

PIII napelemek beltéri alkalmazása

KUTHI EDVÁRD, PINTÉR ISTVÁN, MOHÁCSY TIBOR, ÁDÁM ANTALNÉ,
SZENTPÁLI BÉLA, BÁRSONY ISTVÁN

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
kuthi@mfa.kfki.hu

Lektorált

Kulcsszavak: napelem, c-Si, PIII, beltéri világítás, kevert fény

A cikk a PIII (Plazma Immerziós Ionimplantáció) eljárással adalékolt kristályos Si napelemek területén elért legújabb kutatási eredményeket mutatja be. Összehasonlítjuk az amorf Si és a hagyományos kristályos Si napelemet az általunk beltéri világításra tervezett kristályos Si napelemmel különböző fényviszonyok között. Megmutatjuk, hogy a valós körülmények között gyakori kevert fényű megvilágítás esetén az általunk kifejlesztett kristályos Si beltéri napelem cella ígéretesen teljesít.

1. Bevezetés

A beltéri napelemek alkalmazása egyre fontosabbá válik az alacsony fogyasztású vezetékmentes eszközök energiaellátásának biztosításában. Az ilyen felhasználások esetén fontos követelmény a felhasznált felület minimalizálása és a beltéri fény minél hatékonyabb energia átalakítása. Jelenleg a legjobban elterjedt beltéri fényforrás a fluoreszcens lámpa. Az ilyen lámpák fényspektruma jól illeszkedik az amorf szilícium (a-Si) napelemek érzékenységi görbéjéhez [1]. Napfény spektrumára azonban, még ha üveglapon is halad keresztül, az a-Si napelemek érzékenysége igen alacsony. Egy ablakkal rendelkező szobában a napelemre érkező fény a szűrt kültéri napfénynek és a szobavilágítás fluoreszcens fényének a keveréke. Ezen megvilágítási környezetben az ultravékony emitterű kristályos szilícium napelem megfelelő eszköz lehet.

Ilyen beltéri megvilágítási feltételekhez – mikor például a mesterséges fény spektruma keveredik az alacsony intenzitású szűrt napfényvel – a napelemeket speciálisan kell megtervezni. A fluoreszcens fénycsövek fényemissziójának legintenzívebb része a 400-700 nm közötti fényhullámhossz tartományba esik [2], míg a napfény energiája köztudottan ennél jóval szélesebb spektrumban oszlik el, adott esetben gyenge háttérfényként. Ezen okok miatt a beltéri napelemeknek a kék spektrális tartományban érzékenyebbeknek kell lenniük. Ebben a cikkben a beltéri kristályos szilícium napelem technológia fejlesztését és a cellák vizsgálati eredményeit mutatjuk be.

A napelemeknek nagyon vékony emitter réteggel kell rendelkezniük, megfelelő antireflexiós réteggel és újra átgondolt fémezéssel. Ráadásul szembesülnünk kell a felületi rekombináció erősebb befolyásával, mivel a fényintenzitás nagyságrendekkel kisebb, mint a kültérre jellemző megvilágítás esetén.

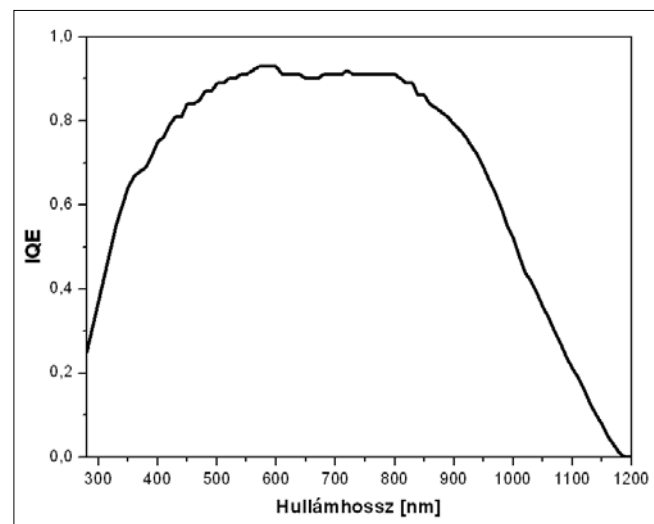
Jól ismert az a tény, hogy a kültérre tervezett kristályos Si napelemek hatásfoka a csökkenő fényintenzitással csökkenő tendenciát mutat [3-6]. Ennek ellenére megmutatjuk, hogy egy megfelelően megtervezett bel-

