

FOTOVOLTINIAI ELEMENTAI

Karolis Kiela

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas karolis.kiela@gmail.com

Santrauka. Analizuojami rinkoje esantys ir ateityje į ją numatomi tiekti fotovoltiniai elementai: vienos, kelių p - n sandūrų, organiniai, dažais įjautrinti elementai su kvantiniais taškais. Aptariami jų privalumai ir trūkumai, įvardijami pagrindiniai fotovoltinius elementus aprašantys parametrai. Nurodomos pagrindinės dėl fotovoltinių elementų atsirandančių nuostolių priežastys ir būdai, kaip juos mažinti.

Reikšminiai žodžiai: fotovoltinis elementas, sandūra, dažais įjautrintas elementas, kvantiniai taškai, nuostoliai.

Įvadas

Didėjant elektros energijos vartojimui ir senkant žaliavų, kurias naudojant gaunama elektra, atsargoms, vis daugiau lėšų skiriama tyrimams, skirtiems naujiems ir pigesniems būdams, kaip generuoti elektros energiją. Saulė yra faktiškai neišsenkantis energijos šaltinis ir ši energija gali būti panaudota elektros energijai generuoti. Saulės energija surenkama ir paverčiama į elektros energiją naudojant fotovoltinius elementus, kurių veikimas pagrįstas fotovoltiniu efektu – įtampos, arba srovės, atsiradimu medžiagą paveikus šviesa. Įvairiai tarpusavyje jungiant fotovoltinius elementus galima gauti tokius prietaisus, kaip fotovoltiniai moduliai arba valdymo skydai. Įrenginio, generuojančio energiją, efektyvumas yra viena iš svarbiausių jį apibūdinančių charakteristikų, tačiau ar tai yra pagrindinis rodiklis, į kurį reikėtų atsižvelgti? Straipsnyje analizuojami 2011 metų pradžioje gaminamų ir ateityje į rinką numatomų tiekti fotovoltinių elementų pagrindiniai parametrai ir sandara, pasiūlyta jų klasifikacija.

Pagrindiniai parametrai

Pagrindiniai fotovoltinio elemento parametrai: trumpojo jungimo srovė I_c ; atviros grandinės maksimali įtampa V_0 ; užpildos daugiklis FF (1 pav.); maksimali generuojama galia P_{max} ; šviesos energijos vertimo elektra efektyvumas η (Krotkus 2008; Honsberg, Bowden 2008–2011).

Trumpojo jungimo srovė gaunama, kai $V_0 = 0$ V, t. y. kai tarp taškų A–B (2 pav.) varža yra 0. Trumpojo jungimo srovė lygi:

$$I_c = -q \cdot A \cdot G \cdot (L_s + L_e), \quad (1)$$

čia q – elektrono krūvis; A – sandūros plotas; G – krūvininkų generacijos sparta, cm^{-3}/s ; L_s ir L_e – atitinkamai skylių

ir elektronų difuzijos nuotolis. I_c priklauso nuo fotovoltinio elemento ploto, nuo fotonų kiekio, šviesos spektro, optinių nuostolių, krūvininkų gyvavimo trukmės.

V_0 gaunama, kai yra sudaryta atvira grandinė, t. y. kai varža tarp taškų A–B (2 pav.) yra begalinė. Atviros grandinės maksimali įtampa:

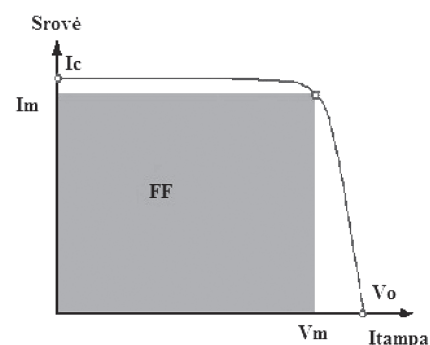
$$V_0 = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_f}{I_0} + 1 \right), \quad (2)$$

čia n – idealumo koeficientas (įvertina, kaip fotovoltinio elemento darbo režimas nukrypsta nuo idealaus diodo veikimo); I_f – srovė, tekanti apšvietus elementą; I_0 – tamsos srovė – srovė, tekanti neapšviestoje sandūroje. Ši srovė atsiranda dėl pavienių krūvininkų, kurie atsitiktinai generuojami nuskurdintajame sluoksnyje ir yra paskirstomi vidinio lauko. Generacijos sparta priklauso nuo kristalografinių defektų, esančių nuskurdintajame sluoksnyje.

