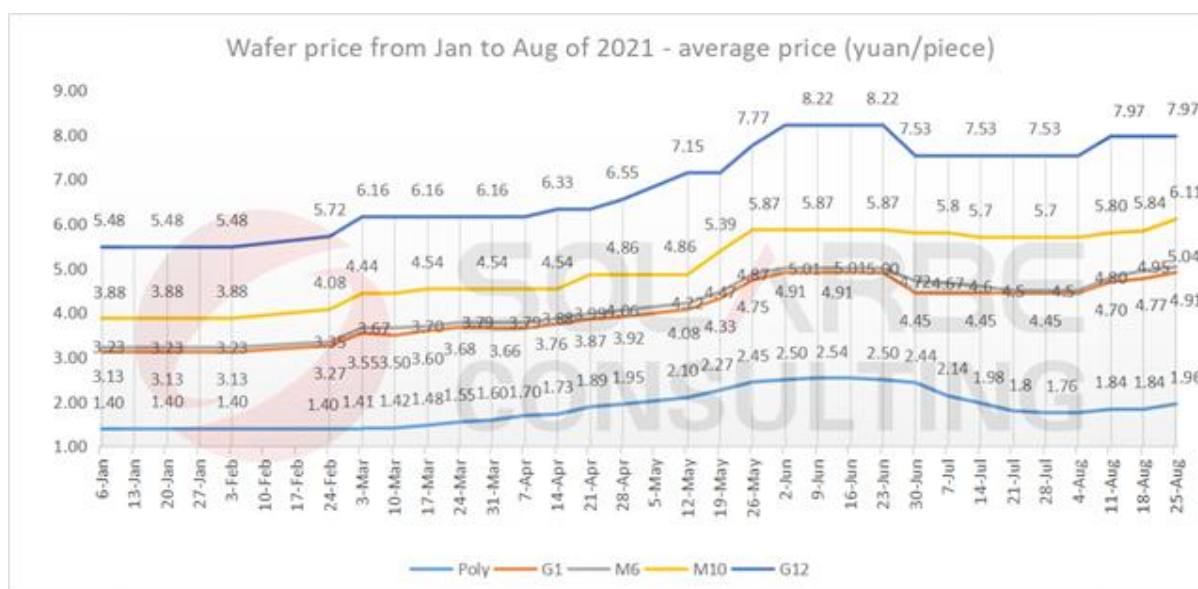


Doktori bírálatra adott válaszok

Szeretném megköszönni Dr. Petrik Péternek, 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. 10. oldal utolsó előtti bekezdés: az érthető, hogy monokristályos szilíciumból jobb napelemet lehet készíteni, de a kiindulási szelet mennyivel drágább így, mintha multikristályos szilíciumból készül?

A napelemipar a 2020-as évek legelejére gyakorlatilag teljesen áttért az egykristályos szeletek használatára, így az árak összehasonlítására friss adatot nem tudok mutatni. Az alábbi ábrán az látható, hogy 2021-ben még jelentős különbség volt az egyes típusok ára között, azonban még így is az egykristályos szeletre tért át gyakorlatilag a teljes iparág.



Forrás: <https://www.solarbeglobal.com/Price-Analysis-A-hard-time-for-modules/>

Ennek oka, hogy a szelet ára csak nagyjából 20-30%-a a végleges napelemmodul árának. Ha a teljes életciklusra vonatkozó költségeket és megtérülést nézzük, akkor még kevésbé jelentős a szilícium szelet ára. Továbbá az egykristályos szeletben sokkal nagyobb fejlődési potenciál van, amit azóta az új cellatípusok be is igazoltak.

2025-re az egykristályos szeletek ára is jelentősen lecsökkent, a jelenlegi árak 1-1.7 yuan közé tehetőek (<https://www.pv-tech.org/pv-price-watch-chinese-pv-wafers-plummet-with-drops-of-up-to-13-85/>). Ma már sokkal inkább a poly-Si alapanyag ára a legmeghatározóbb, ami mindkét szelettípushoz szükséges.

2. 3.9. ábra: mennyire homogén a vastagság a marás után? Melyik ponton történik a vastagság mérése?

