

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
RADIOFIZIKOS KATEDRA

Donatas Bakutis

Polikristalinio silicio saulės elementų kontaktų optimizavimas

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

(studijų programa – Telekomunikacijų fizika ir elektronika)

Studentas

Darbo vadovė

Konsultantas

Katedros vedėjas

Donatas Bakutis

dr. Lina Petrėnienė

Julius Denafas

prof. Jūras Banys

Vilnius 2016

Turinys

Turinys.....	2
1 Įvadas	3
2 Literatūros apžvalga	4
2.1 Fotoelektrinis elementas, jo veikimo principas	4
2.2 Nuostoliai dėl viršutinės pusės metalinio tinklelio	8
2.3 Optiniai nuostoliai.....	10
2.4 Rekombinacijos nuostoliai.....	11
2.5 Elektriniai nuostoliai.....	12
2.6 Maksimali galia neįtakota elektriniu ir optiniu nuostolių	15
2.7 Elektriniai galios nuostoliai	16
2.8 Metalinio tinklelio optimizavimas maksimaliam galios taškui	16
2.9 Trafaretinis spausdinimas	17
2.10 Pastų reikalavimai.....	20
3 Tyrimo metodai	20
3.1 Matavimų metodika	20
3.2 Bandiniai	24
4 Rezultatai ir jų aptarimas.....	25
Išvados	42
Literatūra	43
Santrauka	44
Summary.....	46
Priedas Nr. 1	48

1 Įvadas

Nors saulės fotoelektros energijos pagaminimas šiuo metu yra mažas, tačiau turi spartų augimo potencialą ilgalaikiam vystymuisi per kitus dešimtmečius. Numatoma, kad iki 2050 metų fotoelektros energija aprūpins 16 % viso pasaulio suvartojamas energijos [1].

Pagrindinė saulės energetikos lėto plėtimosi priežastis yra kWh kaina. Norint paversti fotoelektrą ekonomiškai konkurencingą, reikia sumažinti fotoelektros prietaisų gamybos išlaidas taip, kad saulės energetika galėtų konkuruoti su kitais energijos šaltiniais, pavyzdžiui kaip branduoline energija, dujomis, biodujomis, vėju, vandeniu ir t.t. [2].

Saulės elementų metalizacija yra pagrindinis efektyvumą ribojantis ir kainą lemiantis procesas. Šilkografijos (screen-printing) technologija yra plačiausiai naudojama kontaktų formavimui komercinėje kristalinių silicio saulės elementų gamyboje. Kadangi ši technologija susideda iš nedidelio skaičiaus procesų etapų ir pasižymi paprastumu. Metalizacija naudojant šilkografijos technologiją susideda iš trijų etapų: galinių kontaktų (Al ir Ag) spausdinimas ir džiovinimas; viršutinių kontaktų (Ag) spausdinimas; viršutinių ir apatinių kontaktų įdeginimas [3].

Šio darbo tikslas, yra optimizuoti viršutinės pusės kontaktus, keičiant sidabro pastas, ir palyginant jų elektrines ir optines savybes, palyginti galinės pusės G aliuminio pastą su pagrindine („baseline“) H aliuminio pasta, iširti, kaip galinio paviršiaus sluoksnis (BSF) įtakoja SE elektriniams parametrams.

2 Literatūros apžvalga

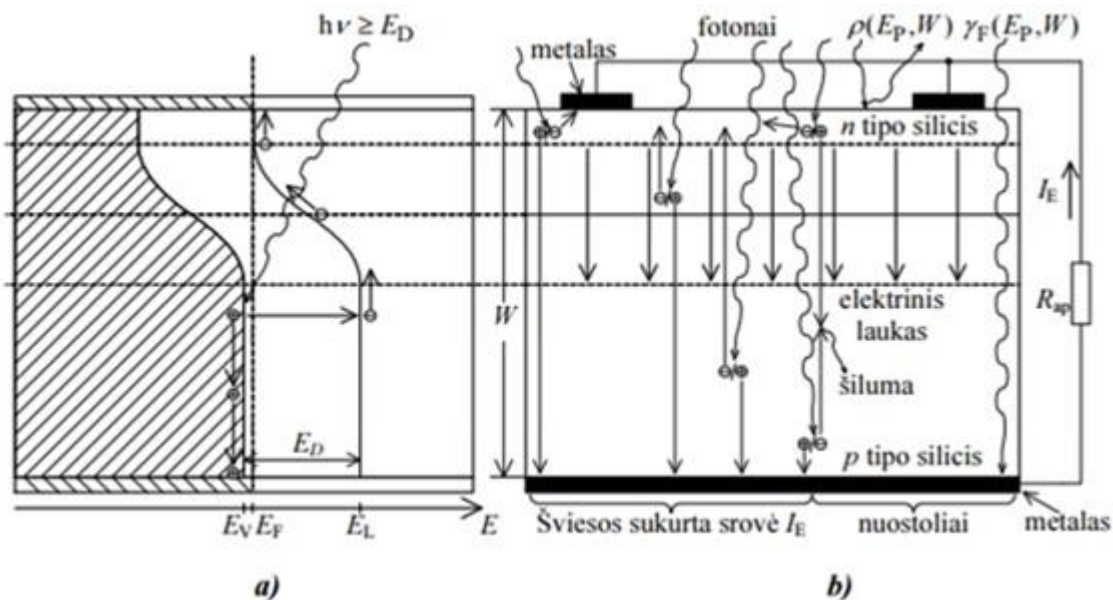
2.1 Fotoelektrinis elementas, jo veikimo principas

