



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

# **Félig átlátszó egykristályos szilícium alapú napelem cella technológiája és vizsgálata**

**Doktori értekezés téziséhez**

Szerző: Földváry-Bándy Enikő  
*okleveles villamosmérnök*

Témavezető: Dr. Rencz Márta  
*egyetemi tanár, MTA doktora*

**Elektronikus Eszközök Tanszéke**

**Budapest, 2015**



# 1. Bevezetés

Az emberiség növekvő energia igénye miatt egyre nagyobb szerepet kapnak az alternatív energiaforrások, ezen belül a napenergia hasznosítása is. A napelemekkel történő energiatermelés (fény-elektromos átalakítás) az elmúlt évtizedekben napelemes parkok, erőművek vagy háztetőre szerelt modulok formájában valósult meg. A jobb hely és energia kihasználás érdekében a napelemek komoly szerephez jutnak az építészet terén is. Ez az új ágazat az épületbe integrált napelemek területe, ahol az építészeti szerkezeti elemként használják fel a napelem modulokat, melyek energiát is termelnek. Építészeti szempontból a napelem modulok a zajvédelem, formatervezés, árnyékolás, időjárás elleni védekezés és hőszigetelés eszközei is lehetnek. A BIPV<sup>1</sup> rendszerek piaca a különböző előrejelzések szerint fontos növekedés előtt áll az elkövetkezendő időszakban. A jelenleg elérhető átlátszó, szigetelt, színes ablakok továbbfejlesztése is elősegíti ezen terület növekedését.

Homlokzati elemként vagy árnyékoló szerkezetekben gyakran alkalmaznak félig átlátszó modulokat, melyeknél a cellák közötti távolsággal vagy a cellákon belül kialakított lyukak méretével változtatható a felület fényáteresztő képessége. Az átlátszó modulok további előnye a belső tér természetes melegítése, illetve az, hogy a bejutó napfény növeli a beltéri megvilágítást. Átlátszó kivitelben különböző típusú napelemeket alkalmaznak, ezek általában kristályos vagy amorf szilícium alapúak, de léteznek festék és szerves alapú napelemek is. Az épületbe integrált napelemek között a mai napig a kristályos napelemek a legelterjedtebbek, mivel magas a hatásfokuk és a kiforrott gyártástechnológiájuk miatt megbízhatók. Egyik megoldás a kívánt átlátszóság elérésére a félvezető felület egyes részeinek lokális eltávolítása, mert az így létrejövő lyukakon átjutó fény biztosítja az adott mértékű átlátszóságot. Kezdetben a lyukak kialakítását mechanikai csiszolással végezték a szilícium szelet mindkét oldalán. Ez a struktúra több ezer parányi lyukat tartalmazott, de a mechanikai problémák miatt mára ezt a technológiát ipari környezetben a lézeres megmunkálás váltotta fel. A lézervágás során néhány négyzetmilliméter felületű lyukakat alakítanak ki, de akár tetszőleges méretű kivágás is megvalósítható.

---

<sup>1</sup> Building integrated photovoltaics – épületbe integrált napelemek

## 2. A kutatások célkitűzései

A kristályos félvezető anyagok lézeres megmunkálása sajátos problémákat vet fel, különös tekintettel a kész eszközön végzett megmunkálásra. Ennek megfelelően a munkám célja egy korszerű, kétoldalasan aktív, félig átlátszó egykristályos n-típusú szilícium alapú napelem cella technológiájának kidolgozása volt. Az átlátszóságot biztosító lyukak kialakítását az eddigi piaci megoldások helyett, egy alternatív technológiát alkalmazó tömbi anizotróp marási módszerrel valósítottam meg. Az átlátszóságot biztosító teljes szilícium szeleten áthaladó lyukak létrehozásához elvégezendő feladat egy fémionmentes anizotróp szilícium maráson alapuló technológia napelemes alkalmazhatóságának vizsgálata és optimalizálása volt a TMAH<sup>2</sup> marószer és a marási paraméterek figyelembevételével. Fontos szempont volt a kutatásom során a maráshoz szükséges maszkolóréteg kialakítási módszerének és maródási tulajdonságainak vizsgálata is. A különböző rétegekkel szembeni szelektivitás ismeretében a leválasztás technológiája megválasztható, így a napelem struktúrát érő hőhatás csökkenthető.

