

MONOKRISTALINIO SILICIO SAULĖS ELEMENTŲ CHARAKTERISTIKŲ  
VALDYMAS AKYTOJO SILICIO SLUOKSNIURamūnas Mitkevičius<sup>1</sup>, Viktor Zagadskij<sup>2</sup>, Eugenijus Šatkovskis<sup>3</sup>*Vilniaus Gedimino technikos universitetas**El. paštas: <sup>1</sup>rmitkevicius@gmail.com; <sup>3</sup>eusat@vgtu.lt*

**Santrauka.** Šiame darbe tiriama akytojo silicio darinių poveikis saulės elementų elektrinėms charakteristikoms: nuosekliajai varžai, voltamperinių charakteristikų formai. Parodyta, kad pagaminus silicio saulės elemente akytojo silicio sluoksnį, galima veikti (valdyti) saulės elementų voltamperines charakteristikas ir elemento nuosekliają elektrinę varžą. Nustatyta, kad tiriamajame bandinyje suformavus akytojo silicio sluoksnį, apkrovos voltamperinės charakteristikos užpildos rodiklis padidėjo 1,15 karto, o maksimali elemento kuriama ir apkrovos metu atiduodama elektros energijos galia – 1,19 karto. Tiek pat 1,19 karto padidėjo saulės elemento šviesos konversijos į elektros energiją efektyvumas.

**Reikšminiai žodžiai:** silicio saulės elementai, akytasis silicis, voltamperinė charakteristika.

**Įvadas**

Saulės energijos fotoelektrinių elementų tyrimas, tobulinimas ir pramoninė gamyba pastaraisiais metais patiria neregėto masto proveržį. Stebėtinais tempais padidėjo ir toliau plečiasi saulės elementų, fotoelektros modulių pramonė ir fotoelektros elektrinių statyba. Ispūdingų laimėjimų pasiekta ne tik tiriant eksperimentinius gaminius, bet ir serijiniu būdu gaminant saulės elementus, saulės elementų modulius (baterijas). Remiantis naujausių straipsnių duomenimis, serijiniu būdu gaminamų saulės elementų našumas pasiekė 19,2 %. (Solar A PV Magazine 2011). Lyginant su visu fotoelektros gaminių asortimentu dažniausiai saulės elementai buvo gaminami iš monokristalinio silicio. Gaminant silicio saulės elementus ruošiniams naudojamos boru legiruoto *p*-tipo silicio plokštės. Dėl plataus silicio naudojimo mikroelektronikos pramonėje tokių ruošinių gamyba yra pigi ir gerai išvystyta. Nors silicio saulės energijos elementų konversijos efektyvumo rodiklio viršutinė riba yra tik 30 %, tačiau dėl daugelio pranašumų jie laikomi perspektyviausiais ateities fotoelektros elektrinėse (Green 2003). Eksperimentinių monokristalinio silicio saulės elementų pasiektas 24,4 % konversijos efektyvumas (Zhao *et al.* 1998, Miles *et al.* 2007). Tačiau pramoninėje gamyboje jis paprastai siekia tik 15–17 %. Todėl teorinė galimybė ieškoti naujų būdų didinti fotoelektrinių silicio saulės elementų našumą išlieka vienas aktualiausių fotoelektros mokslo ir technologinių uždavinių. Dideles viltis mokslininkai deda į nanotechnologijų naudojimą saulės elementams gaminti. Silicio šviesos sugerties koeficientas, lyginant su vertikalią draudžiamą energijų juostos puslai-