Fotoelektros reiškinį dar 1839 metais atrado prancūzų mokslininkas Edmondas Bekerelas. Tačiau reiškinys paaiškintas buvo tik 1905 metais Alberto Einšteino. 1954 metais sukurtas puslaidininkinis silicio SE, kurio naudingumo koeficientas buvo 4 %.

Fotoelektros efektas puslaidininkiuose paaiškinamas remiantis 2.1 paveikslu. (2.1 pav. a) pavaizduotas į fotoelektrinį elementą patekęs fotonas, kurio energija E_p apskaičiuojama taip:

$$E = h\nu \geq E_g, \quad (2.1)$$

čia: $h = 4,135 \cdot 10^{-15}$ eV·s – Planko konstanta, ν – fotonų dažnis Hz; E_g – puslaidininkio draustinės energijos juostos plotis, nm. [4]



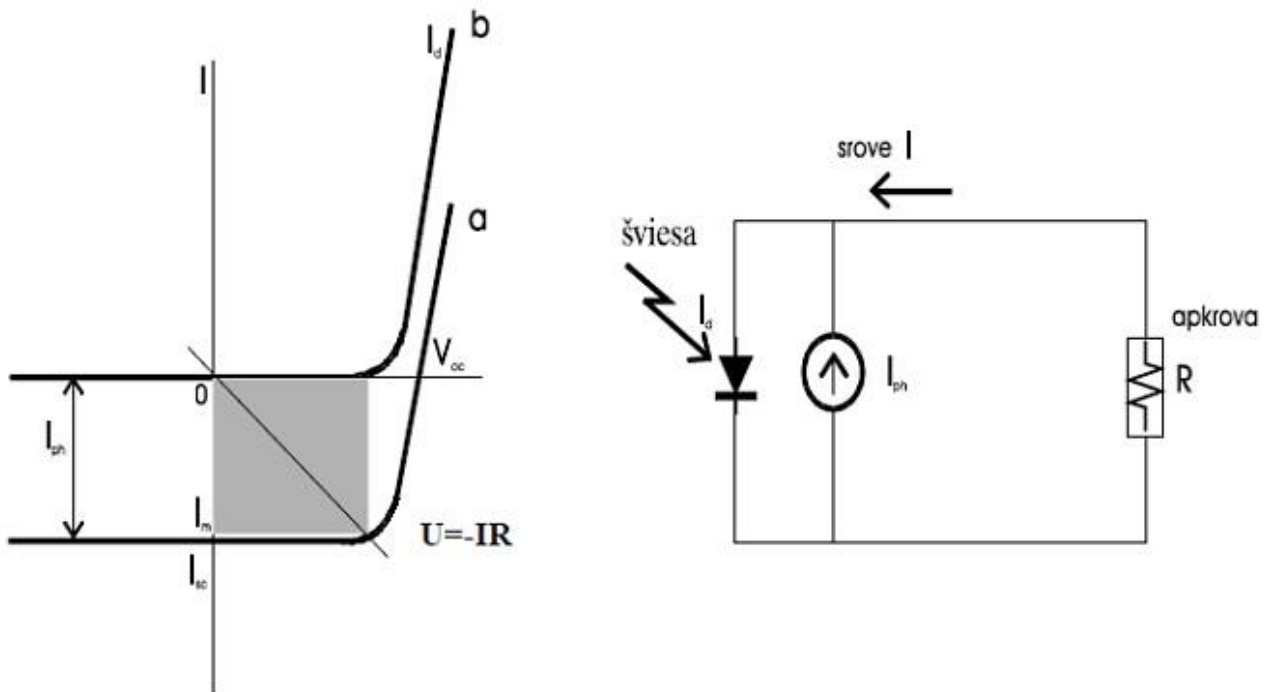
2.1 pav. Fotoelektros efektas kristalinio silicio puslaidininkyje [4]