Maksimali fotovoltinio elemento galia apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$P_{max} = I_c \cdot V_0 \cdot FF, \quad (3)$$

čia FF – užpildymo daugiklis. FF galima nustatyti iš voltamperinės charakteristikos kreivės (1 pav.). Kadangi nuo



1 pav. Fotovoltinio elemento voltamperinė charakteristika
Fig. 1. The current–voltage characteristic of a solar cell

jo parinkimo priklauso maksimali generuojama fotovoltinio elemento galia, stengiamasi FF plotą padaryti kuo didesnę. Užpildymo daugiklis išreiškiamas taip:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_c \cdot V_0} \quad (4)$$

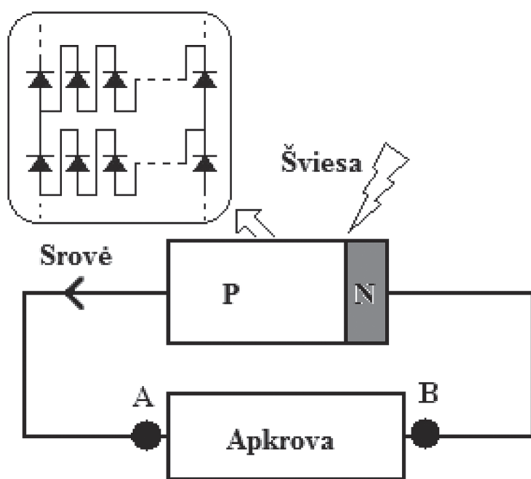
Fotovoltinio elemento saulės energijos vertimo į elektros energiją efektyvumą galime apskaičiuoti pagal formulę:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_0} = \frac{I_c \cdot V_0 \cdot FF}{P_0} \quad (5)$$

čia P_0 – fotovoltinio elemento paviršiaus plotui tenkanti šviesos energija.

Fotovoltinių elementų sandara ir klasifikacija

Fotovoltinį elementą galime modeliuoti dideliu fotodiodu (2 pav.). Jį apšvietus gaunama įtampa tarp elektrodų. Fotovoltinis elementas sudarytas iš daugelio $p-n$ sandūrų, kurios tarpusavyje gali būti sujungtos lygiagrečiai arba nuosekliai.



2 pav. Supaprastintas fotovoltinio elemento modelis

Fig. 2. A simplified model of a photovoltaic cell

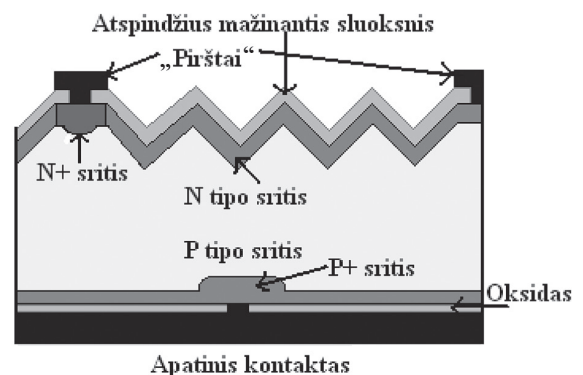
Nustatant fotovoltinių elementų tipus literatūroje dažnai apsiribojama informacija apie monokristalinius, polikristalinius ir amorfinius silicio fotovoltinius elementus. Šio tipo elementai užima didžiąją rinkos dalį, tačiau fotovoltinių elementų rūšių yra daugiau. Yra du klasifikavimo variantai: pagal gamybos laikotarpį arba pagal sandarą.

Pirmuoju atveju elementai skirstomi į kartas (The Evolution of Photovoltaic Technology 2011). Šiuo metu išskiriamos trys kartos: pirmajai kartai priklauso aukšto efektyvumo / kainos elementai (monokristalinio, polikris-

talinio silicio), antrajai kartai – žemo efektyvumo / kainos (plonasluoksniai, tokie kaip amorfinio silicio, *CIGS*, *CdTe*), trečiajai kartai – aukšto efektyvumo, žemos kainos (ateities technologijos). Šio klasifikavimo didelis trūkumas yra riba, kada fotovoltinį elementą galima priskirti tam tikrai kartai. Dėl medžiagų kainos, gamybos technologijos sąnaudų nepastovumo literatūroje galime rasti to paties tipo fotovoltinį elementą, priskirtą įvairioms kartoms. Straipsnyje fotovoltinius elementus skirstysime pagal sandarą.

Vienos $p-n$ sandūros fotovoltiniai elementai (monokristaliniai, polikristaliniai, plonasluoksniai, *CIGS*, *CdTe*). Bendra tokio fotovoltinio elemento sandara pavaizduota 3 pav. Elementą sudaro $p-n$ sandūra, kuri gali būti sudaryta difuzijos, epitaksijos ar kitokiu būdu. Viršutinis sluoksnis paprastai vadinamas emiteriu, apatinis – baze. Plokštelės pusėje, kuri nukreipta į spinduliavimo šaltinį, sukuriamas siaurų krūvininkus surenkančių kontaktų tinklas („pirštai“), kuris papildomai dengiamas dielektriniu skaidriuoju ir šviesos atspindį mažinančiu sluoksniu. Priešingoje plokštelės pusėje elektrodas paprastai yra ištisinis. Siekiant mažinti krūvininkų rekombinaciją dažnai prie šio kontakto papildomai legiruojama, dėl to sukuriamas vidinis elektrinis laukas, atstumiantis pašalinius krūvininkus toliau nuo paviršiaus. Šiuo metu didžiausias pasiektas efektyvumas naudojant monokristalinį fotovoltinį elementą yra 25 % (Kazmerski 2011; Green *et al.* 2011).