dininkiais, yra santykinai mažas. Dėl to egzistuoja optimali saulės šviesos sugerties problema, lemianti, kad rekomenduojamas silicio saulės elemento storis būtų ne mažesnis kaip 200 mm. Šviesos sugertį saulės elementuose galima pagerinti, taikant naujausias nanotechnologijas (Sang-Kuyn *et al.* 2009). Straipsnyje teigiama, kad silicio nanokristalai Saulės šviesos mėlynos–žalios spektro dalies sugertį silicio saulės elemente padidina iki 14 kartų. Viena iš plačiausiai tyrinėjamų silicio nanotechnologijos sričių yra „akytojo silicio“ technologija. Jos esmė yra tokia: išskaidant silicio medžiagą fluoro rūgšties ir etilo (ar kito komponento) mišiniu elektrolite gaunamas akytasis silicis, pasižymintis išskirtinėmis savybėmis (Cahnam 1990, Lehmann, Gösele 1991; Lehmann 2002). Technologinis procesas gali būti valdomas keičiant net kelis skirtingus parametrus: medžiagos legiravimo laipsnį, laidžio tipą, išskaidymo srovę ir laiką, apšviečiant arba neapšviečiant išskaidomą paviršių. Vieni pirmųjų bandymų akytąjį silicį naudoti saulės elementams gaminti aprašyti darbuose (Grigoros *et al.* 1995; Pačebutas *et al.* 1997). Šiuose darbuose akytojo silicio sluoksnis buvo pritaikytas gaminti dangai, mažinančiai krentančios šviesos atspindį. Pagaminus akytojo silicio sluoksnį, saulės energijos konversija silicio saulės elemente padidėjo 21–28 %, lyginant su pradine verte, absoliuti vertė siekė iki 11 %. Kitame darbe parodyta, kad akytojo silicio sluoksnis saulės elemento paviršiuje gali veikti kaip paviršiaus rekombinacijos greičio mažinimo elementas (Kopitkovas *et al.* 2001). Vėlesniuose darbuose taip pat aprašytos akytojo silicio taikymo sritys mažinant šviesos atspindį saulės elementuose

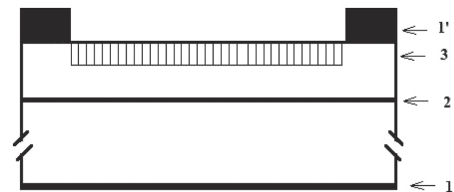
(Strierner, Fauchet 2002; Lipinski *et al.* 2002). Akytojo silicio technologija teikia ir kitų galimybių modifikuoti silicio medžiagos darinius, taip pat ir silicio saulės elementus. Vienas iš tokių būdų, kiek skirtingas negu paminėtuose darbuose, aprašytas eksperimente, kai  $p$ - $n$  sandūrą turinčio darinio  $n$ -dalies (emiterio) elektrocheminis ėsdinimas atliktas fiksuota srove, bet su pertrauka, dviem etapais (Rajabi, Dariani 2009). Tvirtinama, kad tai leido pagaminti dvigubo sluoksnio piltuvėlio formos paviršiaus mikrostruktūrą, kuri pravėrė  $p$ - $n$  sandūrą ir siekė saulės elemento  $p$ -tipo laidžio dalį. Kaip ir ankstesniuose darbuose po ėsdinimo stebėtas fotosrovės padidėjimas apšviečiant halogenine lempa. Deja, skersinio sluoksnio vaizdo darbe nebuvo parodyta, todėl pateikiama interpretacija nepakankamai įtikinanti. Fotoelektrinis elementas buvo gaminamas laboratoriniu būdu, naudojant silicio plokštelės su joje esančia  $p$ - $n$  sandūra ruošinį. Skirtingai nuo minėto darbo, šiame darbe, siekiant valdyti silicio saulės elementų parametrus, monokristalinio silicio saulės elementui buvo pritaikyta akytojo silicio technologija. Elementas buvo pagamintas industrinio serijinio silicio saulės elementų gamybos procesą atitinkančiu būdu.

