

# OTKA 100794 Újszerű, elektrotermikus és radiometriai multidomén mérési eljárások és modellek napelemek minősítésére

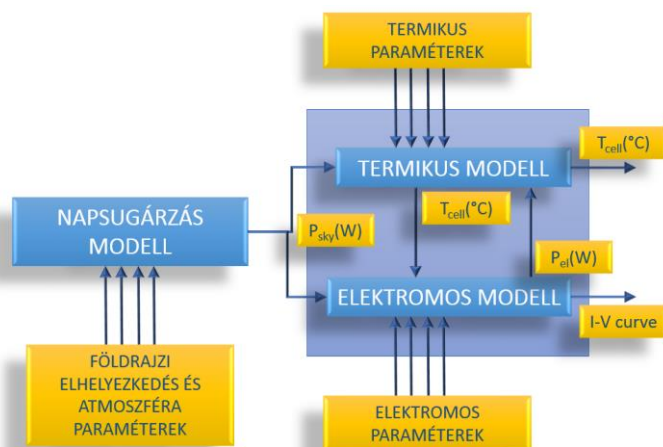
A kutatás során elvégzett munkát és az elért eredményeket munkacsomagonként foglaljuk össze.

## WP1 - Napelemek energiatermelésének előrejelzése kombinált elektrotermikus modellek segítségével

### Napelem termelését előrejelző, multidomén modell

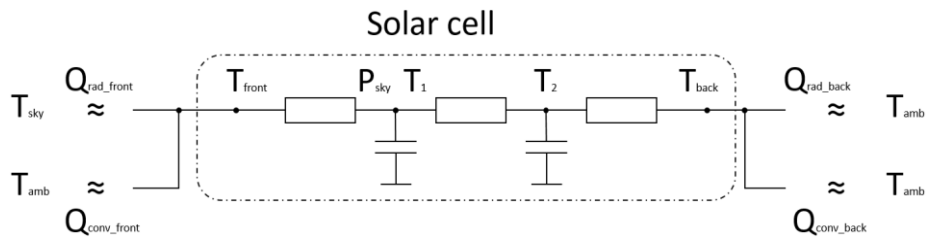
A napelemek energiatermelésének előrejelzéséhez létrehoztunk egy fél empirikus, kombinált, elektrotermikus modellt, amely, ha rendelkezésre állnak a szükséges bemeneti adatok, akkor egy egydiódás napelemmodellt alapul véve néhány hőmérsékleti és fényintenzitási együttható ismeretében pontos viselkedési leírást ad. A létrehozott modell előnye, hogy a jelenlegi modellekkel ellentétben visszacsatolás nélkül is nagy pontossággal írja le a napelemek működését.

A modell három almodulból tevődik össze (1. ábra). Az első rész a napelemre érkező sugárzott teljesítményt határozza meg a napelem modul földrajzi elhelyezkedésének és a környezeti feltételeknek a figyelembevételével. A számolt beeső fényt teljesítmény a másik két almodul bemenetül szolgál, melyek alapja a napelem energiamérlege. Az energiaátalakítás hatásfokától függően a beeső fény egy része elektromos árammá, míg másik része hővé alakul. Az így termelődő hő a napelemmodul hőmérsékletének a növekedését okozza, ami rontja a hatásfokot.



1. ábra: Napelem elektrotermikus modell

Mivel a félvezető eszközök működése erősen függ a hőmérséklettől, a napelem modulok teljesítményére is hatással van a p-n átmenet hőmérséklete. Azért, hogy a megfelelő pontossággal meghatározható legyen az energiaátalakítás hatásfoka, a modulok termikus viselkedését pontosan ismerni kell. A modell egyik központi része egy Cauer RC létra, amely leírja a modul aktív rétege és a környezet közötti, egydimenziósnak tekintett hőterjedést. A hagyományos létrát azonban kiegészítettük egy másik RC ággal, ami egy párhuzamos hőutát hivatott modellezni, amely a napelem modul felületén tapasztalható sugárzásos és konvekciós hőátadást írja le. Mivel ezek a hőmérséklettől nemlineárisan függenek, a modellünkben hőmérsékletfüggő hőellenállásokkal számolunk. A hőmérsékleti csomópontokat a határfelületeken helyeztük el, míg a beeső fényt teljesítmény és az elektromos teljesítmény különbségéből adódó disszipáció a p-n átmenetnél jelentkezik (2. ábra).