A félig átlátszó napelem hatásfokának növelése érdekében a felületi reflexiót csökkentő eljárás kidolgozása is célja volt kutatásaimnak. Ehhez optimalizálni kellett a strukturáláshoz használt fémionmentes marószer összetételét és a marás paramétereit. A minimális felületi reflexió érdekében az elméleti számításokon alapuló antireflexiós réteg alkalmazása is szükséges volt.

Mindezek mellett, egy működő félig átlátszó napelem teszt struktúra megvalósításához nélkülözhetetlen volt az emitter réteg, a BSF réteg és a kontaktus réteg kialakítási módszerének kidolgozása is. A munkám során a végcél ezeknek megfelelően olyan rétegmegmunkálási eljárások, rétegszerkezetek és ezeken alapuló félig átlátszó fotovoltaiikus eszközök kidolgozása és vizsgálata volt, melynek lépései kompatibilisek az ipari gyártástechnológiában és kutatásokban használat technológiai folyamatokkal.

---

<sup>2</sup> Tetrametil-ammónium-hidroxid

### 3. Felhasznált eszközök és vizsgálati módszerek

Kísérleti munkám technológiai hátterét kezdetben a BME EET V2-es épületben található Félvezető Laboratóriuma adta. A laboratórium költözése után a kutatásaimat a Q épületben kialakított, tiszta térrel rendelkező új félvezető laboratóriumban folytattam, melynek gépállománya és technológiai lehetőségei bővültek. A félig átlátszó fotovoltaiikus eszköz megvalósításához kidolgozott technológiai lépéssor öt összetett folyamatból áll, melyekhez a következő berendezéseket használtam fel: laboratóriumi mérleg, lakkcentrifuga, pozicionáló és megvilágító berendezés, magas hőmérsékletű csőkemencék, vákuumgőzölő, katódporlasztó, szitanyomtató, RTP<sup>3</sup> és szeletdaraboló fűrés. Ezen kívül az anizotróp marási technológiákhoz egy kísérleti elrendezést állítottam össze külső hőmérővel szabályozott fűtőlap használatával. A doktori munkám során felmerülő egyes technológiai folyamatok elvégzéséhez más hazai laboratóriumok segítségét is igénybe vettem. Egyes maszkolórétegek leválasztásában az MTA EK MFA<sup>4</sup> Mikrotechnológia Osztály, míg a lézeres megmunkálásokban az Exasol Kft munkatársai segítettek.

Az előállított felületek, rétegek és a kész eszközök minősítését különböző módszerekkel végeztem. Az alapanyag kisebbségi töltéshordozóinak élettartamát  $\mu$ PCD<sup>5</sup> módszerrel térképeztem fel. A különböző vékonyrétegek vastagságát mechanikai profilométerrel, illetve ellipszométerrel határoztam meg. Az anizotróp lyukmarási kísérletek során az árkok mélységét mérőórával állapítottam meg. A kutatómunka során a felületi morfológia, a hibahelyek és a felületen létrejövő alakzatok vizsgálata elsősorban optikai mikroszkóppal történt, a nagyobb felbontású vizsgálatok pásztázó elektronmikroszkóppal, illetve 3D-s optikai mikroszkóppal készültek. A felvételek további elemzését képfeldolgozó programmal végeztem. A piramisos felületi struktúra és antireflexiós rétegek minősítését integráló gömbbel felszerelt spektrofotométerrel végeztem. Az antireflexiós rétegeket ellipszométeres és XPS<sup>6</sup> vizsgálatokkal is minősítettem. A munkám során optikai vékonyréteg tervező programmal ellenőrző szimulációt is végeztem.

---

<sup>3</sup> Rapid thermal processor – gyors hőkezelő berendezés

<sup>4</sup> MTA Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet

<sup>5</sup> Microwave induced photoconductive decay – fotoindukált vezetőképesség lecsengésének mérése mikrohullámmal

<sup>6</sup> X-ray photoelectron spectroscopy – röntgen fotoelektron-spektroszkópia

Az adalékolt rétegek négyzetes ellenállását négy-tűs méréssel, az adalékolás profilját pedig terjedési ellenállás méréssel határoztam meg. Végül az elkészült eszközök paramétereinek vizsgálata I-U karakterisztika mérést, rezgőkondenzátoros felületi potenciál térképezést és a termikus viselkedés vizsgálatát foglalta magába.