Minél hosszabban martuk a mintát, annál rosszabb volt a vastagság homogenitása, hiszen a minták oldalról is jelentősen fogytak a marás következtében, így felületük lekerekedett. Több ponton megmértük a minták vastagságát a minta középső néhány mm²-én, mert ott történt az élettartammérés is. A vastagság relatív terjedelmét $(\max - \min) / ((\max + \min) / 2)$ a következő táblázat foglalja össze a p-típusú mintákra:

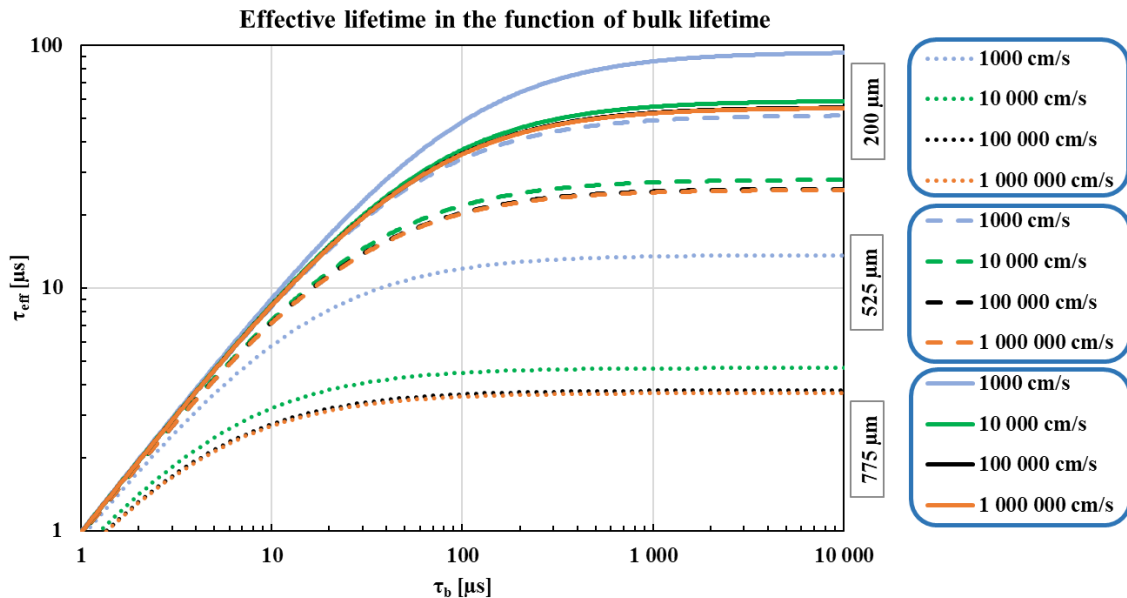
Marási idő [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Max vastagság [μm]	755	679	665	484	409	350	284	206	122
Min vastagság [μm]	754	651	655	409	348	302	219	163	89
Átlagos vastagság [μm]	754,5	665	660	446,5	378,5	326	251,5	184,5	105,5
Vastagság relatív terjedelme	0,1%	4,2%	1,5%	16,8%	16,1%	14,7%	25,8%	23,3%	31,3%

A kiértékelés során a maximális értékekkel számoltunk, hiszen az adja a leghosszabb, így legdominánsabb élettartamkomponenst.

3. Ugyancsak a 3.9 ábrával kapcsolatos kérdés; a szövegben ez szerepel: "Following the acid etching, the surface is unpassivated, therefore the recombination is very intense there, resulting in an estimated surface recombination velocity of $S = 10^6$ cm/s". A marás következtében hogyan változik a felület? Oxidréteg, érdesség, egyéb inhomogenitások, szennyezések? Ezek hogyan befolyásolják a rekombinációt? Számít-e ilyen szempontból, hogy mennyit állt levegőn a minta, azaz mennyi szénhidrogén szennyezés halmozódott fel a felületén?

A szeletelés utáni felület esetében a felületi rekombinációs sebesség (SRV) a 10^5 - 10^6 cm/s tartományba esik (<https://doi.org/10.1063/1.1316047>), 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>). A HF-es marás ezt a natív oxidot lemarja, azonban a hidrogén terminálni tudja a lógó kötéseket. Ez ideiglenesen passziválni tudja a minták felületét tükörsimára polírozott felület esetén, de levegőn ez néhány órán belül megszűnik és a felületi rekombinációs sebesség jellemzően a 10^5 - 10^6 cm/s -re nő. Az általunk vizsgált mart felületek esetén, melyek esetén órák, napok teltek el a marás és a mérés között, ez a hatás biztosan nem játszik szerepet.