téri napelem hatásfoka a beltéri megvilágítás mellett nagyobb lehet, mint a kültéri napfényre.

A jelenlegi munka célja olyan, megfelelően sekély emitterű kristályos Si napelem cella kifejlesztése, amely a beltéri mesterséges fényre és a zárt ablakon beszűrődő napfényvel megvilágított szobában előforduló kevert megvilágításra nagy fényátalakítási hatásfokkal rendelkezik. Az emittereket Plazma Immerziós Ionimplantáció (PIII) technológiájával hoztuk létre, melyet először az MFA-ban alkalmaztunk napelem létrehozására [7].

Ezzel a technológiával 50-100 nm mélységű emittereket is könnyen elő lehet állítani [8]. Az alkalmazott vákuumkamra alkalmas akár 300 mm átmérőjű szeletek kezelésére is. A PIII adalékolási folyamat ideje rövid (jellemzően néhány másodperc), kis energia igényű, költséghatékony, a környezetet kevésbé terhelő technológia, így akár tömegtermelésre is alkalmas [9]. Megfelelő PIII és hőkezelés hatására a cellában nagyon sekély emitter keletkezik alacsony kristályhiba sűrűséggel [10-11]. A napelem létrehozásában további nehézséget jelentett az ultra sekély emitter réteghöz illeszkedő jó, ohmikus kontaktus készítése.

1. ábra
PIII napelem jellegzetes belső kvantumhatásfoka



Az előzetes kísérletek megmutatták, hogy az így létrehozott kristályos Si napelem struktúrák a hagyományos módon létrehozottakhoz képest nagyobb belső kvantumhatásfokkal (IQE) rendelkeznek a fluoreszcens lámpafény spektrális tartományában (1. ábra).

2. Kísérletek

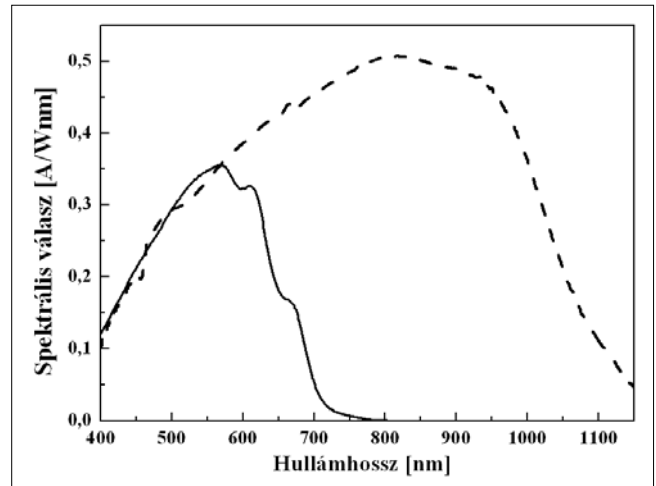
A PIII beltéri napelemeket 75 mm-es p-típusú <100> orientáltságú, 10-15 Ωcm ellenállású kristályos Czochralsky-szilícium szeleteken alakítottuk ki. Egy cella 4,592 cm² területű, a legjobb teljesítményt 9 fémcsíkos fémezési ábrával sikerült létrehozni [2]. A p-n átmenetet foszfor adalékolással készítettük PIII technológiával 15%-os H₂:PH₃ gázelegyenben 1 mbar nyomáson. Ezután a szeleteket 600°C-on 10 percig formáló gázban, majd 930°C-on 5 percig O₂ atmoszférában hőkezeltük. A hőkezelés alatt nőtt foszforszilícát üveget (PSG) lemartuk. Az emitter-oldalon az antireflexiós SiO₂ réteget CVD technológiával választottuk le. Ennek vastagságát úgy optimalizáltuk, hogy 550 nm hullámhosszú fényen legyen a transzmissziós maximuma.