Plonasluoksnių fotovoltinių elementų sandara yra tokia pati kaip ir vienos sandūros, skiriasi tik sluoksnių storiai. Šio tipo elementai pigesni, jų konstrukcija gali būti lanksti, tačiau jie mažiau efektyvūs – 20,3 % (Kazmerski 2011; Green *et al.* 2011) nei monokristaliniai ir polikristaliniai fotovoltiniai elementai. *CIGS*, *CdTe* taip pat priskiriami plonasluoksnių elementų kategorijai, bet juose naudojamas ne silicis, o indis ir galis (*CIGS*) bei kadmio ir telūras (*CdTe*).

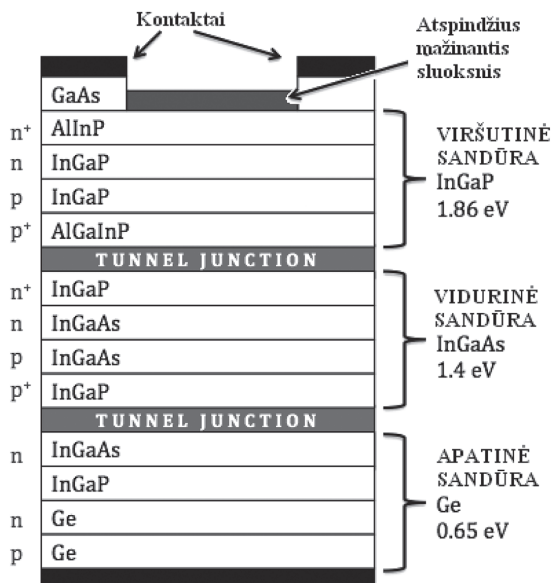


3 pav. Vienos $p-n$ sandūros fotovoltinio elemento sandara

Fig. 3. The structure of a photovoltaic cell with one $p-n$ junction

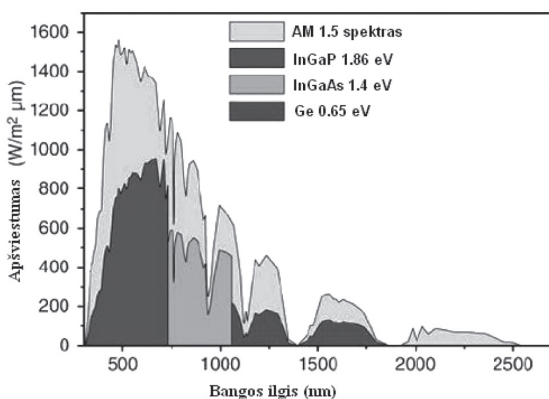
Kelių $p-n$ sandūrų fotovoltiniai elementai. Naudojant vienos $p-n$ sandūros fotovoltinius elementus neįmanoma efektyvumą padidinti daugiau negu *Shockley-Queisser* riba (33,7 %, kada draudžiamosios juostos plotis 1,1 eV). Fotonai, kurių energija bus mažesnė negu medžiagos draudžiamosios energijos juosta, nebus absorbuojami, o fotonai, kurių energija bus didesnė, sukurs elektronus, turinčius didelę papildomą energiją. Ši energija bus perduota gardelei ir kels jos temperatūrą, o tai papildomai mažins efektyvumą.

4 ir 5 pav. atitinkamai pavaizduota kelių sandūrų fotovoltinio elemento sandūra ir atskirų sandūrų sugeriami fotonų spektrai. Viršutinėje sandūroje, kur didelis draustinės energijos juostos plotis, absorbuojama tik tai trumpiausio bangos ilgio (didžiausios energijos) šviesa, kita spinduliuotės dalis sklinda toliau ir yra absorbuojama kituose sluoksniuose.



4 pav. Kelių sandūrų fotovoltinio elemento sandūra

Fig. 4. A multijunction photovoltaic cell



5 pav. Atskirų sandūrų sugeriami fotonų spektrai

Fig. 5. Wavelength absorbed by each junction

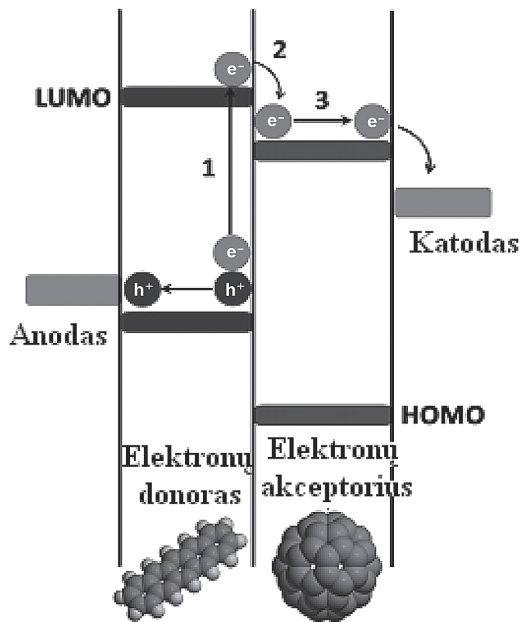
Teorinė tokių elementų efektyvumo riba yra apie 86 % (Yastrebova 2007), laikant, kad elementas bus sudarytas iš begalinio kiekio sandūrų. Realybėje tokio efektyvumo nėra ir greičiausiai nebus pasiekta dėl technologinių kliūčių. Norint pasiekti aukštą efektyvumą, per kiekvieną sandūrą tekanti srovė turi būti labai panaši į likusių sandūrų (Lansel 2005). Jei ši sąlyga nėra įgyvendinta, papildomai krenta įtampa ir nukenčia efektyvumas. Bendra įtampa tarp nuosekliai sujungtų sandūrų yra lygi visose sandūrose generuojamų įtampų sumai. Taigi, norint didinti tandeminių elementų efektyvumą, reikia optimizuoti per sandūras tekančias sroves.