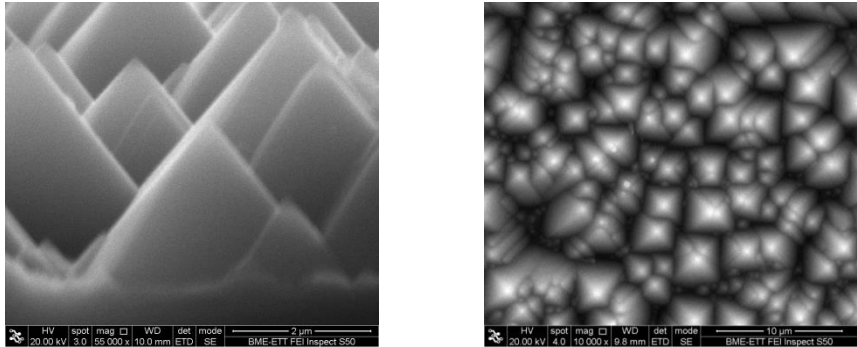
#### **4. A kutatómunka új tudományos eredményei**

Kutatómunkám során kidolgoztam az n-típusú egykristályos szilícium alapú félig átlátszó napelem megvalósításához szükséges résztechnológiákat. A kidolgozott technológiai eljárások és az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján újszerű, félig átlátszó fotovoltikus eszközt valósítottam meg. Az eredményeket négy tézis és tíz altézis formájában mutatom be.

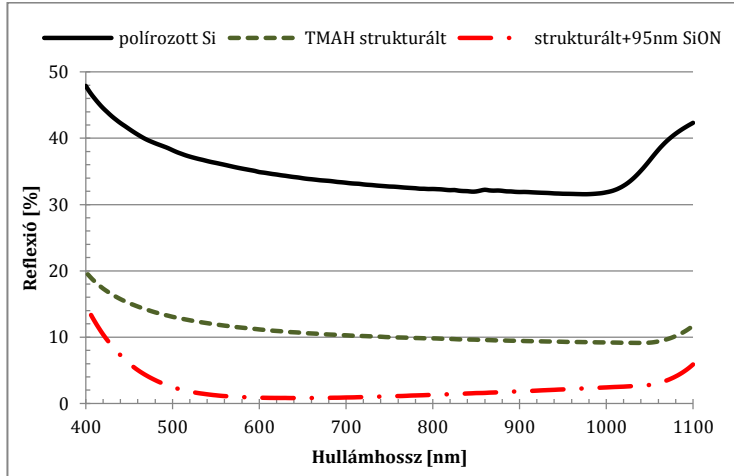
**1.Tézis:** *Technológiai eljárást dolgoztam ki, mellyel az n-típusú, egykristályos szilícium szelet felületének reflexiója lecsökkenthető. Az általam kifejlesztett eljárás félig átlátszó napelem technológiai lépéssorába integrálható. Az így elérhető 2,5%-os felületi reflexió a kereskedelmi forgalomban lévő cellák esetén mért értékkel (3,4-7,1%) versenyképes. [J2, C2, C4, C6].*

**1.1. altézis:** *Szilícium szelet felületén anizotróp marási eljárással homogén piramisos struktúrát alakítottam ki fémionmentes marószer (2%TMAH és 6%IPA vizes oldata) alkalmazásával. Meghatároztam azokat a marási paramétereket, amelyek mellett reprodukálható felületstrukturálási eljárás végezhető el:  $T=80^{\circ}\text{C}$ ,  $t=30\text{perc}$ . Mérésekkel kimutattam, hogy a felület piramisos fedettsége nagyobb, mint 99%, és az alkalmazott felületstrukturálási eljárás után a 400-1100nm-es tartományban a reflexió értéke átlagosan 11,28%-ra csökken. A felületen kialakuló 1-4 $\mu\text{m}$  magasságú piramisok kedvezően befolyásolhatják a félig átlátszó napelem technológiában alkalmazott litográfiai eljárás minőségét.*

**1.2. altézis:** Egyrétegű, porlasztott szilícium-oxinitrid antireflexiós réteg alkalmazásával a strukturált felületű egykristályos szilícium felületi reflexióját a 400-1100nm-es tartományban átlagosan 2,5%-ra csökkentettem. A rádiófrekvenciás porlasztással argon és nitrogén atmoszférában általam leválasztott réteg törésmutatója 1,8893 ( $\lambda=587\text{nm}$ ). Mérésekkel igazoltam, hogy a nitrogén nyomás változtatásával az antireflexiós réteg reflexiós görbéje befolyásolható.