Toks fotonas, patekęs į W storio SE, abiejuose p - n sandūros pusėse gali perkelti elektroną iš valentinės į laidumo juostą (2.1 pav. a)). Taip susidaro laisvų krūvininkų – elektronų ir skylių poros. Dėl p - n sandūros elektrinio lauko laisvų krūvininkų poros išskiriamos ir elektronai pernešami į n tipo, o skylės į p tipo sritį (2.1 pav. b)). Pertekliniai elektronai n tipo Si, veikiami susidariusio elektrinio lauko, per metalinį elektrodą juda išorine grandine per apkrovą R_{ap} iki metalinio p -Si kontakto.

Energijos nuostoliai SE atsiranda dėl šių priežasčių (2.1 pav. b)):

- fotonai, kurių $E_p < E_g$, yra absorbuojami ir nesužadina elektronų;
- dėl atspindžio gebos $\rho(E_p, W)$ dalis fotonų atspindi nuo SE paviršiaus;
- dėl šviesos pralaidumo $\gamma_F(E_p, W)$ fotonai, kurių $E_p \gg E_g$, gali kirsti SE nesužadindami elektronų. Taip pat didelės energijos fotonas elektronui suteikia perteklinę kinetinę energiją, kurią prarandant išskiriama šiluma, todėl didėjant E_p , didėja $\gamma_F(E_p, W)$;
- fotonai, kurių $E_p \gg E_g$, gali sužadinti elektronus toli nuo $p-n$ sandūros, todėl elektronas dreifuodamas link sandūros gali prarasti energiją, rekombinuoti su skylė ir išskirti šilumą. Šiuos praradimus nusako krūvininkų surinkimo efektyvumo koeficientas η_S . [4]

Svarbiausi saulės elemento parametrai, kurie rūpi vartotojui, – tai generuojama srovė bei įtampa.



2.2 Saulės elemento charakteristikos [4]

Kai elementas apšviestas, foto srovė I_{ph} teka kaip atvirkštinė diodo srovė ir yra tiesiogiai proporcinga apšviestumui. Laikydami srovės tekėjimo kryptį 2.2 pav. teigiama, turime tokią srovės ir įtampos priklausomybę:

$$I = -I_{ph} + I_0 \{ \exp(qU/nkT) - 1 \}; \quad (2.2)$$

Jei prie saulės elemento prijungiama apkrovos varža R , įtampa U_R ir srovė I_R apkrovoje nustatomos iš saulės elemento srovės ir įtampos priklausomybės ir tiesės, atitinkančios

$$U = -IR \quad (2.3)$$

sankirtos. Šiame taške išėjimo galingumas apkrovoje

$$P_{\text{out}} = R I^2_R. \quad (2.4)$$

Jei saulės elemento kontaktai yra atjungti arba užtrumpinti, saulės elemento išėjimo galia lygi nuliui. Derinant apkrovos varžą, galime surasti optimalų darbo tašką, kur išėjimo galia yra maksimali.

Saulės elemento efektyvumo koeficientas η yra apibrėžiamas taip:

$$\eta = \frac{\text{galia optimaliame veikimo taške}}{\text{saulės elemento gaunama energija}} \times 100\%; \quad (2.5)$$

Didžiausias atiduodamas galingumas P_{max} , atviros grandinės įtampa (U_{oc} , kai srovė lygi nuliui) ir trumpojo sujungimo srovė (I_{sc} , kai įtampa lygi nuliui) yra susietos priklausomybe:

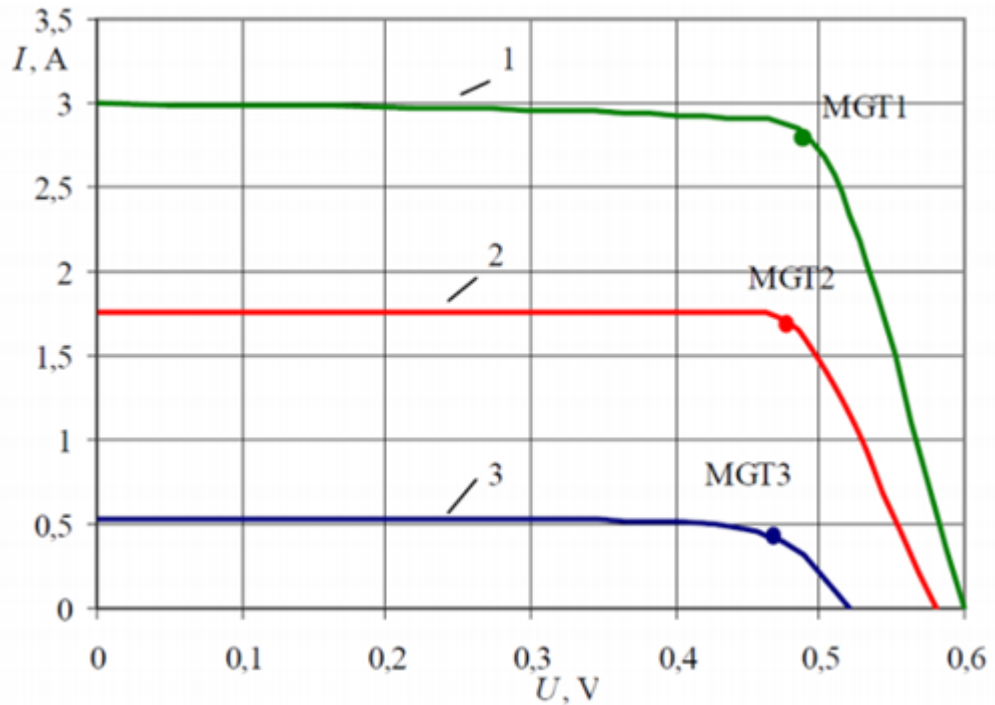
$$P_{\text{max}} = U_{oc} I_{sc} FF; \quad (2.6)$$

čia: FF yra užpildymo faktorius, kuris lygus

$$FF = \frac{U_{mpp} I_{mpp}}{U_{oc} I_{sc}}; \quad (2.7)$$

čia: U_{mpp} ir I_{mpp} yra įtampa ir srovė maksimaliam galios taške.

Idealiam silicio saulės elementui FF teoriškai yra apie 0,8, bet realiame FF yra mažesnis.



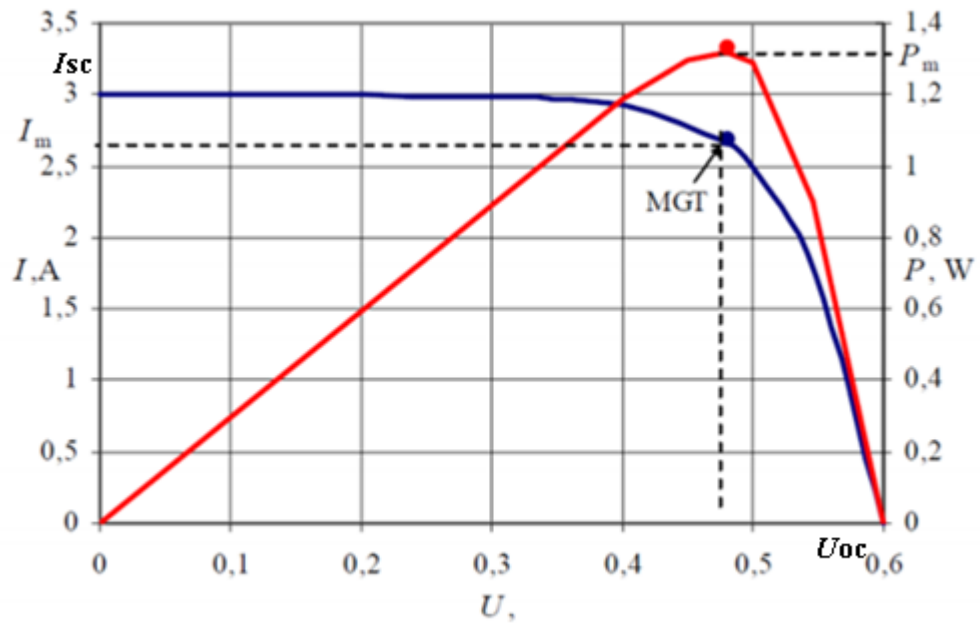
2.3 pav. Fotoelektrinio elemento srovės – įtampas charakteristikos: 1 – $G = 1000 \text{ W/m}^2$; 2 – $G = 600 \text{ W/m}^2$; 3 – $G = 200 \text{ W/m}^2$; MGT – maksimalios galios taškas [4]

Šios charakteristikos pagrindiniai parametrai yra:

- trumpojo jungimo srovė I_{sc} , kai įtampa $U = 0$;
- tuščios veikos (atviros grandinės) įtampa (elektrovaros jėga) U_{oc} , kai $I = 0$;
- srovė I_{mpp} ir įtampa U_{mpp} maksimalios galios taške MGT.