### Ekspertas

Tirtas silicio saulės elementas pagamintas industrinės technologijos ciklą atitinkančiu būdu  $p$ -tipo (100) plokštumos silicio plokštelėje. Saulės elemento  $n$ -tipo emiteris suformuotas difuzijos būdu įterpiant fosforo priemaišų (Szlučcik *et al.* 1997). Pagamintų saulės elementų plokštelės storis 450  $\mu\text{m}$ , emiterio storis ( $p$ - $n$  sandūros padėties gylis) apie 0,5–0,7  $\mu\text{m}$ . Ištinis, apatinis ir šukų pavidalo viršutinis kontaktai pagaminti iš vario. Saulės elemento paviršius apsaugotas silicio nitrido sluoksniu, kurio storis buvo apie kelių dešimčių nanometrų. Saulės elementai skraibavimo būdu buvo supjaustomi į  $5 \times 10 \text{ mm}^2$  ploto bandinius. Prie viršutinio ir apatinio kontaktų sidabro pasta buvo pritvirtinama vario vielutės. Visi metaliniai kontaktai apsaugoti chemiškai atspariu ir elektrai nelaidžiu laku. Elektrochemijos, akytojo silicio technologijos darbai atlikti teflono indelyje. Kaip anodas buvo naudojamas laku apsaugotas apatinis elemento elektrodas, su elektrolitu kontaktuojantis katodas buvo pagamintas iš platinos. Prieš pat saulės elemento paviršiuje gaminant akytąjį silicio sluoksnį, bandinys kelioms minutėms buvo įdėtas į fluoro rūgštį, kad būtų pašalintas apsauginis silicio nitrido sluoksnis. Gaminant akytojo silicio sluoksnį, naudotas HF:etanolis = 1:2 tūrio santykio elektrolitas. Ėsdinimo metu bandinys buvo apšviestas sufokusuota 50 W galios halogeninės lempos šviesa. Srovė buvo valdoma kompiuteriu režiuose 6–14  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , ėsdini-

mo laiko intervalas 10–20 s. Modifikuoto saulės elemento schema parodyta 1 pav.

Elektrinių charakteristikų matavimai atlikti kompiuterizuotu prietaisų komplektu, kurį sudarė multimetrai „Tektronix CFG 253“, „Ketley 2000“, „Metex MXD 4660A“, oscilografas „Tektronix TDS 3032B“ ir pagalbiniai matavimo įrangos elementai bei elektroninės schemos. Tiriant saulės elementų šviesos konversijos efektyvumą apšvietimui buvo naudojama 35 W galios ksenono halogeninės lempos šviesa, kurios spektras atitinka 5000 K absoliučiai juodo kūno temperatūrą.



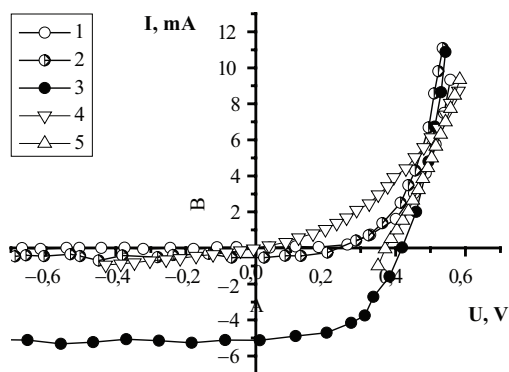
1 pav. Principinė modifikuoto saulės elemento schema: 1, 1' – metaliniai kontaktai; 2 –  $p$ - $n$  sandūra; 3 – akytasis sluoksnis

Fig. 1. A principal scheme of modified solar cells. 1, 1' – metallic contacts; 2 –  $p$ - $n$  junction, and 3 – porous layer