Az 1 μm vastag Al kontaktusokat vákuumgőzöléssel hoztuk létre. A hátoldali kontaktust leválasztása után 450°C-on 30 percig formáló gázban szintereltük. Az előoldali kontaktus ábrát lift-off technikával, hőkezelés nélkül alakítottuk ki. Mivel a beltéri fény intenzitása a kültérihez képest sokkal kisebb, a napelemből kinyert áram is jelentősen kisebb. Így a soros ellenállásnak kisebb befolyása van a hatásfokra, míg a kis áramok miatt a párhuzamos vezetés hatása jelentős [12]. Ezért az azonos négyzetes ellenállású emitterrel rendelkező kültéri napelemekéhez képest kevesebb fémcsíkot alkalmaztunk. Több különböző fémezési ábrát próbáltunk ki, melyek 9, 11, 13 és 17 db 200 μm széles fémcsíkkal rendelkeztek. Ezek közül a beltéri fény hatására a 9 csíkkal rendelkező napelem teljesített a legjobban, míg AM1.5 megvilágítás (átlagos kültéri napfény 1 kW/m²-re normált sugárzási spektruma) esetén a 11 fémcsíkkal rendelkező napelem mutatta a legnagyobb hatásfokot [2].

Megmértük és kiértékeljük a cellák sötét dióda karakterisztikáját, napelem karakterisztikáját AM1.5 kültéri és fluoreszcens beltéri megvilágítás (Toshiba Watt Brighter FCL20W/18 fénycső) esetén és meghatároztuk a spektrális válaszokat is.

3. Mérési és modellezési eredmények

A PIII beltéri napelem cella mért spektrális válasza egy amorf Si beltéri napelemmel összehasonlítva a 2. ábrán látható. A referencia a kereskedelemben kapható amorf napelemek közül az általunk ismert legjobb hatásfokú. A különbség a két ábra között szembetűnő: 570 nm hullámhosszig a két válaszfüggvény együtt emelkedik, majd az amorf cella válaszfüggvénye gyorsan lecsökken, míg a PIII cella válaszfüggvénye 800 nm-ig nő és csak ez után romlik le. Ebből következik, hogy a nap-



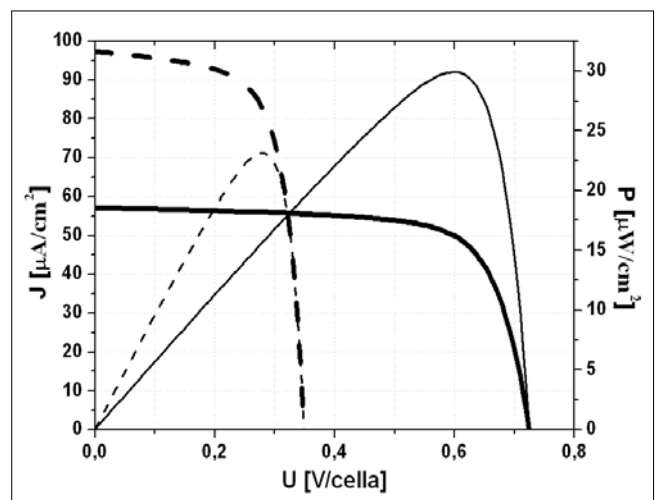
2. ábra
Beltéri napelemek spektrális válasz ábrája: PIII cella (szaggatott) és referencia a-Si cella (folytonos). A spektrális válasz: egy optikai érzékelő reakciója, mértéke az érzékelő válaszána (generált áram) és az egységnyi hullámhossz-tartományban besugárzott teljesítménynek a hányadosa.

elemet érő fény spektrumától függően a PIII cella az a-Si cellával összehasonlítva vagy közel azonos, vagy nagyobb áramot generál.