Az alábbi ábrán látható, hogy ebben a tartományban a felületi rekombinációs sebesség pontos értéke nincs hatással a mérhető élettartamra (legfeljebb extrém vékony minták esetében).



A dolgozat 4.1-es ábrája, amelyen látható, hogy a felületi rekombinációs sebesség a 10^5 - 10^6 cm/s tartományon belül nem befolyásolja érdemben a mérhető élettartamot.

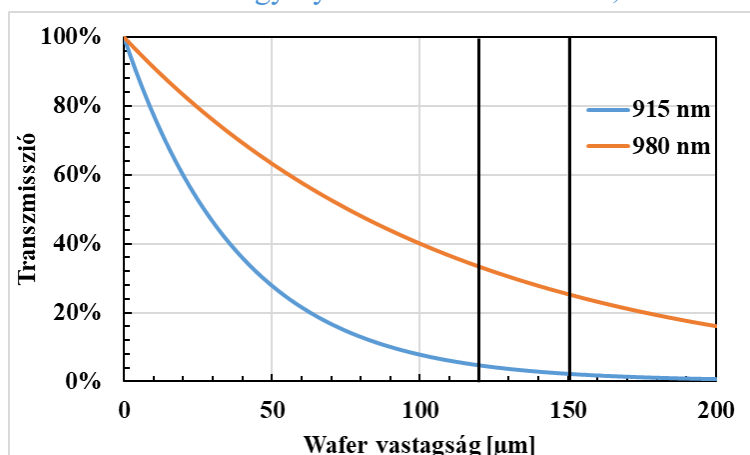
4. A "Passivated cell structures" fejezet első bekezdése: "The passivation process involved depositing a thin intrinsic a-Si layer on the p/n-type wafer, followed by a thinner n/p-type a-Si layer." Milyen módon került leválasztásra az amorf szilíciumréteg? Számít-e, hogy porlasztással, kémiai gőzfázisú leválasztással, ion implantációval, vagy más módon készül? A vizsgált minták esetében, hasonlóan a korszerű ipari gyakorlathoz PECVD módszerrel került leválasztásra az amorf szilícium réteg.

A réteggel szembeni elvárás, hogy az kellően vékony (2-5 nm) és homogén legyen, valamint a Si/a-Si határfelületen a felületi hibahelyek száma minél alacsonyabb legyen. Ennek a PECVD leválasztás tud a legjobban megfelelni (<https://open.metu.edu.tr/handle/11511/21160>). Ez az eljárás lehetővé teszi a „hidrogénezést”, azaz a lógó kötések in-situ passziválását is a határfelületen. Mivel ez egy alacsony hőmérsékletű eljárás, így képes megőrizni a szelet kiindulási elektromos tulajdonságait (pl. rekombinációs élettartam, ellenállás). (<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsaem.4c00787>)

5. 6.2. ábra: mi a jelentősége annak, hogy az impulzus lézer hullámhossza különböző a konstans gerjesztés hullámhosszánál? A 81. oldal utolsó előtti 3 bekezdésében utal rá a jelölt, hogy az abszorpció különböző, de mekkora lehet a különbség a tér lecsengésében mélységben a két esetben?

Az alábbi ábrán látható a két alkalmazott hullámhossz esetében a tér lecsengése. Az állandósult állapotú (SS, QSS) mérésekhez fontos, hogy minél pontosabban ismerjük a mintában elnyelt fény fény fluxusát, hiszen az közvetlenül meghatározza az élettartamot. Az ehhez a méréshez használt 915 nm-es lézer esetében nincs lényegi különbség a transzmisszióban egy 120 μm vagy egy 150 μm-es minta között, így kevésbé lesz érzékeny a módszer a vastagság-különbségekre.

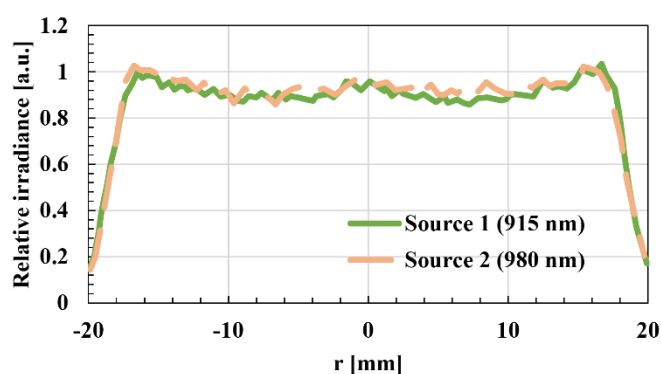
A tranziens méréshez használt 980 nm-es lézernél nincs ilyen megkötés. Ebben az esetben rendelkezésre állt egy ilyen hullámhosszú lézer, ezért került rá a választás.