Paprasčiausias būdas gerinti tandeminių elementų efektyvumą yra didinti jų sandūrų skaičių. Tai atliekant praktikoje susiduriama su daugybe sandūrų derinimo problemų, todėl jų skaičių verta didinti tik iki tam tikros ribos. Maksimalus teorinis efektyvumas yra 37 %, 50 %, 56 %, 72 % esant atitinkamai 1, 2, 3, 36 sandūroms. Taigi, matome, kad vis labiau didinant sandūrų skaičių gautas padidėjęs efektyvumas stipriai krenta, todėl artimoje ateityje tandeminiai elementai vargu ar bus sudaromi iš daugiau nei 5–7 sandūrų.

Kaip jau minėta, šio tipo fotovoltinių elementų didžiausias pasiektas efektyvumas yra 43,5 % (Kazmerski 2011; Green *et al.* 2011), tačiau didelės gamybos sąnaudos, sudėtingas skirtingų sandūrų tarpusavio derinimas lemia tai, kad artimiausiu metu tokie elementai nebus pritaikyti masinei rinkai.

Organiniai fotovoltiniai elementai. Esminis šių elementų skirtumas tas, kad juose elektrono ir skylės poros sukuriama ne puslaidininkiuose, o polimeruose. Šviečiant šviesai, elektronai, esantys aukščiausioje užimtoje molekulinėje orbitoje (*HOMO*), gali peršokti į mažiausią neužimtą molekulinę orbitą (*LUMO*) (6 pav.). Energinis šių orbitų skirtumas yra puslaidininkiuose esančios draustinės juostos atitikmuo. Medžiaga, kuri atiduoda elektronus, vadinama donore, o medžiaga, kuri gauna elektronus, – akceptore. Elektronai nuo skylės atskiriami sudarius sąsają, kurioje elektronų cheminis potencialas išilgai mažėja. Po atskyrimo elektronai ir skylės turi būti surenkami prie kontaktų. Svarbiu veiksniu tampa krūvininkų judrumas: per mažas judrumas gali lemti tai, kad krūvininkai nepasieks kontaktų, o vietoj to rekombinuos lokaliuose rekombinacijos zonose arba liks medžiagoje kaip nepageidaujami erdviniai krūvininkai, kurie trikdytų kitų dalelių kryptingą judėjimą (Bredas *et al.* 2009).

Šių elementų efektyvumas yra nedidelis – 8,3 % (Kazmerski 2011; Green *et al.* 2011), gyvavimo trukmė – keleri metai. Nepaisant šių trūkumų, jie naudojami nešiojamųjų kompiuterių dėkluose, montuojami į palapines,



6 pav. Krūvininkų generacija organiniame fotovoltiniame elemente

Fig. 6. The generation of charges in an organic solar cell

skėčius, langus (organiniai elementai gali būti gaminami permatomi).

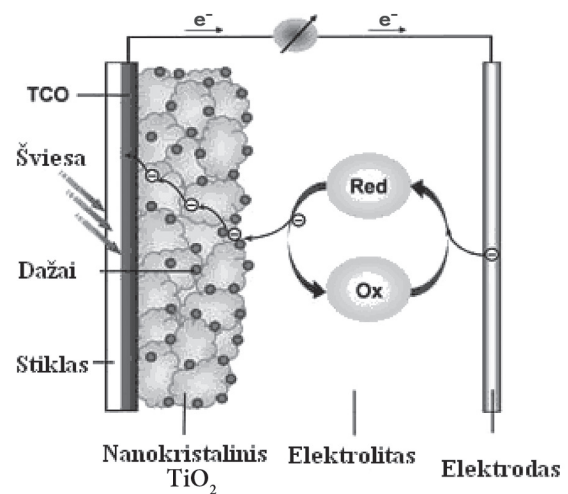
Organinius fotovoltinius elementus galima suskirstyti į tris tipus (Dewan 2006):

- Dažais įjautrinti fotovoltiniai elementai;
- Molekuliniai organiniai fotovoltiniai elementai;
- Polimeriniai fotovoltiniai elementai.

Detaliau aptarsime dažais įjautrintus fotovoltinius elementus, nes jie šiuo metu yra patys efektyviausi, perspektyviausi ir tiekiami į rinką.

Dažais įjautrinti fotovoltiniai elementai (angl. *Dye-sensitized solar cell*) priklauso organinių elementų kategorijai ir yra patys efektyviausi – 11,1 % (Kazmerski 2011; Green *et al.* 2011).