2. ábra: A termikus modell magja

Az elektromos modell alapját az egydiódás napelem modell ötparaméteres Lambert-féle  $W$ -függvényes explicit alakja adja. Így a modell a napelem egydiódás modelljére épül, és az egydiódás modell paramétereinek hőmérséklet- és fényintenzitás-függését figyelembe véve módosítja a napelem karakterisztikát az adott fény- és hőmérsékleti viszonyoknak megfelelően.

Kapcsolódó publikációk: [10],[E2],[E8]

## WP2

### Diffúz és direkt megvilágítás szimulálása

Megépítettünk egy állítható arányú, szórt és direkt fényt előállító megvilágító egységet, amellyel a különböző kültéri fényviszonyok szimulálhatók. A mérési elrendezés egy hűthető, fűthető mintabefogót is tartalmaz, amivel a napelem hőmérséklete beállítható, így a mérési elrendezéssel különböző jellemző időjárási viszonyok szimulálhatók. A diffúz besugárzás 0 és a  $400 \text{ W/m}^2$  között állítható. A szórt fényt előállító fényforrás különböző spektrumú teljesítmény LED-eket alkalmaz, amelyek fényét különböző arányban keverve a szórt fény spektrális teljesítményeloszlása is változtatható. A megvilágító egységet egy 60 cm átmérőjű integráló gömbbe szerelhetően alakítottuk ki, amely biztosítja a LED-ek fényének keveredését és az egyenletes, minden irányból azonos intenzitással érkező szórt besugárzást a vizsgált napelem felületén. A berendezés tartalmaz egy direkt sugárzást biztosító megvilágító egységet is, amellyel a direkt besugárzás  $200$  és  $1000 \text{ W/m}^2$  között változtatható. A direkt megvilágító egység a napsugárzás spektrumát LED-ek és halogén izzók fényének keverésével közelíti. A teljes mérési összeállítás számítógépről vezérelhető.

### Hőmérséklet- és fényintenzitás-függő áram-feszültség karakterisztika és spektrális válasz mérések

A projekt keretében kifejlesztett napelem modell villamos részmodelljének felállításához szükség van a napelemek hőmérséklet- és fényintenzitás-függő viselkedésének ismeretére. Ezek az adatok származhatnak hosszabb távú kültéri mérések kiértékeléséből, vagy célzott, laboratóriumi körülmények között végzett mérésekből. Ez utóbbiak előnye, hogy gyorsan és jól reprodukálható módon szolgáltatják a modellalkotáshoz szükséges adatokat. Az ilyen mérésekhez elkészült egy mérési összeállítás, amely a képes a vizsgált napelem-minták áram-feszültség karakterisztikáit a hőmérséklet és a fényintenzitás (besugárzás) függvényében felvenni. A kifejlesztett mérési környezet a vizsgált minták hőmérsékletfüggését teljesen automatikusan, számítógépről vezérelve veszi fel. A mérési összeállítás fokenként végzi el az áram-feszültség karakterisztikák vagy spektrális válaszfüggvények felvételét. Ez lehetővé teszi a hőmérsékletfüggés olyan pontos meghatározását, ami a modellalkotáshoz megfelelő, és biztosítja a szórványosan jelentkező mérési hibák kiszűrését. A besugárzásfüggést (fényintenzitás-függést)  $200 \text{ W/m}^2$ -es lépésközzel, a  $200$  és  $1400 \text{ W/m}^2$  közötti tartományban veszi fel a mérőberendezés. A megvilágító fej cseréjével a vizsgálandó minták hőmérsékletfüggő spektrális válaszfüggvénye is felvehető, amely a minták hőmérsékletfüggésének mélyebb vizsgálatára alkalmas.