A dolgozatban nem szereplő ábra, ami a szeletek transzmisszióját mutatja a vastagság függvényében a két alkalmazott hullámhossz esetén.

6. 83. oldal alja: "The final optics illuminates the sample surface with a 3cm diameter spot, maintaining photon flux variation below 10% within the spot (Figure 6.5.)." Mekkora ez az inhomogenitás a szenzor által érzékelt felületen? Szemre sokkal jobbnak tűnik – és lehet, hogy ez az, ami igazán számít?

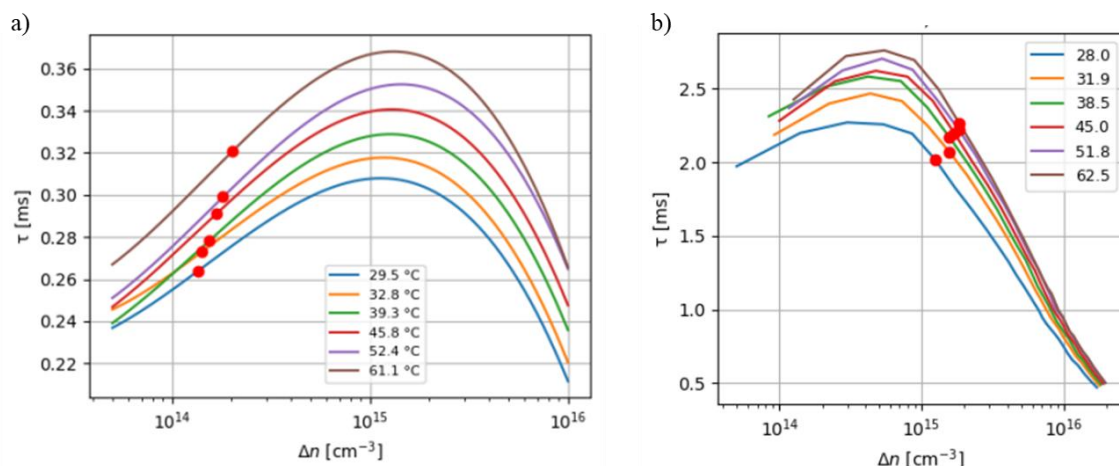
Részletesen vizsgáltam töltésdinamikai szimulációval a gerjesztett töltéshordozók laterális szétterülését. A mért jel reprodukálásához bevezettem egy laterális érzékenységi profilt (hasonlóan Black et al.-ban leírtakhoz, DOI: [10.1109/JPHOTOV.2019.2942484](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2942484)). Az volt a tapasztalat, hogy a szenzor mérete kevésbé fontos, sokkal inkább a megvilágított terület és a diffúziós hossz viszonya a döntő. A szélén lévő felkanyarodás kifejezetten előnyös, így tovább homogén tud maradni a töltéshordozóeloszlás a lecsengés során.



A dolgozat 6.5-ös (a) ábrája, amely a homogenizált fényfolt intenzitásának eloszlását mutatja egy átmérő mentén.

7. Mekkora a töltéshordozó élettartam mért értékében a hőmérséklet hatására bekövetkező különbség a 6.8a és b ábrákon a "38 Sun" görbék esetére?

A vizsgált jelenséget részletesen körbejártuk Havasi Gergely MSc diplomamunkája során, amelyet témavezetőként segítetttem. Itt a megvilágítást használva melegítettük a mintát, majd mértük meg a rekombinációs élettartamot tranziens módszerrel. Az alábbi ábrák Gergely diplomamunkájából származnak:



Az a) ábrán egy PERC, míg a b) ábrán egy heteroátmenetes napelemcella hőmérsékletfüggő élettartamgörbéi láthatóak. Látható, hogy a legnagyobb hőmérsékletek mellett a szobahőmérsékletnél akár 20%-kal nagyobb élettartamokat is kapunk. Ezzel szemben a doktori dolgozatomban bemutatott lézervezérlés mellett kialakuló legfeljebb 4°C-os hőmérsékletnövekmény hatására az élettartamváltozás 5% alatti marad.