Beltéri mesterséges fényvel megvilágítva (700 lx) a napelem karakterisztikák összehasonlítása a 3. ábrán látható. Ahogy várható volt, a PIII cella rövidzárási árama nagyobb, mint az a-Si referencia cella esetén. Az üresjárás feszültsége azonban kisebb, hiszen a tiltott sávja is kisebb, ezért végül is a PIII beltéri napelem cella maximális teljesítménye is kisebb mint az amorf Si-é. Ilyen megvilágítás esetén tehát az amorf Si cella optimális terhelés esetén nagyobb hatásfokot tud elérni.

A spektrális válaszgörbék alapján azt várhatjuk, hogy szélesebb spektrumú fényre a PIII cella árama az amorf Si cellához képest annyira megnő, hogy ez a teljesítményét is megnövelheti. Ezért a beltéri cellákat szab-

3. ábra
Beltéri napelemek megvilágított állapotban mért karakterisztikái (vastag vonal) és teljesítmény görbéi (vékony vonal) fluoreszcens lámpafénnyel megvilágítva (700 lx): JB55 PIII cella (szaggatott) és a-Si cella (folytonos).



Minta neve	Fény	η [%]	FF	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} /cella [V]	J_{op} [mA/cm ²]	V_{op} /cella [V]	P_{max} [mW/cm ²]
JB55 ele9	AM1.5	7,05	0,66	21,16	0,508	19,27	0,366	7,053
JB55 ele11	AM1.5	8,55	0,71	24,62	0,489	22,79	0,375	8,551
a-Si	AM1.5	1,32	0,33	4,56	0,885	2,52	0,522	1,318
JB55 ele9	Beltéri 700 lx	12,05	0,68	9,74E-02	0,349	8,33E-02	0,278	2,31E-02
JB55 ele11	Beltéri 700 lx	11,12	0,67	8,73E-02	0,367	7,31E-02	0,292	2,14E-02
a-Si	Beltéri 700 lx	15,58	0,72	5,71E-02	0,725	4,98E-02	0,601	2,99E-02

1. táblázat A beltéri napelemek paraméterei különböző megvilágítási esetekre:

η a cella hatásfoka, FF a kitöltési tényező, J_{sc} a rövidzárási áramsűrűség, V_{oc} az üresjárás feszültség, P_{max} a maximális kivehető teljesítmény, J_{op} és V_{op} pedig a P_{max} -hoz tartozó áram és feszültség értékek.

ványos AM1.5 kültéri megvilágításra is megvizsgáltuk. Az így kapott napelem karakterisztikák és teljesítmény görbék a 4. ábrán láthatóak. Az amorf Si cella nagy soros ellenállásának következtében árama tovább csökkent és jelleggörbéje is ellaposodott, ami további teljesítmény csökkenéshez járult hozzá. Ezért a PIII cella teljesítménye és hatásfoka napfény esetére jóval nagyobb lett a referencia a-Si cellához képest.