### Rezultatai ir jų aptarimas

Bandinių voltamperinės charakteristikos buvo matuojamos prieš gaminant ir pagaminus akytojo silicio sluoksnį saulės elemento paviršiuje. Vieno iš bandinių su pagamintu akytojo silicio sluoksniu tamsinė voltamperinė charakteristika ir dvi voltamperinės charakteristikos, apšvietus skirtingos galios tankio ksenoninės lempos šviesa, parodytos 2 pav. Prieš gaminant akytojo silicio sluoksnį pamatuotos bandinio tamsinė voltamperinė charakteristika (4) ir dalis charakteristikos bandinį apšvietus (5). Lyginant tamsines bandinio su akytojo silicio sluoksniu ir be jo voltamperines charakteristikas, matyti, kad akytojo silicio sluoksnis pastebimai pakeitė voltamperinės charakteristikos formą: sumažėjo srovė užtvarine kryptimi ir pasikeitė bandinio nuosekloji varža. Tiksliai palyginti negalima, kadangi tamsinė voltamperinė charakteristika, nesant akytojo silicio sluoksnio, buvo pamatuota iki nepakankamai didelių įtampų, todėl tiesinės dalies paveiksle nematyti. Tiesinė charakteristikos dalis buvo matoma bandinį apšvietus ksenoninės lempos teikiamu maksimalaus intensyvumo sufokusuotu šviesos srautu. Ar nuosekloji varža priklausė nuo apšvietimo galios, iš esamų duomenų įvertinti nepavyko.

Saulės elemento bandinyje suformuoto akytojo silicio darinio voltamperinės charakteristikos tamsoje ir apšvietus dviejų skirtingų intensyvumų šviesos srautu paveiksle pavaizduotos 1, 2 ir 3 simboliais. Paveiksle matomas aki-



**2 pav.** Saulės elemento voltamperinės charakteristikos: 1 – bandinio su aktytojo silicio sluoksniu tamsinė voltamperinė charakteristika; 2 – bandinio, apšviesto išbarstytos šviesos srautu, voltamperinė charakteristika; 3 – voltamperinė charakteristika bandinio, apšviesto maksimalaus intensyvumo sufokusuotu šviesos srautu; 4 – bandinio be aktytojo silicio sluoksniu tamsinė voltamperinė charakteristika; 5 – bandinio be aktytojo silicio sluoksniu, apšviesto sufokusuotu šviesos srautu, voltamperinė charakteristika

**Fig. 2.** Current-voltage characteristics of a solar cell: 1 – current-voltage characteristics in the dark of a sample containing a porous silicon structure; 2 and 3 – current-voltage characteristics of the same sample at various illuminations; 4 and 5 – current-voltage characteristics in the dark under the illumination of the initial sample (without a porous silicon structure)

vaizdus voltamperinių charakteristikų statumo padidėjimas pagaminus aktytojo silicio darinį. Didėnis charakteristikos statumas reiškia mažesnę saulės elemento nuosekliają varžą. Atliktas įvertinimas rodo, kad nuoseklioji varža sumažėjo apie 15 kartų. Svarbu tai, kad apšvietimas faktiškai neturi įtakos nuosekliajai varžai. Tokiems saulės elementams supaprastėja suderinimo su apkrova uždavinys. Vertingą informaciją apie saulės elementų tobulumą, jų darbo efektyvumą teikia funkinių (apkrovos) voltamperinių charakteristikų analizė. Vienas iš parametrų, naudojamų analizuojant saulės elementų efektyvumą, yra voltamperinių charakteristikų užpildos rodiklis (*fill factor*)  $F$ . Jis apibūdinamas kaip maksimalios kuriamos galios  $P_{max} = V_{mg} \cdot I_{mg}$  ir trumpojo jungimo srovės sandaugos su atviros grandinės įtampa santykis:

$$F = \frac{V_{mg} \cdot I_{mg}}{I_{ij} \cdot U_{te}} = \frac{P_{max}}{I_{ij} \cdot U_{te}}, \quad (1)$$