## Rezgőkondenzátoros felületi potenciáltérképezés vékonyréteg napelem modulokon

Kisméretű CIGS napelem modulokon rezgőkondenzátoros felületi potenciáltérképezést végeztünk. A mérések során kiderült, hogy a felületi potenciáltérképezés hasznos kiegészítő minőségbiztosítási mérésenként szolgálhat a jelenleg használt képalkotó eljárások (IR termográfia és elektrolumineszcencia) mellett. A jelenleg használt eljárásokkal szemben a felületi potenciáltérképezéssel záróirányban előfeszített mintákon is kimutathatók a sötét jellegű hibák, illetve a sorba kötött cellák párhuzamos ellenállásainak és telítési áramának eltérései. Ez a lényegesen kisebb gerjesztő áramok miatt a minták kisebb hőterhelésével jár, így a minták és az vizsgálni kívánt hibák hőmérsékletfüggése nem befolyásolja a mérési eredményeket.

## Termikus tranziens mérések napelemeken

A projekt során sikeresen adaptáltuk napelem cellákra és modulokra az eredetileg IC-k és diszkrét félvezető eszközök tokozásának nem desruktív minősítésére kifejlesztett termikus tranziens mérési eljárást. Az egységugrás jellegű disszipáció gerjesztés nyomán fellépő hőmérsékleti tranziens válasz NID módszerrel (network identification by deconvolution) történő feldolgozása révén megállapíthatók a napelem termikus modellezésére szolgáló RC hálózat elemértékei (2. ábra). Ezen felül a mérési eredményekből elkülöníthetőek a konduktív és a konvektív, ill. sugárzásos hőátadás hatásai. A hőszugárzást ezen eredményekből egy hőmérsékletfüggő hőellenállásként lehet extrahálni, és a napelemek termikus modelljébe beépíteni. A termikus tranziens mérés így a minőségbiztosítási (delaminálódás, hővezető rétegek vizsgálata, stb.) célok mellett használható a napelemek termikus modell paramétereinek meghatározására. Ez fontos olyan esetekben, amikor a napelemek szerkezete nem, vagy csak részben ismert.

A napelemek megbízható és helyes termikus tranziens méréséhez a szokásos mérési eljárásokhoz képest több helyen is újítások voltak szükségesek. Napelemek, és főként napelem modulok esetében az eszközök nagy felülete miatt lényegesen nagyobb áramok szükségesek, ezért a termikus tranziens mérés során használt fűtőáramnak el kell érnie egy minimális felületi áramsűrűséget. A minimálisan szükséges áramsűrűségnél kisebb áramsűrűségek esetén a hibás mérési eredményeket, azaz a ténylegesnél nagyobb hőellenállás értéket kapunk. A nagyfelületű eszközök esetében nem hanyagolható el a szokásos tokozott félvezető eszközök esetében nem jelentős hőszugárzás sem, ami, ezért a mérési elrendezéseknél és a kiértékelésnél ezt is figyelembe kellett venni. Termikus tranziens méréseket több típusú napelemen végeztünk. Fontos eredményünk az is, hogy amorf szilícium napelemek esetén a termikus tranziens mérés csak kellő öregítés után szolgáltat helyes eredményt, a napelemek kezdeti degradációja ugyanis megváltoztatja a minták feszültségének hőmérsékleti együtthatóját, ami viszont meghamisítja a mért termikus impedancia görbéket (termikus tranziens görbéket).