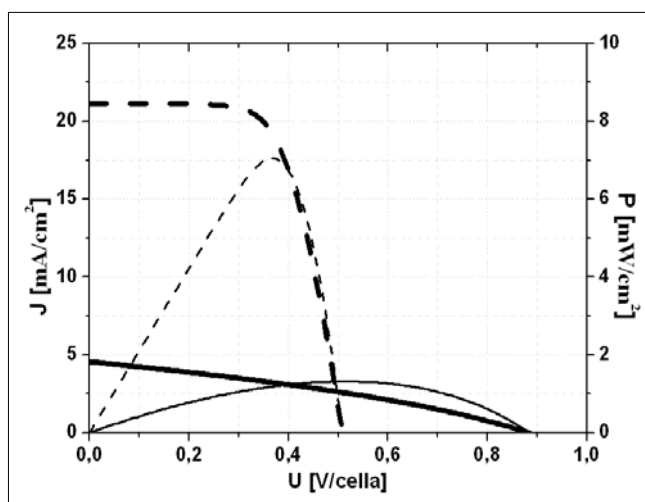
A beltéri napelemek karakterisztikáiból meghatározott paramétereket a JB55-ös cellákra (9 és 11 vonalas fémábrával), illetve a referencia amorf Si cellára fluoreszcens (700 lx) és kültéri (AM1.5) megvilágítás esetében az 1. táblázat foglalja össze. Látható, hogy a beltérre tervezett cellák hatásfoka fluoreszcens megvilágítás esetében nagyobb (11,12-15,58%), mint a kültéri megvilágítás hatására (1,32-8,55%). Leginkább az a-Si cella hatásfoka csökkent le (15,58%-ról 1,32%-ra) a rá jellemző spektrális válaszfüggvény és a nagy soros ellenállás következtében. A JB55 minták esetén a fluoreszcens fényre a 9 vonalas fémábrájú cella bizonyult jobbnak (12,05%), míg kültéri fényre a 11 vonalas fémábrájú teljesített jobban (8,55%).

4. ábra

Beltéri napelemek karakterisztikái (vastag) és teljesítmény görbéi (vékony)

AM1.5 megvilágítással (100 mW/cm²):

JB55 PIII cella (szaggatott) és a-Si cella (folytonos).