**1. ábra:** 1.1. altézisben leírt marószerszerrel előállított strukturált felület (SEM<sup>7</sup> felvétel). Meghatározható a felület homogenitása és a piramisok mérete.



**2. ábra:** TMAH-val strukturált és ARC<sup>8</sup>-réteggel bevont felület reflexiós görbéje, jól látható a reflexiócsökkenés a polírozott felülethez képest.

<sup>7</sup> Scanning electron microscope – pásztázó elektronmikroszkóp

<sup>8</sup> Antireflection coating - antireflexiós bevonat

**2. Tézis:** Eljárást dolgoztam ki, mellyel a szilícium szelet teljes vastagságán átmenő, négyzet keresztmetszetű lyukak alakíthatók ki félig átlátszó napelem megvalósításához. A technológiai eljárás TMAH nedves kémiai anizotróp maráson alapszik [J2, J3, C1, C4, C5, C6].

**2.1. altézis:** A szilícium szeleten átmenő lyukak létrehozásához optimalizáltam a TMAH alapú anizotróp marószert összetételét és a technológiai paramétereket a maximális marási sebesség elérése érdekében. Az optimalizált marószerral (5%-os TMAH oldat és 2g/l/h ammónium-perszulfát adalékanyag) 92°C-on végzett kísérletek során az n-típusú, 5-10 $\Omega$ cm fajlagos ellenállású, <100> orientációjú szilícium szeleten átlagosan 91 $\mu$ m/h marási sebesség érhető el, a teljes felületen kisebb, mint 0,4% mélységbeli szórás mellett.

TMAH koncentráció [wt.%]	Átlagos marási sebesség [ $\mu$ m/h]	Mélységbeli szórás [%]
3	81,2	4,9
5	<b>90,2</b>	<b>2,4</b>
7	83,5	1,3
Adalékanyag mennyiség [g/l/h]	Átlagos marási sebesség [ $\mu$ m/h]	Mélységbeli szórás [%]
2	<b>91,4</b>	<b>0,36</b>
3	88,4	0,46
5	86,9	0,49
8	85,1	0,89

**1. táblázat:** Átlagos Si marási sebességek adalékanyag nélkül a TMAH koncentráció illetve az ammónium-perszulfát mennyiségének függvényében (5% TMAH oldat esetén)

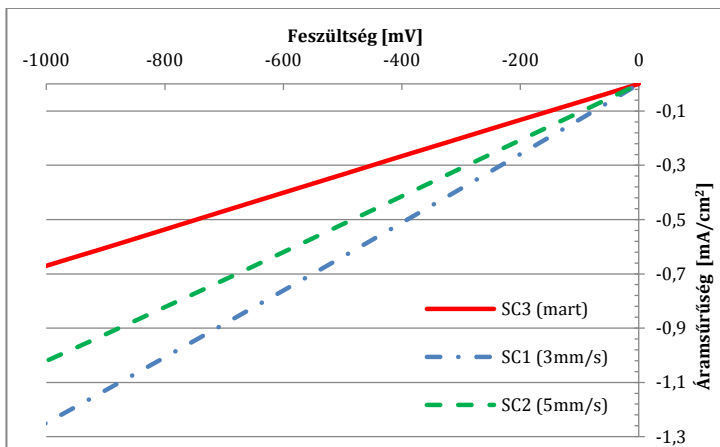
**2.2. altézis:** Kimutattam, hogy az egy óránál hosszabb anizotróp maráshoz az optimális maszkolóréteg – az anyagszerkezet, a kialakítás és a megmunkálhatóság szempontjából – a termikusan növesztett szilícium-dioxid, szemben a többletfolyamatot igénylő szilícium-nitriddel és a túlyukakat tartalmazó APCVD szilícium-dioxiddal.

**2.3. altézis:** Kísérletileg kimutattam, hogy az egyrétegű SOG (spin-on glass), mint alacsony hőmérsékleten ( $\leq 800^\circ\text{C}$ ) kialakítható alternatív maszkolóréteg, hőkezelési hőmérsékletének növelésével csökken a marás során kialakuló hibahelyek száma és mérete. A maximálisnak választott 800°C-os hőkezelés esetén 6 $\mu$ m vagy annál kisebb jellemző méretű inverz alakzatok és azok csoportjai jönnek létre. A félig átlátszó napelem technológiában nem javaslom az alkalmazását.