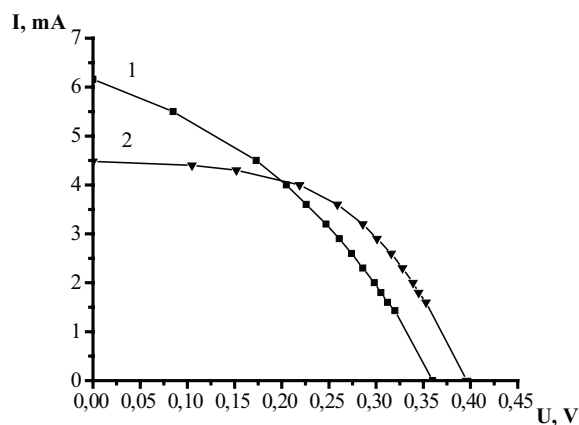
čia  $V_{mg}$  ir  $I_{mg}$  – atitinkamai maksimalios įtampos ir srovės vertė,  $I_{ij}$  – trumpojo jungimo srovė,  $U_{te}$  – atviros grandinės įtampa,  $P_{max} = V_{mg} \cdot I_{mg}$ . Užpildos rodiklis  $F$  ir saulės elemento naudingumo koeficientas  $\eta$  susieti sąryšiu:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{sv}} = \frac{F \cdot I_{ij} \cdot U_{te}}{P_{sv}}, \quad (2)$$

čia  $P_{sv}$  – šviesos srauto galia.

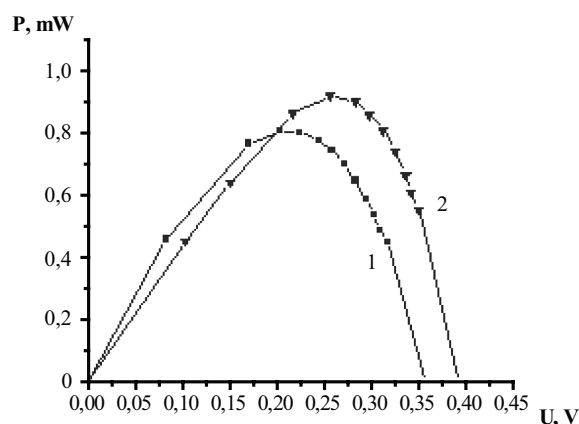
Kaip matyti iš (2) formulės, saulės elemento efektyvumą išreiškia po apkrovos voltamperinės charakteristikos

kreive esantis plotas, kuris proporcingas užpildos rodikliui  $F$ . 3 pav. parodytos saulės elemento apkrovos voltamperinės charakteristikos prieš ir po to, kai jame buvo pagamintas aktytojo silicio sluoksniu. Įvertinę voltamperinės charakteristikos užpildos rodiklį, gavome, kad pagaminus aktytojo silicio darinį užpildos rodiklis padidėjo 1,15 karto. Užpildos rodiklio padidėjimas gautas visiškai pagamintame elemente, neveikiant paties gamybos proceso ir nedarant įtakos  $p$ - $n$  sandūrai. Naudojant eksperimentinius rezultatus buvo apskaičiuota galia, kurią sukuria saulės elementas, apkrautas skirtingo nominalo apkrovimo varžomis. Šios galios priklausomybė nuo įtampos pateikta 4 pav.



**3 pav.** Saulės elemento bandinio darbo (apkrovos) voltamperinės charakteristikos, vienodai apšviestus sufokusuota ksenono lempos šviesa: 1 – iki suformuojant aktytajį silicio sluoksniu; 2 – suformavus aktytojo silicio sluoksniu

**Fig. 3.** Current-voltage characteristics of a solar cell sample under equal illumination: 1 – before the formation of a porous silicon layer; 2 – after the formation of porous silicon



**4 pav.** Saulės elemento galios, kuriamos skirtingo dydžio apkrovose, priklausomybė nuo įtampos, apšviečiant bandinį sufokusuota ksenoninės lempos šviesa: 1 – be aktytojo silicio sluoksniu; 2 – suformavus aktytojo silicio sluoksniu

**Fig. 4.** The electric power versus voltage of a solar cell illuminating by focused light from a xenone lamp: 1 – before the formation of a porous silicon layer; 2 – after the formation of the porous silicon layer

Paveiksle matyti, kad pagaminus saulės elemente akytojo silicio sluoksnį galios priklausomybė nuo įtampos pasikeitė. Bandinyje suformavus akytojo silicio sluoksnį maksimali apkrovos galia padidėjo 1,19 karto. Kartu optimali apkrovos varža pasikeitė nuo 49,3 W pradiniame bandinyje iki 69,4 W bandinyje su suformuotu akytojo silicio sluoksniu. Kadangi šaltinio maksimali apkrovos galia kuriama, kai apkrovos ir šaltinio vidaus varžos yra lygios, galima spręsti, kad pagaminus akytojo silicio sluoksnį saulės elementų varža padidėjo.