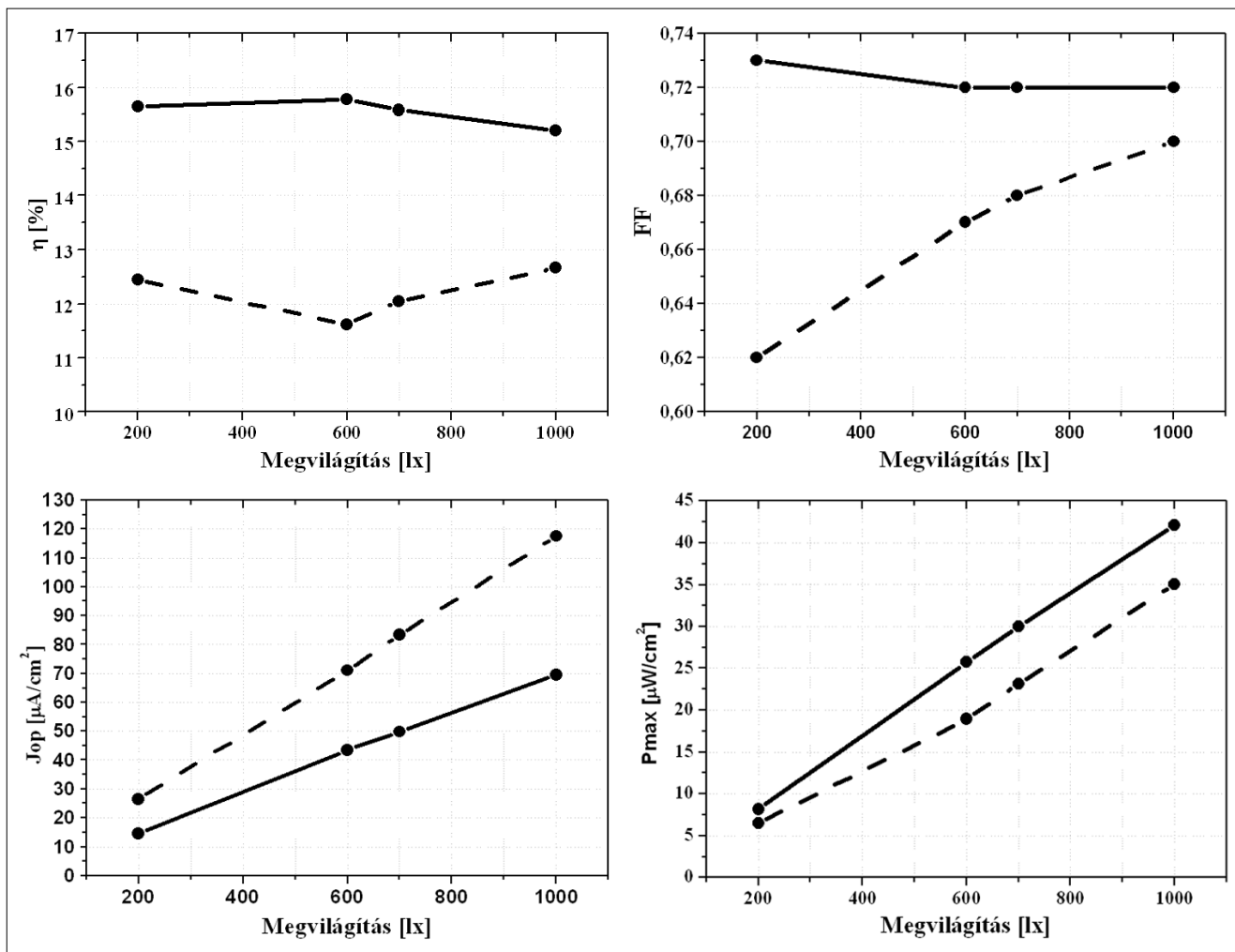
A napelem cellákat különböző erősségű fluoreszcens beltéri megvilágításnál is megvizsgáltuk, az így kapott paraméterek összehasonlítását a következő oldali, 5. ábrán láthatjuk (hatásfok, kitöltési tényező, maximális teljesítmény és a hozzá tartozó áramsűrűség). Növekvő megvilágítás esetén a felvett áram és teljesítmény lineárisan nő, a kitöltési tényező (FF) a PIII cella esetében nő, míg az a-Si cella esetén enyhén csökken. A hatásfok a PIII cella esetén növekvő megvilágításra 600 lx-ig csökken, majd felette növekszik. A referencia a-Si cella esetében 600 lx-ig enyhén nő, azon túl fokozatosan csökken. Az 1000lx-os megvilágításig a hatásfok mindvégig a PIII cellánál nagyobb. A tendencia arra utal, hogy nagyon erős fluoreszcens beltéri megvilágítás esetén a PIII cella hatásfoka nagyobbá válhat a referencia a-Si celláénál. Mindenesetre átlagos erősségű fluoreszcens beltéri megvilágításnál a referencia amorf Si cella fényátalakítása hatékonyabb.

A spektrális válasz és az AM1.5 napfényre kapott napelem karakterisztikák arra ösztönöztek, hogy megvizsgáljuk a viselkedéseket arra a praktikus esetre is, amikor a fény többféle forrásból, a Napból és a fluoreszcens beltéri világításból egyaránt érkezik. Ilyen uralkodik egy olyan helyiségben, ahol a fénycsóvilágítás mellett van ablakon beszűrődő gyenge intenzitású napsugárzás is.

Négyféle kevert megvilágítást vizsgáltunk meg két különböző erősségű napfény (szobában mért szórt napfény, illetve AM1.5 fény 1% intenzitással) és kétféle beltéri fluoreszcens fény (150 lx szobavilágítás és 700 lx asztali lámpa) felhasználásával.