Kapcsolódó publikációk: [3],[4],[5],[6],[8],[9],[11], [E3],[E4],[E5],[E6]

## WP3 mintakészítés

A projekt során különböző napelem típusokat vizsgáltunk:

- Kristályos szilícium alapú napelemek
  - o egykristályos szilícium napelemek
  - o multikristályos szilícium napelemek
  - o vékony fotoaktív réteggű napelemszerkezetek (egykristályos)
  - o félig átlátszó egykristályos napelemek
  - o mikrokristályos szilícium napelemek
- Amorf szilícium napelemek

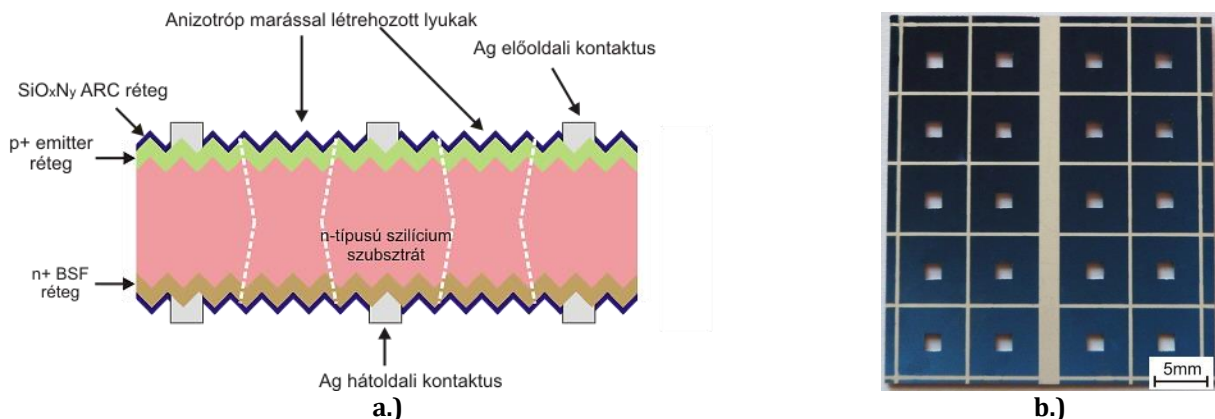
- CIGS napelemek
- Titán dioxid alapú festékekkel érzékenyített napelemek
  - o  $\text{TiO}_2$  nanorészecskéket tartalmazó pasztából felvitt titán dioxid réteges napelem
  - o Anodikus oxidációval előállított titán dioxid réteges napelem

A vizsgált minták közül egyeseket kereskedelmi forgalomból szereztünk be, néhányat pedig partnereinktől kaptunk vizsgálatra – ezen minták esetében csak mérésekhez szükséges előkészítő műveleteket kellett elvégezni. Három mintatípus esetében azonban a gyártástechnológia teljes lépéssorozatát is kidolgoztuk, és a mintákat a saját félvezető-technológiai laboratóriumunkban állítottuk elő.

### Félig átlátszó napelem minták

Célunk diffúz fényforrások esetén használatos áttetsző minták kialakítása volt. A használt alapanyagok <100> orientációjú, n-típusú, 280  $\mu\text{m}$  vastag Si egykristály szeletek voltak. Munkánk során új rétegekialakítási és rétegmegmunkálási eljárásokat, illetve új rétegszerkezeteket dolgoztunk ki.

Kutató munkánk során kidolgoztuk az n-típusú egykristályos szilícium alapú, félig átlátszó napelemek megvalósításához szükséges résztechnológiákat. Optimalizáltuk a felületi reflexiót csökkentő eljárást random piramisos felületstrukturálással és porlasztott szilícium-oxinitrid antireflexiós réteg alkalmazásával. Így a 400-1100 nm közötti hullámhossz tartományban az átlagos felületi reflexió értéke 2,5%-ra csökkenthető. Ez a reflexió érték az ipari cellák esetén mért értékekkel versenyképes. A napelemek kívánt átlátszóságát a teljes szilícium szeleten átmenő, nedves kémiai marással létrehozott lyukakkal értük el, szemben az eddigi ipari megoldásokkal. A lyukak mérete és sűrűsége az alkalmazott maszkoló réteg mintázatával változtatható. Vizsgáltuk az átmenő lyukak kialakításához szükséges anizotróp rétegmegmunkálási eljárást, amelyhez tetrametil-ammónium-hidroxid alapú marószert használtunk. Az így létrehozott struktúrák keresztmetszete a 3. ábrán látható.