Šviesa pereina pro permatomą viršutinį kontaktą (anodą) ir krenta į alavo dioksido (TiO_2) paviršių. TiO_2 yra labai porėta medžiaga, turinti didelį paviršinį plotą. Ant jo paviršiaus patekusios dažų molekulės su alavo dioksidu yra susietos kovalentiniais ryšiais. Fotonai, (TiO_2 sluoksnis absorbuoja tik nedidelę UV spindulių dalį) su pakankamai didele energija bombarduojantys dažų sluoksnį, sukuria dažų sužadintąją būseną, iš kurios elektronai gali būti pernešti į TiO_2 laidumo juostą. Iš ten difuzijos būdu elektronai juda prie anodo. Tuo pat metu netekusi elektrono dažų molekulė, kad nesuirtu, pasiima vieną elektroną iš jodido (angl. *iodide*), esančio elektrolite po TiO_2 sluoksniu. Šiame procese (7 pav.) jis oksiduojamas į trijodidą (angl. *triiodide*). Praradęs elektroną trijodidas difuzijos būdu pasiekia dugną,



7 pav. Dažais įjautrinto fotovoltinio elemento krūvininkų generacijos procesas

Fig. 7. The process of charge generation in dye sensitized solar cells

kur esantis elektrodas jam grąžina per išorinę grandinę perėjusį elektroną (Graetzel 2005).

DSSC turi kelis pagrindinius privalumus:

1. Elektronai yra tiesiogiai pernešami į laidumo juostą.
2. Į TiO_2 sluoksnį injektuojamas tik elektronas, o ne elektrono ir skylės pora. Nors teoriškai įmanoma, kad sužadintasis elektronas rekombinuos atgal į molekulę, optimizuotuose elementuose to dažniausiai pavyksta išvengti dėl labai greitos reakcijos, kurios metu molekulė pasiima elektroną iš jodido. Dėl šių savybių *DSSC* gali veikti net esant mažam apšviestumui ar dideliame debesuotumui.
3. *DSSC*, kaip ir daugelis plonasluoksnių elementų, yra mechaniškai atsparūs.

Pagrindinis šio tipo fotovoltinio elemento trūkumas yra skystojo elektrolito buvimas, kuris pasižymi temperatūrinio nestabilumu. Verta paminėti, kad kietieji kūnai irgi gali būti naudojami vietoje elektrolito, bet kol kas tokio tipo elementų efektyvumas yra dviem ir daugiau kartų mažesnis, nei naudojant skystą elektrolitą.

Fotovoltiniai elementai su kvantiniais taškais. Vienas iš didžiausių fotovoltinių elementų efektyvumų gaunamas naudojant karštuosius elektronus. Iškart po fotosužadavimo daugelis elektronų yra aukštoje laidumo juostoje, bet per kelias pikosekundes energijos dalį atidavę kristalo gardelei, jie praranda daug iš pradžių turėtos energijos. Nuo nepusiausvirųjų elektronų ir skylių energijų priklauso saulės elemento generuojama įtampa, todėl šis termalizacijos procesas pablogina elementų parametrus.

Įprastiniame saulės elemente krūvininkai yra perkiriami vidinio elektrinio laiko ir surenkami išoriniame grandyne per laiką, trumpesnį už jų rekombinacijos trukmę, bet gerokai ilgesnį nei krūvininkų termalizacijos trukmę.

Karštųjų elektronų elementas turėtų veikti kur kas sparčiau – jame elektronai ir skylės turi būti perskiriami dar iki tol, kol jie, atidavę savo energiją gardelei, pradės šalti. Kadangi krūvininkų dreifo greičiai yra baigtiniai, tai reiškia, kad ribotas bus ir atstumas, kurį jie spės nukeliauti prieš atšaldami. Atstumai, kuriuos elektronai nudreifuoja prieš atšaldami, yra 10 nm eilės.

Vienas iš galimų sprendimo būdų būtų naudoti nanokristalus, dar vadinamus kvantiniais taškais. Tokiose medžiagose pagrindinio puslaidininkio tariamai tolygios laidumo ir valentinės juostos tampa diskrečios. Tuo pat metu energetiniai lygiai gali būti atskirti platesne riba negu aukščiausias įmanomas gardelės virpėjimo dažnis. Tada karštųjų elektronų relaksacija galima tik per mažesnio dažnio multifoninę spinduliuotę. Vadinasi, vienas karštasis elektronas gali sugeneruoti papildomus krūvininkus, užuot savo aukštą energiją atidavęs kaip šilumą.

Vienas iš pagrindinių kvantinių taškų privalumų yra jų lengvai keičiamas draustinės juostos plotis, nes jis tiesiogiai priklauso nuo kvantinio taško matmenų. Kuo mažesnis yra kvantinis taškas, tuo didesnės energijos fotonus jis galės absorbuoti, ir atvirkščiai – kuo jo matmenys didesni, tuo ilgesnės bangos šviesos spindulius bus įmanoma sugerti. Dar vienas kvantinių taškų privalumas yra tas, kad juos įmanoma įterpti į daugelį medžiagų, nes jie nėra aprobuoti konkrečiai formai. Naudojant skirtingų matmenų kvantinius taškus, fotovoltiniuose elementuose galima sugerti fotonus plačiame energijos ruože, didinant fotovoltinio elemento efektyvumą.