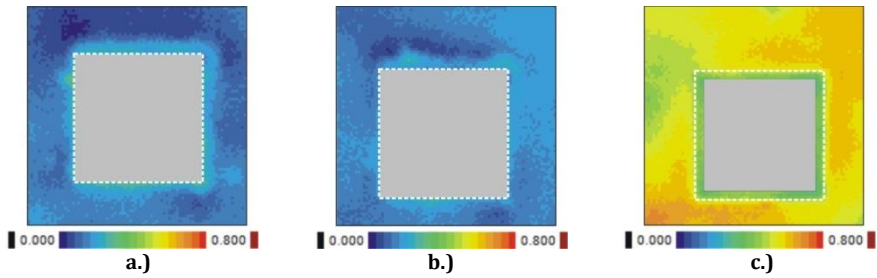
**3.Tézis:** *Testztstruktúrák segítségével kimutattam, hogy az anizotróp maráson alapuló technológia esetén nem alakul ki hőterhelt zóna, ami parazita átvezetést és a lyuk környezetében megnövekedett felületi potenciált okozna, szemben a lézervágással. Lézervágás esetén a hőterhelt zóna jellemzően kialakul, melyet anizotróp marással készült mintával azonos szerkezetű lézervágott testztstruktúrák esetén ellenőriztem. Az anizotróp marás, mint lyukkialakítási eljárás előnyös félig átlátszó napelemeknél, kedvezőbb tulajdonságú cellák alakíthatók ki [J4, C3].*

**3.1. altézis:** *A záróirányú karakterisztikák alapján igazoltam, hogy a minták párhuzamos ellenállása változik a kialakítási technológiától függően. Az anizotróp marással készült félig átlátszó cella párhuzamos ellenállása a legnagyobb, a hőterhelt zóna hatására a párhuzamos ellenállás értéke csökken. A testzt cellák segítségével kimutattam, hogy lézervágás esetén a párhuzamos ellenállás értéke a mart mintához képest közelítőleg a felére csökkenhet.*



**3. ábra:** Lézervágással és anizotróp marással kialakított félig átlátszó napelemek záróirányú karakterisztikája. Meghatározható a cellák párhuzamos ellenállása.

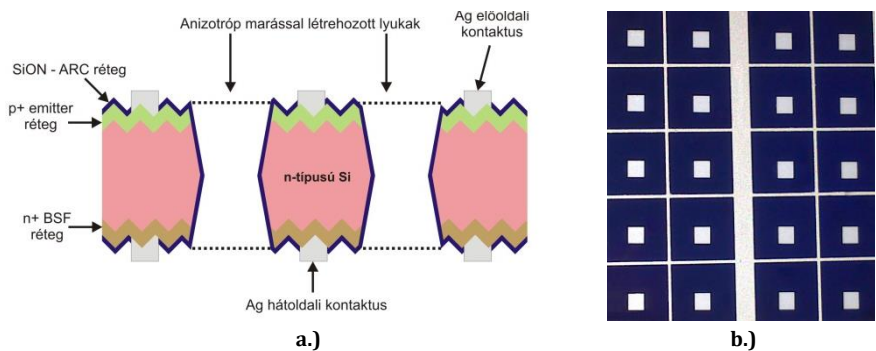
**3.2. altézis:** *A rezgőkondenzátoros Kelvin módszerrel végzett felületi térképezéssel igazoltam, hogy az anizotróp marással kialakított lyuk környezetében nem alakul ki az alapfelülettől eltérő potenciálú sáv. A testztstruktúrák segítségével kimutattam, hogy a lézervágással okozott hőterhelés mértéke befolyásolhatja a felületi állapotosságát, amely eltérő szélességű és potenciálú sávokat eredményez a lyuk környezetében.*



4. ábra: Cellák felületi potenciáltérképe: a.) SC1(3mm/s), b.) SC2(5mm/s), c.) SC3(mart)