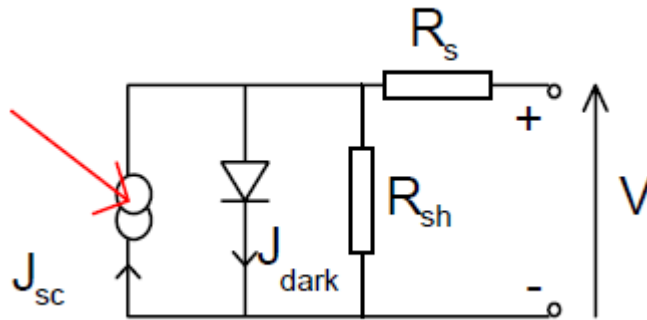
Fotoelemento srovė nuo 0 iki maksimalaus galios taško yra proporcinga saulės energinei apšvietai G , tuščios veikos įtampa nuo apšvietos kinta nedaug. Didėjant darbo įtampai, srovė mažėja nedaug. Darbo įtampa nepriklauso nuo fotoelemento ploto. Didėjant fotoelemento plotui, didėja tik srovė. MGT vidinė fotoelemento varža lygi apkrovos varžai. Didėjant saulės energinei apšvietai, fotoelemento vidaus varža mažėja.

Fotoelektrinės jėgainės naudingumas priklauso ir nuo temperatūros. Mažėja tuščios veikos įtampa ir nedaug didėja trumpojo jungimo srovė didėjant fotoelemento temperatūrai. Dėl to mažėja fotoelemento išvystoma galia. Pagrindiniai fotoelektrinio elemento parametrai nustatomi standartinėmis išbandymo sąlygomis: $G = 1000 \text{ W/m}^2$, atmosferos oro masei AM1,5 ir aplinkos temperatūrai $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Kaip kinta fotoelektrinio elemento išvystoma galia parodyta 2.3 pav. [4]

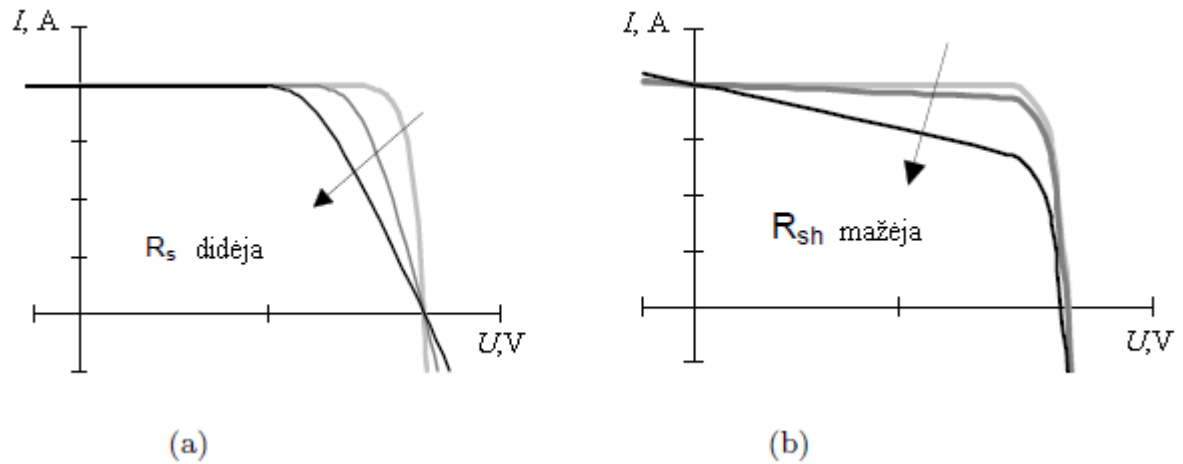


2.4 Fotoelektrinio elemento srovės – įtampos ir galios charakteristikos: MGT – maksimalus galios taškas [4]

2.2 Nuostoliai dėl viršutinės pusės metalinio tinklelio



2.5 pav. Ekvivalenti saulės elemento schema [4]



2.6 pav. a) Nuosekliosios varžos R_s ir b) šunto varžos R_{sh} poveikis voltamperinei saulės elemento charakteristikai [4]