Šiuo metu fotovoltiniai elementai, naudojantys kvantinius taškus, atitinka eksperimentinę stadiją, o jų efektyvumas neviršija 5 % (Kazmerski 2011; Green *et al.* 2011), tačiau šio tipo elementai yra laikomi vieni perspektyviausių.

Nuostoliai, atsirandantys fotovoltiniuose elementuose

Optiniai nuostoliai. Esant apšvietumui, elektromagnetinės bangos krinta į fotovoltinio elemento paviršius ir tada gali nutikti du galimi įvykiai – banga nueis iki $p-n$ sandūros arba bus atspindėta. Kad būtų sumažinti nuostoliai dėl atspindžių, fotovoltiniai elementai turi sluoksnį, kuris skirtas nukreipti kuo daugiau sklindančios šviesos elektromagnetinių bangų į elementą. Pirmuosiuose elementuose buvo naudojamas titano dioksidas, bet pastaruoju metu jį pakeitė silicio nitridas dėl geresnių paviršiaus pasyvavimo savybių (rekombinacijos sumažinimas prie paviršiaus). Tiesa, tikimasi, kad jau greitai masinėje rinkoje išvirtins nauji nanoinžinerijos išradimai – medžiagos, galinčios sugerti

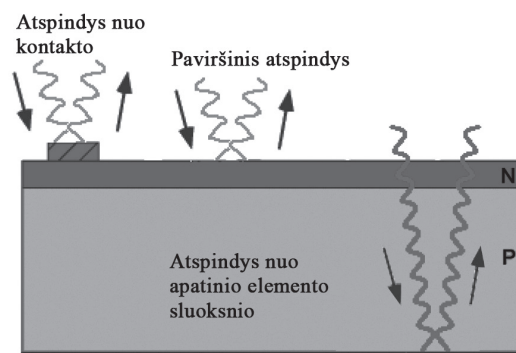
elektromagnetines bangas plačiame spektro ruože beveik visais kampais (Honsberg, Bowden 2008–2011; Chaudhari 2006).

Nemažą atspindžių kiekį gali sudaryti ir viršutinio kontaktinio sluoksnio formos parinkimas, todėl stengiamasi rasti optimalų kontaktinių tinklų išdėliojimo būdą. Parinkus per didelius matmenis ir mažus atstumus tarp jų, didelė šviesos dalis bus atspindėta. Jei parinksime per didelius atstumus ir sumažinsime kontaktų plotą, laisvi krūvininkai iš sandūros bus šalinami neefektyviai, sumažės bendras elemento efektyvumas, padidės bendra kontaktinė varža. Net ir patekęs į $p-n$ sandūrą fotonas gali būti neabsorbuotas, atspindėti nuo apatinės fotovoltinio elemento dalies ir būti išspinduliuotas atgal.

Taigi, fotovoltiniuose elementuose optiniai nuostoliai susideda iš 3 pagrindinių dalių: atspindžiai nuo paviršiaus, atspindžiai nuo kontaktų ir atspindžiai nuo apatinės elemento dalies (8 pav.). Šioms problemoms spręsti taikomi keli būdai:

1. Mažinamas kontaktų plotas (kaip minėta, tai daryti ne visada įmanoma).
2. Naudojami šviesos atspindžius mažinantys sluoksniai.
3. Daromi paviršiai su netolygumais.
4. Didinamas sluoksnis, kuriame gali būti sugerama šviesa. Šis būdas padeda ne visada, nes atsiradę krūvininkai po fotono sugerties paprastai rekombinuoja, jei atstumas, kuriame buvo sugertas šviesos kvantas, buvo toliau nei atstumas, kuriame gali įvykti krūvininkų difuzija.
5. Ilginamas optinis kelias, kurį elemente turi nukeliauti banga (jau aptartais metodais).

Rekombinacijos nuostoliai. Rekombinacijos nuostoliai paveikia tiek trumpojo jungimo srovę I_c , tiek atviros grandinės maksimalią įtampą V_0 . Dažnai rekombinacija įvardijama pagal sritį, kurioje ji įvyksta. Paprastai rekom-



8 pav. Optiniai nuostoliai fotovoltiniame elemente
Fig. 8. Optical losses in a photovoltaic cell

binacijos procesai vyksta fotovoltinių elementų paviršiuje (paviršinė rekombinacija) arba pagrinde (elemento, nagrinėjamo 3 pav., p tipo srityje – pagrindo rekombinacija). Kita sritis, kurioje dažnai įvyksta rekombinacija – nusukurdintasis sluoksnis (Honsberg, Bowden 2008–2011; Chaudhari 2006).