3. ábra: Félig átlátszó napelem struktúra: a.) keresztmetszeti képe, b.) megvalósított napelem

### Vékony fotoaktív rétegű napelemek

Az alapanyag szinte minden tulajdonsága (felületi rekombinációsűrűség, kisebbségi töltéshordozók élettartama és diffúziós hossza, adalékolás) befolyásolja az elkészült napelem paramétereinek hőmérsékletfüggését. Az egyik, a hőmérsékletfüggést befolyásoló paraméter a fotoaktív réteg vastagsága, amelyet a felhasznált alapanyag mennyiségének csökkentése és a gyártási költségek csökkentése érdekében folyamatosan vékonyítanak. Az ilyen vékony fotoaktív rétegű napelemek előállítására egy olyan mintakészítési eljárást dolgoztunk ki, amellyel biztosítható, hogy az egyes napelem minták kizárólag a fotoaktív réteg vastagságában térnek el egymástól.

A fotoaktív réteg különböző rétegvastagságait az epitaxiális réteg lokális visszamarásával értük el, a szelet különböző helyein különböző mélységig végezve a marást. A megfelelő vastagságú fotoaktív

réteg kialakítása után következett az emitter réteg diffúzióval való kialakítása, az antireflexiós réteg növesztése és a fémezés.

### Festékekkel érzékenyített napelemek

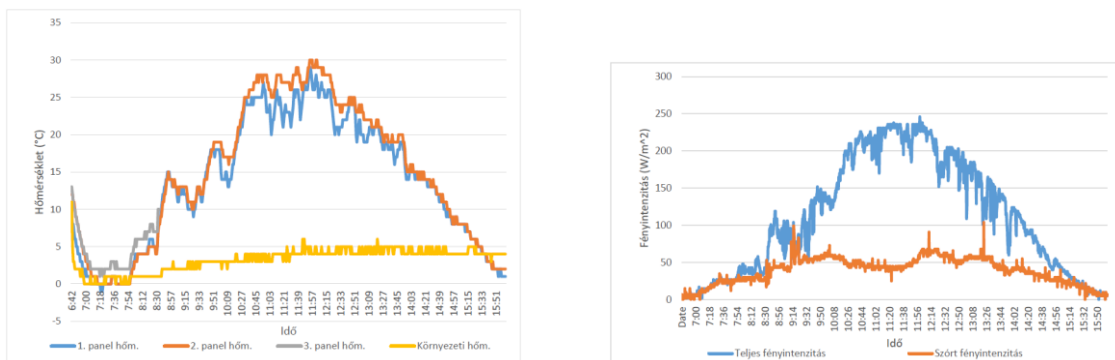
A projekt keretében laboratóriumunkban kidolgoztunk két olyan gyártástechnológiai lépéssort is, amelyek titán-dioxid alapú, festékekkel érzékenyített napelemek előállítására alkalmasak. Az egyik eljárás az elterjedt, nanoméretű titándioxid szemcséket tartalmazó paszták átlátszó vezető rétegre történő felvitelére és utólagos kiégetésére épült, míg a második eljárásnál a nanopórusos titán-dioxid réteget titán fólia anodikus oxidációjával állítottuk elő. Ezen második eljárás flexibilis napelemcellák készítésére is alkalmas. Mindkét esetben az N719 elnevezésű, ruténium alapú festékanyagot használtunk a napelemszerkezet fényérzékenyítésére, ellenelektrodaként pedig platina vékonyréteget használtunk. A pasztából felvitt titándioxid rétegek esetén a legjobb elért hatásfok 4,6 %, míg az anodizált nanopórusos titándioxid rétegből készült napelemek esetén 2,4 % volt. Mindkét érték kb. a fele az irodalomban megtalálható, jelenlegi legjobb kísérleti eredményeknek.