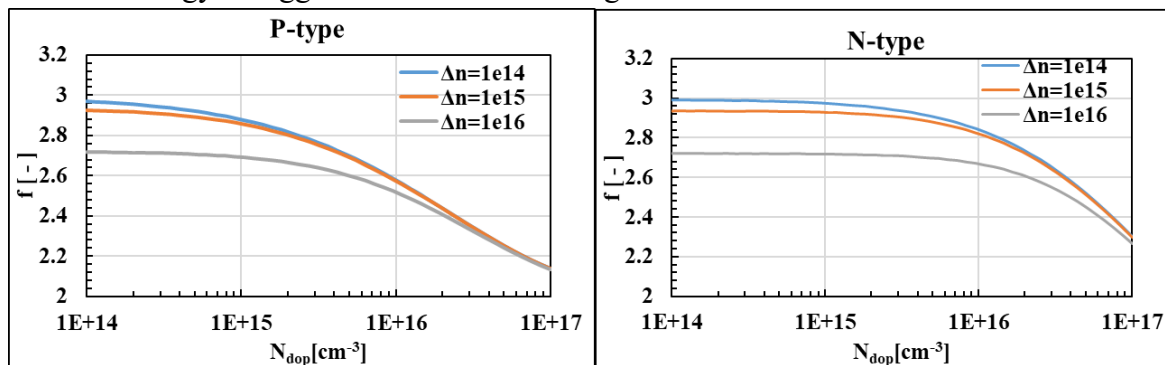
8. 6.2. fejezet utolsó előtti bekezdése: "To minimize uncertainty, the thickness of the σ_{sh} calibration wafers closely matched that of the tested samples, addressing skin-effect-related issues described in [199]" Mekkora ez a bizonytalanság, és mennyivel lehet csökkenteni?

A mért jel első közelítésben a rétegvezetőképességgel arányos, $\sigma_{sh} = \sigma W$, azaz a kalibráló minták vastagságától független a kalibráció. Azonban a vastagabb mintákban a tekercstől távolodva csökken a mélységi érzékenység, és ez kisebb jelet eredményez. Ezt a jelenséget abban az esetben korrigálni kell, ha a vizsgált minta vastagsága lényegesen eltér a kalibráló minták vastagságától. A torzító hatás megbecsülhető egy exponenciálissal lecsengő mélységi érzékenységgfüggvényt használva, melyhez a lecsengési állandót az 5.2 ábráról választottam. A mért jel ekkor a következőképpen becsülhető: $U = \int_0^W \sigma \cdot e^{-x/d_{sense}} dx$. Az alábbi táblázatban látható egy szélsőséges példán keresztül, hogy akár 10%-nyi eltérést is okozhat, ha a napelemek tényleges vastagsága (~200 μm) helyett egy elektronikai szelettel (~800 μm) kalibrálunk egy adott rétegvezetőképességre.

W [μm]	σ_{sh} [$1/\Omega$]	σ [$1/\Omega cm$]	d_{sense} [cm]	U [ö.e.]
200	0,04	2	0,2	0,0381
800	0,04	0,5	0,32	0,0354

A mérendő mintákkal megegyező vastagságú szeleteket használva a tér lecsengéséből, és a kapcsolódó skin-hatásból származó bizonytalanság teljesen eltüntethető.

9. 6.11. ábra: hogyan függ f értéke az adalékoltságtól?



Az elektron és lyuk mozgékonyaságok hányadosa (f) az adalékolás függvényében ábrázolva, különböző gerjesztettségek mellett (a dolgozatban nem szereplő ábra). Látható, hogy az adalékolással a mozgékonyaságok aránya csökken.

10. "List of publications" fejezet: a két "in preparation" megjelölésű kézirat be lett-e nyújtva, hová, és hogyan áll az elfogadása

Az [O1]-es sorszámú kézirat esetében úgy döntöttünk, hogy első körben megvizsgáljuk a módszer szabadalmaztatásának lehetőségét. Jelenleg ennek ügyintézése zajlik.

Az [O3]-as sorszámú kézirathoz további anyaggyűjtés történt a tavasszal. 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 kézirattal a benyújtása előtti utolsó fázisban állunk, jelenleg a társszerzői átolvasás zajlik.

Végezetül szeretnék a bírálónak köszönetet mondani, hogy igen rövid határidővel megkaptam a bírálatát. A lényeglátó kérdéseket is köszönöm szépen!

Budapest, 2025. 06. 11.

Krisztián Dávid