Norint sumažinti saulės elemento efektyvumo nuostolius metalizacijos procese, reikia optimizuoti saulės elementų kontaktus. Optiniai nuostoliai atsiradę dėl atspindimos šviesos nuo šukų pavidalo viršutinio kontakto ir elektriniai nuostoliai atsiradę dėl nuosekliosios varžos turi būti subalansuoti. Nuoseklioji varža daugiausiai įtakoja saulės elemento užpildos daugiklį FF . (2.6 pav.) matoma kaip saulės elemento voltamperinė charakteristika, priklauso nuo nuosekliosios varžos R_s ir šunto varžos R_{sh} . [4] Pramoniniams silicio saulės elementams užpildos daugiklis nukrenta apie 4,5% – 5,5% nuosekliajai varžai pakilus per $1 \Omega \text{ cm}^2$. Kaip užpildos daugiklis FF priklauso nuo nuosekliosios varžos išreikšta (2.8) formulėje:

$$FF = FF_0 \left(1 - R_s \frac{J_{sc}}{V_{oc}} \right), \quad (2.8)$$

kur FF_0 – užpildos daugiklis be parazitinių varžų, J_{sc} – trumpojo jungimo srovė, V_{oc} – atviros grandinės įtampa.

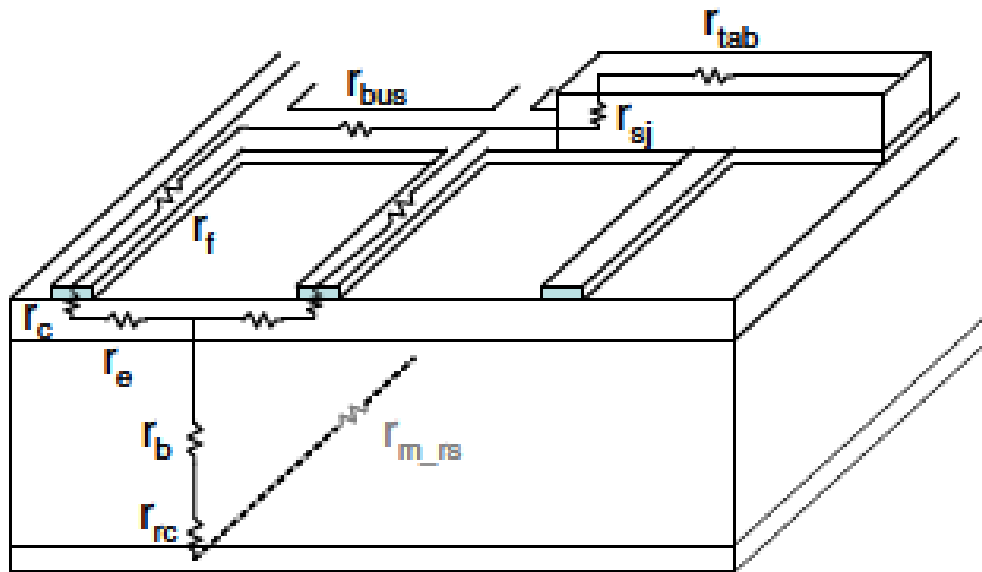
Fotovoltinio elemento saulės energijos vertimo į elektros energiją efektyvumą galime apskaičiuoti pagal formulę:

$$\eta = \frac{FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc}}{P_0}, \quad (2.9)$$

kur P_0 - fotovoltinio elemento paviršiaus plotui tenkanti šviesos energija.

Nuoseklioji varža susideda iš apatinės pusės metalo sluoksnio varžos r_{m_rs} , apatinės pusės kontakto varžos r_{rc} , bazės varžos r_b , emiterio varžos r_e , viršutinės pusės metalo su siliciu kontakto

varžos r_c , šukų formos kontaktų varžos r_f , magistralių varžos r_{bus} , jungčių varžos r_{sj} , r_{tab} (2.7 pav.) [5, 6].



2.7 pav. Saulės elemento schema rodanti nuosekliosios varžos komponentes [2]

2.3 Optiniai nuostoliai

Esant apšviestumui, elektromagnetinės bangos krinta į fotovoltinio elemento paviršių 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 (silicio nitridas), kuris skirtas nukreipti kuo daugiau sklindančios šviesos elektromagnetinių bangų į elementą. Silicio nitridas naudojamas dėl gerų paviršiaus pasyvavimo savybių (rekombinacijos sumažinimas prie paviršiaus). 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, atsispindėti 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 (2.7 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) [7, 8].