Kapcsolódó publikációk: [1],[2],[7],[E1], [E2], [E7]

### WP4 – kültéri mérőállomás

A mérőállomás megalkotásának célja a különböző technológiával készült napelem modulok normál üzemi körülmények közötti működésének vizsgálata volt. A hosszú távú, akár éves intervallumú méréseknek köszönhetően a többféle típusú napelem panelek olyan szintű összehasonlítása válik lehetővé, amely előzetes modellszámításokkal nagyon bonyolult lenne. Ezen felül a kültéri mérési adatok alapján verifikálhatók a korábban kifejlesztett napelem modellek. Közel azonos mérési feltételű időszakok kiválasztásával az öregedés hatásai és a hatásfokértékek idővel bekövetkező csökkenése is vizsgálható.

A mérőállomás a napelemek hőmérsékletét és a kültéri hőmérsékletet 1 °C pontossággal, percenként rögzíti. Szintén percenként rögzíti 1024 pontban a bekötött napelemek karakterisztikáját, a globális és szórt besugárzást, a beérkező fény spektrumát (6 db 100 illetve 200 nm-es tartományra bontva). A megvalósított mérőrendszer által szolgáltatott adatokra mutat példát a 4. ábra.



4. ábra: A kültéri mérőállomás által szolgáltatott adatok egy őszi napon

Kapcsolódó publikációk: [10][E8]

## Összefoglaló

A projekt során kifejlesztett, kombinált elektro-termikus modell egyrészt alkalmas pontosabb energia-termelés előrejelző modell létrehozására, mivel figyelembe tudja venni a hőmérsékletváltozás okozta teljesítményváltozást, másrészt a napelem modulok hőkapacitásának figyelembevételével rövidtávú tranziens viselkedés szimulációját is lehetővé teszi. Mind a termikus, mind az elektromos modell félempirikus felépítésű: a modellezéshez szükséges paraméterek modulokon vagy cellákon végzett mérésekből meghatározhatóak

A kifejlesztett karakterizálási eljárások egyrészt biztosíthatják modellezéshez a szükséges bemeneti paramétereket, másrészt a napelemek hőmérséklet- és fényintenzitás-függésének mélyreható vizsgálatára is alkalmasak. A napelemekre adaptált termikus tranziens mérés és a felületi potenciáltérképezés értékes addicionális mérési technikának bizonyult a napelemek minőségbiztosítása során is. Megmutattuk, hogy a termikus tranziens mérés jól használható a napelem modulok környezet felé történő hő átadásának optimalizálásában is, ami hozzájárulhat a hatásfok, és a termelt energiamennyiség növeléséhez. Egy ilyen jellegű optimalizálás lényegesen olcsóbb, mint a félvezető technológiai változtatásokkal elérhető hatásfoknövelés.

A projekt során kifejlesztett mérőállomás a napelemek teljes karakterisztikáját rögzíti, a szórt és a teljes fénybesugárzás értékével, valamint a teljes besugárzás spektrumával együtt. Ezen adatok együttes mérése egyedülálló, és számos új modellezési megközelítés alapját képezheti.

Budapest, 2016. február 2.