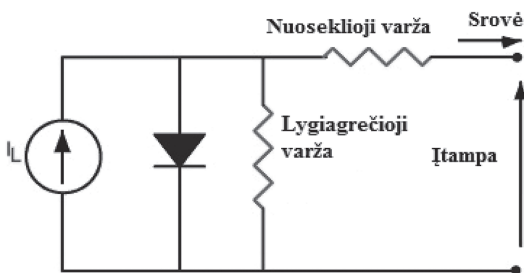
Norint, kad $p-n$ sritis geriau surinktų šviesos sukurtus krūvininkus, tiek paviršinė, tiek pagrindo rekombinacija turi būti kuo mažesnė. Silicio tipo plokštelėse įvardijamos dvi pagrindinės sąlygos, kad būtų efektyviai kaupiamas krūvis:

1. Sukurti krūvininkai turi būti difuzijos nuotoliu (nuotolis, kurį krūvininkai gali įveikti nerekombinavę) nuo sandūros.
2. Esant lokalioms rekombinacijos sritims (pvz., elemento paviršius), krūvininkai turi būti generuojami arčiau $p-n$ sandūros negu lokali rekombinacijos sritis.

Rekombinacijos įtaką galime mažinti didindami sluoksnių legiravimą (mažindami pusiausvyros sąlygomis esančius nepagrindinius krūvininkus). Didinant legiravimo kiekį bus pasiekta aukštesnė atviros grandinės įtampa (taip pat ir trumpojo jungimo grandinės srovė). Tačiau legiravimo kiekis yra atvirkščiai proporcingas difuzijos nuotoliui, todėl tinkamas priemaišų tankio parinkimas yra labai svarbus norint gauti reikiamus fotovoltinio elemento parametrus. Paviršinei rekombinacijai mažinti naudojami pasyvieji sluoksniai.

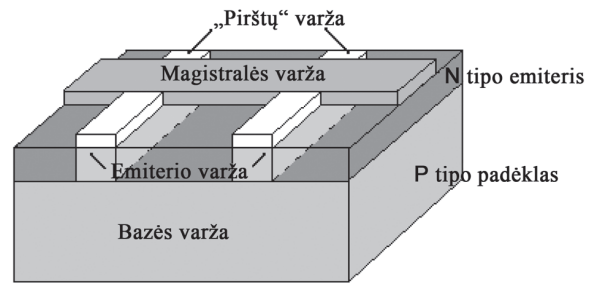
Nuostoliai dėl varžos. Išskiriamos dvi pagrindinės varžos, dėl kurių atsiranda galios nuostoliai fotovoltiniame elemente – lygiagrečioji ir nuoseklioji (9 pav.). Nuoseklioji varža sudaryta iš 4 pagrindinių dalių – bazės, emiterio, kontaktų tinklo ir magistralės (10 pav.). Iš jų didžiausią varžą sudaro emiterio sluoksnis ir kontaktų tinklas (Honsberg, Bowden 2008–2011; Chaudhari 2006).

Dalis nuostolių dėl varžos atsiranda emiterio srityje. Juos dažniausiai nulemia viršutinių elektrodų išdėstymas virš emiterio sluoksnio. Per plačiai išdėstyti elektrodai sudaro nepageidaujamą varžą, per siaurai – didina atspindžius.



9 pav. Fotovoltinio elemento ekvivalentinė schema su nuostolių varžomis

Fig. 9. Losses due to resistance in a photovoltaic cell



10 pav. Fotovoltinio elemento nuosekliosios varžos dalys

Fig. 10. The composition of series resistance in a photovoltaic cell

Taip pat svarbi kontaktinė sritis, kurioje metalas jungiasi su puslaidinikiu. Dažniausiai toje srityje papildomai sudaromas $n+$ sluoksnis norint sumažinti rekombinacijos ir kontaktinę varžą. Bazės varža priklauso nuo priemaišų kiekio ir matmenų. Mažinant bazės ilgį, savitąją varžą ir didinant plotą, bendra bazės varža mažėja. Kontakto tinklo ir magistralės varža priklauso nuo matmenų ir medžiagos, iš kurių jie padaryti, savitosios varžos.

Dideli nuostoliai gali atsirasti dėl lygiagrečiosios varžos. Paprastai ši varža atsiranda dėl gamybos defektų, o ne dėl fotovoltinio elemento struktūros. Maža lygiagrečioji varža sukelia galios nuostolius, sukurdamą šalutinį kelią, kuriuo gali tekėti sugeneruota srovė. Ši varža ypač juntama esant mažam apšviestumui, kada generuojama maža fotosrovė.

Parametrų matavimo skirtumai

Yra du matavimo metodai, pagal kuriuos atliekami fotovoltinių elementų parametrų matavimai – STC ir PTC. STC (angl. *Standart Test Conditions*) tipo matavimai atliekami laboratorijose, esant 1000 W/m^2 apšviestumui, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai, oro masei, lygiai $1,5 \text{ kg}$, ir ASTM G173-03 spektrui. PTC (angl. *PVUSA Test Conditions*) matavimai atliekami esant 1000 W/m^2 apšviestumui, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai, 1 m/s vėjo greičiui ir esant 10 m aukščiau žemės paviršiaus (Changing System Parameters 2011). Didžiausias skirtumas tarp šių testų yra jų atlikimo intervalas. STC naudojamas momentinis testas, kurio metu fotovoltinis elementas apšviečiamas $5\text{--}30 \text{ ms}$. Tokiu atveju elemento paviršius nespėja įkaisti ir nepasireiškia nuostolių dėl temperatūros padidėjimo. PTC duomenys gaunami fotovoltinį elementą apšviečiant ilgesnį laiką (ilgiau atliekant bandymą, gaunami tikslesni rezultatai), todėl šis matavimo būdas laikomas tikslesniu ir geriau atitinka realaus pasaulio modelį. Šiuo būdu fotovoltinio elemento galia (taip pat ir su ja susiję parametrai) gaunama mažesnė, nei atliekant matavimus pagal STC standartus. Dažnai fotovoltinio elemento

