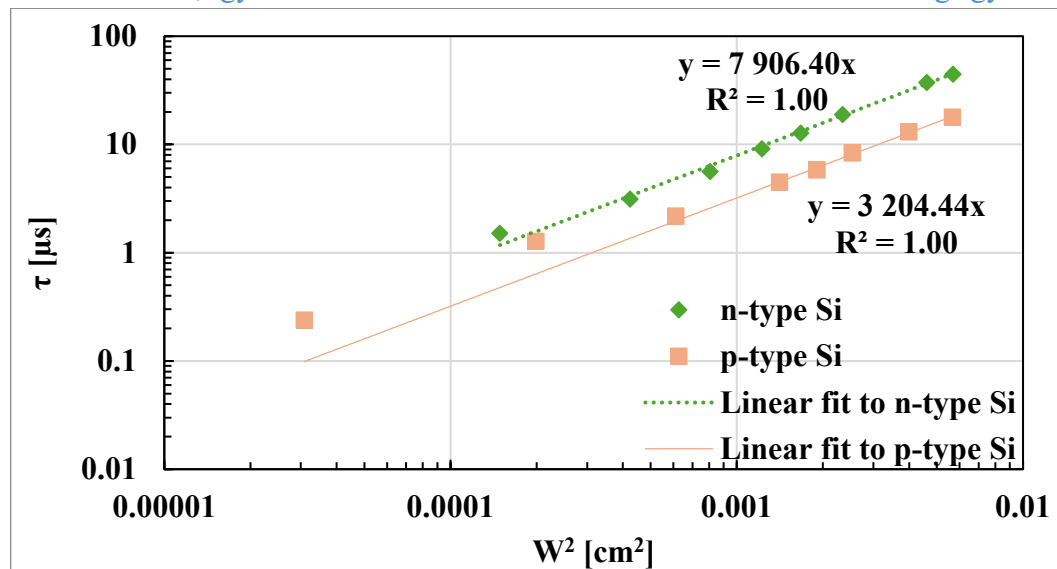
Két dolgot mérlegeltem az optimális arány megállapításához. A legfontosabb, hogy valóban „lapos” legyen a trendvonal, azaz a pulzusteljesítménytől független legyen a mért differenciális élettartam. Ekkor teljesül a kis gerjesztésre vonatkozó megszorítás. Látható, hogy 25%-os arány fölött egyértelműen csökken a mért élettartam. Másrészt a gerjesztés kellőképpen nagy kell legyen ahhoz, hogy a jel-zaj arány pontos τ_d meghatározást tegyen lehetővé. Látható, hogy 8%-os arány alatt a mért érték nagy szórást mutat. Mindezeket figyelembe véve a 10-20%-os tartományt határoztam meg optimálisként.



A dolgozat 6.10-es ábráján a mért differenciális élettartam látható különböző gerjesztő pulzusteljesítmények mellett.

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?

Jogos a bírálói észrevétel, köszönöm szépen. A legvékonyabb mintán is történt élettartammérés, amelynek eredménye jelentősen nem tér el a trendvonalától. A kis mértékű eltérést log-log skálán szemléltem alább. Ezen 100 μm körüli, vagy annál vékonyabb minták már nem tekinthetők síknak, hiszen oldalról is jelentősen fogytak a marás következtében, így felületük lekerekedett. Elsősorban ez okozhatta a megfigyelt eltérést.



A dolgozat 4.6-os ábrája kiegészítve a legvékonyabb mintákon mért eredménnyel, amelyek kissé eltérnek a trendvonalától.

Azt feltételezzük, hogy a felületi rekombinációs sebesség értéke a 10^5 - 10^6 cm/s-os tartományban található ezen mart felületnél. Jogos észrevétel, hogy az 50-100 μm tartományban már egy nagyságrenden belülre kerül a felületi rekombinációs élettartamot meghatározó két tag, így ez is hozzájárulhat a vékony mintán mért eredmény pontatlanságához.

- Az örvényáramú érzékelő detektálási mélysége a körfrekvencia gyökével fordítottan arányos (3.1 egyenlet). Mekkora volt az alkalmazott ω és milyen korlátja van a csökkentésnek?

Az alkalmazott körfrekvencia a különböző mérések során 25 és 50 MHz között változott a mérőkészülék szériájától függően. A fejlesztés során csökkentettük a frekvenciát a nagyobb detektálási mélység elérése céljából. Azonban ügyelni kellett arra, hogy a mérőkészülék alkalmas maradjon a néhány μs -os élettartam mérésére is, azaz a rezgőkör elég gyorsan reagáljon a vezetőképesség változására. Emiatt nem lehet tetszőlegesen csökkenteni a frekvenciát.