Ress Sándor László

## Közlemények

- [1] E. Bándy, M. Rencz: Alternative technology used to manufacture semitransparent monocrystalline silicon solar cells, *Microsystem Technologies*, Vol. 19, No. 6, 2013, pp. 819–827
- [2] E. Bándy, Á. Földváry, M. Rencz: The effect of heat treatment on spin-on oxide glasses in solar cell application, 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 25-27 Sept. 2013, Berlin, Germany, pp. 297-300.
- [3] Hantos Gusztáv, Berényi Csaba, Tinódi Péter, Plesz Balázs: LED-ek alkalmazása napszimulátorokban, absztrakt, IV. LED Konferencia, 2013. február 5-6, Budapest, 2013
- [4] B. Plesz, S. Ress: Investigation of the thermal behaviour of thin crystalline silicon solar cells 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 25-27 Sept. 2013, Berlin, Germany, pp. 15-20
- [5] B. Plesz, G. Hantos: Thermal behavior of crystalline thin film silicon solar cells, *International Journal of Renewable and Sustainable energy*, Vol. 2, No. 3, 2013, pp.115-119
- [6] B. Plesz, S. Ress, P. G. Szabó, G. Hantos, D. Dudola: Issues of Thermal Transient Testing on Photovoltaic Modules, *Proceedings of the 20th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'14)*, 24-26 Sept 2014, London, UK, pp.1-4
- [7] E. Bándy, M. Rencz: Enhanced semitransparent monocrystalline silicon solar cell structure, *Proceedings of the 14th Biennial Baltic Electronics Conference*, 6-8 Oct 2014, Tallinn, Estonia, pp. 29-32.
- [8] B. Plesz, A. Vass-Varnai: Characterization of solar cells by thermal transient testing, *Microelectronic Journal*, Vol. 45, No. 12, 2014, pp. 1710–1715
- [9] B. Plesz, P. G. Szabó, D. Dudola, G. Hantos, S. Ress: Possibilities and Challenges of Thermal Transient Testing as a Characterization Method for Photovoltaic Devices, 31st European PV Solar Energy Conference and Exhibition: EU PVSEC 2015, 14-18 September 2015, Hamburg, pp. 2031-2034
- [10] B. Plesz, Zs. Kohári, P. G. Szabó, A. Timár, Gy. Bognár: Novel Semi-Empirical Combined Electro-Thermal Model for Solar Modules, 31st European PV Solar Energy Conference and Exhibition: EU PVSEC 2015, 14-18 September 2015, Hamburg, pp. 2022-2026
- [11] T. Lavrenko, K. Marzinzig, T. Walter, B. Plesz, S. Ress: On Application of the Vibrating Kelvin Probe Method for Quality Control of  $\text{Cu(In,Ga)(Se,S)}_2$  Thin Film Solar Modules, *Progress in Photovoltaics*, accepted, 2016, in print

## Egyéb publikációk

### PhD értekezések

- [E1] E.Földváry-Bándy: Félig átlátszó egykristályos szilícium alapú napelem cella technológiája és vizsgálata, PhD értekezés, BME, Budapest, 2015
- [E2] Plesz Balázs: Kristályos szilícium alapú, vékony fotoaktív rétegű napelem szerkezetek hőmérsékletfüggésének vizsgálata, benyújtott PhD értekezés, BME, Budapest, 2016

### Szakedolgozatok, diplomatervek, TDK dolgozatok

- [E3] Lucsik Bertalan: Termikus tranziens mérés adaptálása napelemek minősítésére, BSc szakdolgozat, BME, Budapest, 2012
- [E4] Tinódi Péter: Megvilágító egység tervezése környezeti körülményeket szimuláló napelem-minősítő rendszerhez, MSc diplomaterv, BME, Budapest, 2014
- [E5] Dudola Dóra Antónia: Termikus tranziens tesztelés alkalmazhatósága napelemmodulok vizsgálatára, BSc szakdolgozat, BME, 2014
- [E6] Dudola Dóra Antónia: Termikus tranziens mérés alkalmazási lehetőségei napelemmodulok termikus karakterizálásában, TDK dolgozat, BME, 2014 OTDK 1. helyezett
- [E7] Ankit Goyal: Development of Flexible Dye Sensitized Solar Cells based on Anodized Titania, Master Thesis, BME, Budapest, 2015
- [E8] Pere Tamás: Kültéri mérőállomás fejlesztése napelemmodulok hosszútávú vizsgálatához, MSc diplomaterv, BME, Budapest, 2015