Optiniai nuostoliai p_c atsiradę dėl atspindimos šviesos nuo viršutinio metalinio tinklelio apskaičiuojami:

$$p_c = p_{c,buc} + p_{c,f} = \frac{w_{buc}}{a} + \frac{w_f l_f}{s \cdot a} = \frac{s \cdot w_{buc} + l_f \cdot w_f}{s \cdot a}; \quad (2.10)$$

kur w_{buc} – pusė magistralės pločio, w_f – šukų formos kontaktų plotis, l_f – šukų formos kontaktų ilgis, s – atstumas tarp kontaktų,

$$a = w_{buc} + l_f \quad [2]. \quad (2.11)$$

2.4 Rekombinacijos nuostoliai

Rekombinacijos nuostoliai paveikia tiek trumpojo jungimo srovę I_{sc} , tiek atviros grandinės maksimalią įtampą V_{oc} . Dažnai rekombinacija įvardijama pagal sritį, kurioje ji įvyksta. Paprastai rekombinacijos procesai vyksta fotoelektrinių elementų paviršiuje (paviršinė rekombinacija) arba pagrinde. Kita sritis, kurioje dažnai įvyksta rekombinacija – nuskurdintasis sluoksnis [8].

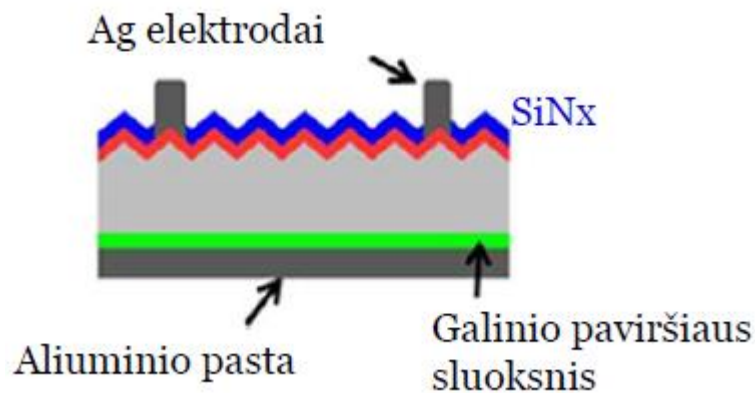
Norint, kad $p-n$ sritis geriau surinktų šviesos sukurtus krūvininkus, tiek paviršinė, tiek pagrindo rekombinacija turi būti kuo mažesnė. Silicio tipo plokštelėse įvardijamos dvi pagrindinės sąlygos, kad būtų efektyviai kaupiamas krūvis:

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 lokalių rekombinacijos srities.

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 fotoelektrinio elemento parametrus. Paviršinei rekombinacijai mažinti naudojami pasyvieji sluoksniai [8].

Galineje saulės elemento puseje, siekiant sumažinti krūvininkų rekombinaciją papildomai legiruojant Aliuminiu (p+) yra sukuriamas galinio paviršiaus sluoksnis (BSF), kuris atstumia elektronus toliau nuo galinio paviršiaus. Papildomas legiravimas vyksta užnešus aliuminio pastą ant galinio paviršiaus ir ją įdeginant greito degimo krosnimi. [9]

Zona tarp p legiruoto ir p+ legiruotų sluoksnių elgiasi kaip p-n sandūra, todėl atsiranda barjeras, kuris trukdo elektronams pasiekti galinį paviršių ir todėl sumažėja galinės pusės paviršinė rekombinacijos sparta. [9]



2.8 pav. Saulės elementas su antireflekciniu-pasyvaciniu sluoksniu, su kontaktais ir su galinio paviršiaus sluoksniu (BSF) [9]