aprašė pateikiami klaidinantys vartotoją STC duomenys, nes jie nurodo parametrus, kurie neatitinka realios sistemos galimybių.

Nei STC, nei PTC būdu išmatuoti duomenys neįvertina pašalinių nuostolių, tokių kaip fotovoltinio elemento paviršiaus tarša, šešėlių, modulių neatitikimo, nuostolių perdavimo linijose, inverteryje, transformatoriuje, elementų susidėvėjimo, temperatūrų nestabilumo. Šiuos faktorius lemia sezonas, geografinė padėtis, montavimo technologija, azimutinis polinkis.

Išvados

Apžvelgėme fotovoltinių elementų parametrus, suskirstėme juos pagal sandarą. Šiuo metu rinkoje dominuoja vienos $p-n$ sandūros monokristaliniai, polikristaliniai ir plonasluoksniai fotovoltiniai elementai. Monokristaliniai ir polikristaliniai elementai pasižymi aukštu efektyvumu, ilgaamžiškumu (20 % galios sumažėjimas per 25 metus), tačiau jiems pagaminti sueikvojama daug silicio, todėl jų kaina yra didelė. Gaminant plonasluoksnius elementus silicio sunaudojama mažiau, jį galima pakeisti kitomis medžiagomis, todėl šio tipo elementų kaina, taip pat ir efektyvumas yra mažesni. Mažos galios reikalaujančiuose įtaisuose naudojami organiniai fotovoltiniai elementai. Jie pasižymi žema kaina, lanksčiais ir net permatomais moduliais. Pagrindinis jų trūkumas yra žemas efektyvumas, mechaninis atsparumas, temperatūrinis nestabilumas. Šiuo metu patys efektyviausi fotovoltiniai elementai yra sudaryti iš kelių $p-n$ sandūrų, tačiau jų kaina yra didžiausia iš visų aptartų elementų, todėl šio tipo elementai dar nėra plačiai naudojami masinėje rinkoje. Tikimasi, kad greitai fotovoltinių elementų gamybos procese įsitvirtins nanoelektronikos naujovės: nanokristalitiniai (kvantiniai taškai), nanovamzdeliai.

Literatūra

- Bredas, J.; Norton, J. E.; Cornil, J.; Coropceanu, V. 2009. *Molecular Understanding of Organic Solar Cells: the Challenges* [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ar900099h>
- Chaudhari, V. A. 2006. *Losses in Solar Cells* [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ese.iitb.ac.in/~vikrant/losses.pdf>
- Dewan, R. 2006. *Organic Solar Cells* [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.faculty.iu-remen.de/dknipp/c300442/rd%20organic%20solar%20cells.pdf>
- Graetzel, M. 2005. *Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells* [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: http://campi.kth.se/polopoly_fs/1.25005!InorgChem2005-GraetzelOnSolarCells.pdf

Green, M. A.; Emery, K.; Hishikawa, Y.; Warta, W. 2011. *Solar Cell Efficiency Tables* (version 37) [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.1088/pdf>

Honsberg, C.; Bowden, S. 2008–2011. *PVC CDROM* [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://pvcdrom.pveducation.org/index.html>

Yastrebova, N. V. 2007. *High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells: Current Status and Future Potential* [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://sunlab.site.uottawa.ca/pdf/whitepapers/HiEfficMjSc-CurrStatus&FuturePotential.pdf>

Kazmerski, L. 2011. *NREL Compilation of Best Research Solar Cell Efficiencies* [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff\(rev110408U\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff(rev110408U).jpg)

Krotkus, A. 2008. *Puslaidininkų optoelektronikos sistemos ir prietaisai*. Vilnius: Protegus. 192 p.

Lansel, S. 2005. *Technology and Future of III-V Multi-Junction Solar Cells* [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: www.stanford.edu/~slansel/projects/solar%20report.doc

The Evolution of Photovoltaic Technology [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.konarka.com/index.php/technology/our-evolution/>

PHOTOVOLTAIC CELLS

K. Kiela

Abstract

The article deals with an overview of photovoltaic cells that are currently manufactured and those being developed, including one or several $p-n$ junction, organic and dye-sensitized cells using quantum dots. The paper describes the advantages and disadvantages of various photovoltaic cells, identifies the main parameters, explains the main reasons for the losses that may occur in photovoltaic cells and looks at the ways to minimize them.

Keywords: solar cell, organic, dye-sensitized, junction, quantum dot, losses.