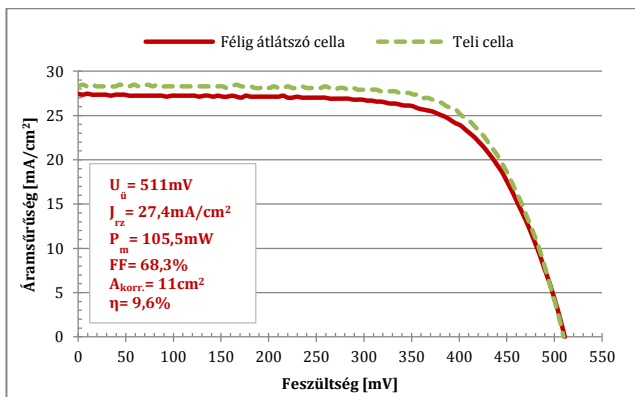
**4.Tézis:** Kidolgoztam azt a komplett technológiai lépéssorozatot, amivel félig átlátszó napelemek hozhatók létre szilícium technológiával. Három újszerű, félig átlátszó napelem struktúrát valósítottam meg, melyekben a kívánt átlátszóságot nedves kémiai anizotróp marással értem el. Az átlátszóságot a szilícium szelet teljes vastagságán átmenő lyukak biztosítják. A lyukak mérete és sűrűsége a maszkolóréteg mintázatával változtatható [J1, J2, J3, C1, C6].

**4.1. altézis:** Eljárást dolgoztam ki, amely lehetővé teszi az együttes diffúzió, TMAH felületstrukturálás, kétoldalas tömbi anizotróp lyukkialakítás és szilícium-oxinitrid antireflexiós réteg előnyeinek egyesítését. Az együttes diffúzió a magas hőmérsékletű folyamatok idejének és számának csökkentését eredményezi. A maszkolóréteg növesztéshez szükséges magas hőmérsékletű folyamat idejét tovább csökkenti a kétoldalas lyukkialakítási eljárás alkalmazása. Az így létrehozott félig átlátszó kísérleti napelem hatásfoka eléri a 9,6%-ot.



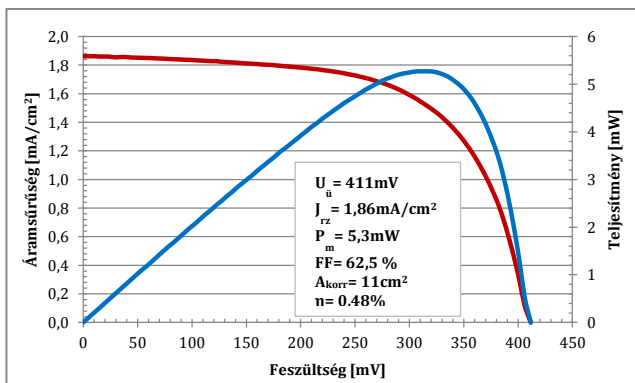
5. ábra: Félig átlátszó napelem: a.) keresztmetszeti képe, b.) kész cella fényképe

**4.2. altézis:** Mérésekkel igazoltam, hogy a megegyező technológiával készült teli és félig átlátszó napelem cella elektromos paraméterei között nem mutatható ki különbség, így az átmenő lyukak kialakításának nincs járulékos parazita hatása. Továbbá, a teljes szeleten átmenő lyukak létrehozására használt technológiai eljárás nem befolyásolja az elkészült eszközök karakterisztikájának termikus viselkedését.



6. ábra: Félig átlátszó és megegyező technológiával készült teli napelem cella J-U karakterisztikája

**4.3. altézis:** Méréssel igazoltam, hogy az általam létrehozott – a 4.1. altézisben bemutatott – félig átlátszó napelem struktúra alkalmas kétoldalasan aktív működésre, a bór adalékolással kialakított emitternek, a foszfor adalékolással kialakított hátoldali térnek, a lokális fémezésnek és a hátoldali antireflexiós rétegnek köszönhetően.



7. ábra: Félig átlátszó cella J-U és P-U karakterisztikája hátoldali megvilágítás esetén