## Literatūra

- Cahnam, L. T. 1990. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers, *Appl. Phys. Lett.* 57(10): 1046–1052.
- Green, M. A. 2003. *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer. New York.
- Grigoras, K.; Krotkus, A.; Jasutis, V.; Sulienė, D.; Pačebutas, V.; Nijs, J.; Szlufcik, F. 1995. Antireflection coating of solar cells by porous silicon layer, *Lith. J. Phys.* 35(3): 247–253.
- Kopitkovas, G.; Mikulskas, I.; Grigoras, K.; Šimkienė, I.; Tamošiūnas, R. 2001. Solar cells with porous silicon: modification of surface-recombination velocity, *Appl. Phys. A* 73: 495–501. doi:10.1007/s003390100799
- Lehmann, V.; Gösele, U. 1991. Porous silicon formation: a quantum wire effect, *Appl. Phys. Lett.* 58: 856–860.
- Lehmann, V. 2002. *Electrochemistry of Silicon*. Weinheim. Wiley-VCH Weinheim. 115.
- Lipinski, M.; Panek, P.; Bastide, S.; Levy-Clement, C. 2002. *Porous Semiconductors Science and Technology*, in *3d International Conference, Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain*, 10–15.03.2002. Extended Abstracts, 97–98. Technical University of Valencia, Spain.
- Miles, R. W.; Zoppi, G.; Forbes, I. 2007. Inorganic photovoltaic cells, *Materials Today* 10(11): 20–27. doi:10.1016/S1369-7021(07)70275-4
- Pačebutas, V.; Grigoras, K.; Krotkus, A. 1997. Porous silicon application in solar cells technology, *Physica Scripta*. 69: 255–258.
- Rajabi, M.; Dariani, R. S. 2009. Current improvement of porous silicon Photovoltaic devices by using double layer porous silicon structure: applicable in porous silicon solar cells, *J. Porous Mater.* 16: 513–519. doi:10.1007/s10934-008-9226-7
- Sang-Kuyn Kim; Chang-Hee Cho; Baek-Hyun Kim; Seong-Ju Park; Jae Won Lee. 2009. Structural, optical, and electrical properties of silicon nanowires for solar cells, *Appl. Phys. Lett.* 95: 143–120.
- Solar A PV Management Magazine*. 2011. May (13).
- Szlufcik, J.; Sivoththaman, S.; Nijs, J. F.; Mertens, R. P.; van Overstraeten, R. 1997. Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells, *Proceedings of the IEEE* 85(5): 711–730. doi:10.1109/5.588971
- Strierner, C. C.; Fauchet, P. M. 2002. *Porous Semiconductors Science and Technology*, in *3d International Conference, Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain*, 10–15.03.2002, 92–93. Technical University of Valencia, Spain.
- Zhao, J.; Wang, A.; Green, M. A.; Ferrazza, F. 1998. 19.8% efficient “honeycomb” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells, *Appl. Phys. Lett.* 73(14): 1991–1993. doi:10.1063/1.122345

## CONTROL OVER THE PERFORMANCE OF MONOCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS REFERRING TO THE POROUS SILICON LAYER

R. Mitkevičius, V. Zagadskij, E. Šatkovskis

### Abstract

The paper examines the parameters of crystalline silicon solar cells such as fill factor, maximal output power and series resistance forming a porous silicon layer. The obtained results show that introducing the layer into the structure of a solar cell results in a 19 percent enhancement of maximal output power and conversion efficiency.

**Keywords:** silicon solar cell, porous silicon layer, voltamperic characteristic.