Az elnevezések a következők:

- Sp1: szobában mért szórt napfény + 150 lx fluoreszcens szobavilágítás (376,25 μ W/cm²)
- Sp2: szobában mért szórt napfény + 700 lx fluoreszcens asztali lámpafény (495,06 μ W/cm²)
- Sp3: 1% intenzitású AM1.5 napfény + 150 lx fluoreszcens szobavilágítás (1066,6 μ W/cm²)
- Sp4: 1% intenzitású AM1.5 napfény + 700 lx fluoreszcens asztali lámpafény (1185,4 μ W/cm²)



5. ábra Beltéri napelemek paraméterei különböző erősségű fluoreszcens beltéri megvilágítás esetében: hatásfok (η), kitöltési tényező (FF), maximális teljesítmény (P_{max}) és a hozzá tartozó áramsűrűség (J_{op}) JB55 PIII cellára (szaggatott) és a-Si referencia cellára (folytonos).

Ezúttal három napelem cellát hasonlítottunk össze:
 – a JB55 PIII cella 9 vonalas fémábrájú változatát,
 – a referencia a-Si cellát és
 – egy kristályos Si kültéri napelem cellát (c-Si), mint referenciát.

Mindhárom cella mért I-V karakterisztikájához görbét illesztettünk, majd a mért spektrális válaszok segítségével a különböző kevert megvilágításokra adott választ kiszámítottuk és értékeltük. Az eredményeket a 2. táblázatban láthatjuk.

2. táblázat A cella modellek alapján számított napelem paraméterek különböző kevert megvilágítás esetén

Minta	Fény	η [%]	ff	J_{sc} [$\mu A/cm^2$]	$V_{oc}/cell$ [mV]	J_{op} [$\mu A/cm^2$]	$V_{op}/cell$ [mV]	P_{max} [$\mu W/cm^2$]
JB55ele9	Sp1	8	0,69	122	356	105	283	30
a-Si	Sp1	14,6	0,75	98	748	88	619	55
c-Si	Sp1	7,2	0,63	108	397	90	298	27
JB55ele9	Sp2	8,3	0,69	162	366	141	292	41
a-Si	Sp2	15,6	0,75	135	761	122	632	77
c-Si	Sp2	7,5	0,64	142	410	120	311	37
JB55ele9	Sp3	8	0,71	309	386	274	311	85
a-Si	Sp3	6,8	0,75	128	759	116	629	73
c-Si	Sp3	7,4	0,67	270	440	232	341	79
JB55ele9	Sp4	8,3	0,72	349	390	311	314	98
a-Si	Sp4	8	0,75	165	769	150	635	95
c-Si	Sp4	7,7	0,67	304	445	263	346	91

Az első két kevert fényre magasan az amorf Si referencia cella bizonyult a legjobbnak (14,6-15,6%), míg a második két kevert fényre a PIII cella mutatta a legjobb hatásfokot (8-8,3%). A kültéri referencia cella (c-Si) mind a négy kevert megvilágítási esetben kisebb hatásfokú volt a PIII cellához képest.

4. Következtetések

A mérési és modellezési eredmények arra utalnak, hogy a valós körülmények között gyakori kevert fényű megvilágítás esetén az általunk kifejlesztett kristályos Si beltéri napelem cella ígéretes.

További javulás érhető el a fémezés javításával (soros ellenállás csökkentése), illetve a felületi rekombináció csökkentésével (jobb passzivalással). A soros ellenállás csökkentésére az általunk alkalmazott sekély emitter esetén jó megoldás a szelektív emitter, azaz a fémezés alatt közvetlenül mélyebb és erősebben adalékolt n-típusú réteg alkalmazása [13].

A legújabb kísérletek azt mutatják, hogy beltéri napelem cellán szitanyomtatott kontaktus is alkalmazható közvetlenül a sekély emitter rétegen, megfelelően nagy párhuzamos ellenállással, jó hatásfokú beltéri napelem karakterisztikával. Intézetünkben jelenleg ezek további kutatása folyik.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás elindításáért és a fejlesztésben való hathatós támogatásért köszönet illeti a Tateyama Kagaku Ltd.-et, amely nélkül ez a munka nem jöhetett volna létre. A kutatást a 3/025/2001 sz. NKFP projekt is támogatta.