## 5. Az eredmények hasznosítása

A doktori munkám során sikerült olyan rétegmegmunkálási eljárásokat és rétegszerkezeteket kidolgozni, melyek integrálhatók az iparban alkalmazott napelem technológiai sorba, egyes standard lépések részeként vagy kiegészítő lépésként. A kutatási munkám aktualitását jelzi, hogy több hazai projektben is foglalkoztunk a Tanszéken az épületbe integrálható napelemek vizsgálatával. A kidolgozott struktúrákat és a minősítések eredményeit a PVMET (Elektromos és optikai elvű mérőkészülék család fejlesztése vékonyréteg napelemek gyártásközi és laboratóriumi minősítésére), illetve a K 100794 azonosítójú OTKA (Újszerű, elektrotermikus és radiometriai multidomén mérési eljárások és modellek napelemek minősítésére) projektekben hasznosítottuk. A végső félig átlátszó napelem technológiát és struktúráját összefoglaló konferencia közleményem elnyerte a 14<sup>th</sup> Biennial Baltic Electronics Conference (2014 - Tallinn) Best Paper díját. A létrejött újszerű félig átlátszó napelem az épületbe integrálás lehetőségén túl akár intelligens rendszerekbe is integrálható, ahol a napelem egyik fényáteresztő felületén egy szenzor is helyet kaphat. Az eredmények és kidolgozott technológiák további új projektek keretén belül felhasználhatók. Az újszerű félig átlátszó napelemek technológiájával kapcsolatos munka tovább folytatható a struktúra technológiai eljárásainak optimalizálásával és nagyobb kisebbségi töltéshordozó élettartamú alapanyag alkalmazásával a hatásfok növelése érdekében.

## Tézisekhez kapcsolódó publikációk

### Folyóiratcikkek

[J1] B. Plesz, Á. Földváry, E. Bándy: *Low cost solar irradiation sensor and its thermal behaviour*, Microelectronics Journal, 42. kötet, 5. példány, 594-600. oldal, 2011

[J2] E. Bándy, M. Rencz: *Alternative technology used to manufacture semitransparent monocrystalline silicon solar cells*, Microsystem Technologies, 19. kötet, 6. példány, 819-827. oldal, 2013

[J3] E. Bándy, M. Rencz: *Thermal behaviour of new crystalline semitransparent solar cell structure*, Microelectronics Journal, 44. kötet, 11. példány, 1035-1043. oldal, 2013

[J4] E. Bándy, Á. Földváry, J. Mizsei: *Semitransparent monocrystalline solar cells manufactured by laser cutting and anisotropic etching*, Microsystem Technologies, 19. kötet, 6. példány, 837-844. oldal, 2013

### Konferenciatickek

[C1] E. Bándy, M. Rencz: *Thermal characterisation of novel crystalline semitransparent solar cell*, Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'11), Párizs, 2011, 84-87. oldal

[C2] E. Bándy, Á. Földváry, V. Timár-Horváth: *Bifacially active n-type monocrystalline silicon solar cell*, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Teaching Photovoltaics, Prága, 2012, 70-73. oldal

[C3] E. Bándy, Á. Földváry, J. Mizsei: *Comparison of anisotropic etching and laser technologies applied in manufacturing of semitransparent monocrystalline solar cells*, Collection of Papers Presented at the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'12), Cannes, 2012, 32-36. oldal

[C4] E. Bándy, M. Rencz: *New technology used to manufacture a simple semitransparent monocrystalline silicon solar cell*, Collection of Papers Presented at the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'12), Cannes, 2012, 208-213. oldal

[C5] E. Báandy, Á. Földváry, M. Rencz: *The effect of heat treatment on spin-on oxide glasses in solar cell application*, Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'13), Berlin, 2013, 297-300. oldal

[C6] E. Báandy, M. Rencz: *Enhanced semitransparent monocrystalline silicon solar cell structure*, Proceedings of the 14<sup>th</sup> Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2014), Tallinn, 29-32. oldal, Best Paper díjas cikk

## **Tézisekhez szorosan nem kapcsolódó publikációk**

[N1] E. Báandy, Á. Földváry, B. Plesz: *Thermal issues of solar irradiation sensor*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems (THERMINIC'09), Leuven, 2009, 61-65. oldal

[N2] E. Báandy, Z. Pálffy, B. Plesz: *Spectral response measurement with modern LED light sources*, Proceedings of 5<sup>th</sup> International Workshop on Teaching Photovoltaics, Prága, 2010, 63-68. oldal

[N3] E. Báandy, Á. Földváry, M. Rencz: *Thermally compensated intelligent irradiation sensor*, Collection of Papers Presented at the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'10), Seville, 2010, 51-55. oldal

[N4] B. Plesz, E. Báandy, Á. Földváry, V. Timár-Hotváth, J. Mizsei: *Thermal behaviour of thin photoactive layer crystalline solar cells*, Collection of Papers Presented at the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'10), Seville, 2010, 221-224. oldal

[N5] E. Báandy, Á. Földváry: *Intelligens fényintezitásmérő*, Műszaki Magazin, 6. kötet, 60-62. oldal, 2012