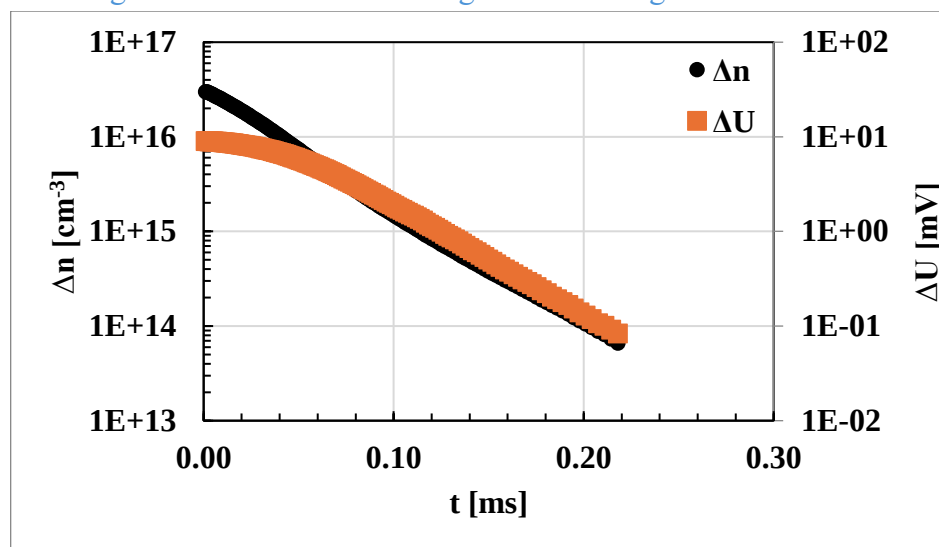
- A 4.5b ábrán a mért élettartam görbe a Klasseen modellel összhangban minimumot vesz fel az 10^{15} - 10^{16} cm⁻³ tartományban. Mi okozza mégis a két görbe közötti eltérést, valamint a későbbi fejezetekben ismertetett módszerekhez képesti nagyobb zajt?

A két görbe közötti eltéréshez két jelenség járulhat hozzá. Az első ilyen a kalibráció tökéletlensége. A mérési elrendezésünkben két különböző lézert alkalmaztam a modulált és a pulzusüzemű méréshez, ezáltal a megvilágított folt pozíciója és mérete kis mértékben eltérhetett minden igyekezet ellenére. Ez a pontatlanság javítható, amennyiben egy lézerrel, vagy egyesített optikai szálba csatolt lézerekkel valósítanánk meg a mérést.

A pontatlanság másik valószínűsíthető oka, hogy magas felületi rekombinációs sebesség mellett a minta keresztmetszetében a töltéshordozó koncentráció inhomogén, és időben változik. Ezáltal a kalibrációval meghatározott koncentráció egy térbeli átlagos érték, és a felülettől különböző mélységekben adott pillanatban is különbözik rekombinációs élettartam.

A megfigyelt zaj elsősorban a numerikus deriválás paramétereitől függ.

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? Köszönöm az észrevételt, valóban sokkal szemléletesebben látszódik a kalibráció hatása a szemilogaritmikus skálán. Főként igaz ez a lecsengés kezdeti szakaszára.



Az ábrán a dolgozat 4.2a és 4.5a ábrája látható egyesítve szemilogaritmikus skálán.

9. Honnan származnak a 66. és 69. oldalon szereplő felületi rekombinációs sebesség értékek (10^2 és 10^6 cm/s)?

A kémiai passzíválással jellemzően tükörsimára polírozott felületű szilícium szeleteket kezelünk. Ebben az esetben a felületi rekombinációs sebesség (SRV) értéke 10 cm/s alatti is lehet ([https://doi.org/10.1016/0169-4332\(93\)90112-Q](https://doi.org/10.1016/0169-4332(93)90112-Q)). A mi vizsgálatunk során egy vágott, polírozatlan felületet kezeltünk, ami vélhetően rosszabb passzíválási minőséget eredményez. A töltésdinamikai szimulációt különböző felületi rekombinációs sebességekkel lefuttatva ez a feltevés beigazolódott, hiszen a legjobb egyezést nagyjából 100 cm/s mellett adódott.

A vágás utáni felület esetében a felületi rekombinációs sebesség a 10^5 - 10^6 cm/s tartományba esik (<https://doi.org/10.1063/1.337938>), köszönhetően a nagy számú felületi hibahelynek. Ezt csak részlegesen tudja ellensúlyozni a natív oxid növekedése, amellyel az SRV 10^4 cm/s nagyságrendbe csökken (<https://doi.org/10.1063/1.1316047>).

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?

Igen, a vizsgált módszerek minden esetben alkalmazhatóak elektronikai minőségű szilícium vizsgálatára. Bizonyos esetekben, pl. öntvények vizsgálata során alkalmazzuk is az e-PCD méréstechnikát.

Szeletek minősítésére jelenleg is vizsgáljuk a bemutatott méréstechnika bevezethetőségét. A chipgyártás során – szemben a napelemekkel – nem kulcsfontosságú, hogy a kiindulási szilíciumnak magas legyen a rekombinációs élettartama. Így itt az élettartammérés legfontosabb felhasználása a szennyeződések kimutatása és a szennyező folyamat vagy alkatrész azonosítása. Így elektronikai minőségű szeletek esetében elsősorban felületi térképezéseket végzünk, ahol azonban fontos a térbeli felbontás, mérési idő és a pontosság között egy optimális egyensúly megtalálása. Ebben jelenleg a μ PCD méréstechnika számít szabványnak, de vizsgáljuk, hogy az e-PCD képes lenne-e többletinformációt szolgáltatni a szeletekről.

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?

A disszertáció beadását követően a tavasz során volt szerencsém egy kutatási együttműködés keretében a CEA-INES-nél további különböző vastagságú, magas élettartamú mintákon eredményeket gyűjteni, amellyel tovább általánosítható a módszer. Ezeket az eredményeket a szeptemberi EU-PVSEC konferencián fogom prezentálni. A kézirrattal a benyújtása előtti utolsó fázisban állunk, jelenleg a társszerzői átolvasás zajlik.

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 tézispontához sem?

A hivatkozott munka egy nem lektorált konferencia kiadványban jelent meg, így úgy gondoltam, hogy tézispontához nem csatolom ebben a formában.

Végezetül szeretnék a Bírálónak ismételten köszönetet mondani a dolgozatom alapos bírálatáért, az értékes megjegyzésekért. Külön köszönöm, hogy a rövid határidő ellenére is azt kézhez kaphattam.

Budapest, 2025. 06. 11.



Krisztián Dávid