Irodalom

- [1] R.O. Bell,
"Charge collection and spectral response of amorphous-silicon solar cells",
Applied Physics Letters, Vol. 36., 1 June 1980,
pp.936–938.
- [2] E. Kuthi, Á. Németh, I. Pintér, Y. Makita,
B. Szentpáli, I. Bársony,
"PIII solar cell with self-doping contacts for indoor application",
Proc. of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC 2006),
pp.1057–1059.
- [3] N.H. Reich, W.G.J.H.M. van Sark, E.A. Alsema,
S.Y. Kan, S. Silvester, A.S.H. van der Heide,
R.W. Lof, R.E.I. Schropp,
Weak Light performance and spectral response of different solar cell types,
Proc. of the 20th EU PVSEC 2005,
(Eds.: W. Palz, H. Ossenbrink, P. Helm),
WIP-Renewable Energies, Munich, Germany, 2005.
pp.2120–2123.
- [4] J. F. Randall, J. Jacot,
"Is AM1.5 applicable in practice?
Modelling eight photovoltaic materials with respect to light intensity and two spectra",
Renewable Energy, Vol. 28., No.12., October 2003.
pp.1851–1864.
- [5] S. Keller, S. Scheibenstock, P. Fath,
G. Willeke, E. Bucher,
"Theoretical and experimental behavior of monolithically integrated crystalline silicon solar cells",
J. of Applied Phys., Vol. 87., No.3., 1 Februar 2000.
pp.1556–1563.
- [6] S.Y. Kan,
"Energy Matching – Key towards the design of sustainable photovoltaic powered products",
PhD thesis, Delft University of Technology,
Delft, The Netherlands, 2006.
- [7] I. Pintér, M. Ádám, Cs. Dücső, N.Q. Khanh, I. Bársony,
"Plasma immersion doping for Si solar cell application",
Supplément á la Revue: Le Vide No.275,
Janvier-Février-Mars (1995), p.410.
- [8] I. Pintér, A.H. Abdulhadi, Zs. Makaró, N.Q. Khanh,
M. Ádám, I. Bársony, J. Poortmans, Hai-Zhi Song,
G.J. Adriaenssens,
"Plasma Immersion Ion Implantation for shallow junctions in Silicon",
Applied Surf. Science 138-139. (1999),
pp.224–227.
- [9] I. Pintér, A.H. Abdulhadi, Cs. Dücső, I. Bársony,
J. Poortmans, S. Sivoththaman, H.F.W. Dekkers,
G.J. Adriaenssens,
"Silicon Solar Cells prepared by PIII-RTP technique"
Proc. of the Int. Conference held in Glasgow, UK,
1-5 May 2000, Vol.II, pp.1743–1646.
- [10] Shaaban E.R., Lohner T., Pintér I., Petrik P.,
Khanh N.Q., Horváth Z.E., Gyulai J.,
"Characterization of near surface region of plasma immersion ion-implanted silicon using Rutherford backscattering spectrometry, transmission electron microscopy and spectroscopic ellipsometry",
VACUUM 71. (1-2), 9 May 2003, pp.27–31.
- [11] Á. Németh, I. Pintér, Z. Lábadi, A. Tóth,
S. Püspöki, I. Bársony,
Proc. of the 21st EU PVSEC (2006), 2DV.2.32.
- [12] Green M.,
Solar Cells Operating Principles,
Technology and System Applications,
University of New South Wales (1982), pp.96–97.
- [13] Kuthi E.B.,
"Szelektív emitteres kristályos napelemek és az önadalékoló kontaktus",
Híradástechnika, Vol. LIX., 2004/1., pp.31–42.