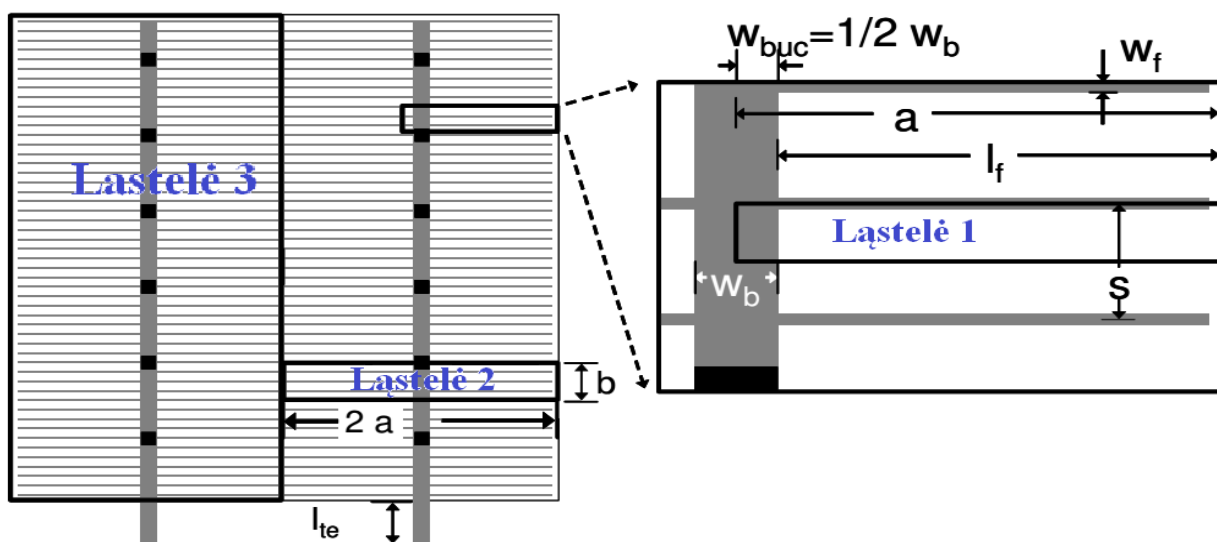
2.5 Elektriniai nuostoliai

Saulės elemento elektrinius nuostolius lemia nuosekioji varža ir šunto varža. Nuosekiosios varžos komponentės pavaizduotos (2.7 pav.) Ominiams nuostolių skaičiavimams šukų pavidalo viršutinis kontaktas suskirstomas į ląsteles. Kiekviena ląstelė yra mažiausias simetrijos elementas kiekvienai varžos komponentei. Kaip skirstomos ląstelės pavaizduota (2.6 pav.). Pilnutinė varža yra

gaunama sujungiant kiekvienos varžos komponentes lygiagrečiai x kartų (x – kiekvienos varžos komponentės ląstelių skaičius). Skaičiuojant elektrinius nuostolius vietoj pilnutinės varžos naudojama varža ploto vienetui (Ω/m^2). 1 lentelėje surašyti parametrai, reikalingi nuostoliams skaičiuoti (2.9 pav.). Kiekvienos varžos komponentės formulės pateiktos 2 lentelėje [8].

1 lentelė. Fizikinių dydžių, naudojamų nuostoliams skaičiuoti, lentelė

Fizikinis dydis	Apibūdinimas	Matavimo vienetas	Fizikinis dydis	Apibūdinimas	Matavimo vienetas
ρ_c	Viršutinio kontakto Savitoji varža	$\Omega \cdot \text{m}^2$	Saulės elemento storis	d	m
ρ_{rc}	Apatinio kontakto Savitoji varža	$\Omega \cdot \text{m}^2$	Nuostoliai	p	-
ρ_{bus}	Magistralės savitoji varža	$\Omega \cdot \text{m}$	Šukų formos kontaktų skerspjūvio plotas	A_f	m^2
ρ_b	Bazės savitoji varža	$\Omega \cdot \text{m}$	Ląstelės plotas	A_{uc}	m^2
ρ_f	Šukų formos kontaktų savitoji varža	$\Omega \cdot \text{m}$		a	m
$\rho_{m_{rs}}$	Apatinės pusės metalo savitoji varža	$\Omega \cdot \text{m}$		b	m
R_{sh}	Emiterio varža	Ω/\square	Magistralės aukštis	h_{bus}	m
R_{sk}	Metalo su siliciu kontakto varža	Ω/\square	Šukų formos kontaktų aukštis	h_f	m
R_{eff}	Efektinė nuosekloji varža	Ω	Apatinės pusės metalo sluoksnio storis	$h_{m_{rs}}$	m
r	Varža ploto vienetui	$\Omega \cdot \text{m}^2$	Atstumas tarp šukų formos kontaktų	s	m
j_a	Saulės elemento srovės tankis	mA/cm^2	Šukų formos kontaktų ilgis	l_f	m
V_a	Saulės elemento įtampa	V	Šukų formos kontaktų plotis	w_f	m
			Magistralės plotis	w_{bus}	m



2.9 pav. Šukų pavidalo viršutinio kontakto suskirstymas į ląsteles individualių varžų skaičiavimams [2]

2 lentelė. Efektinės varžos ir varžos ploto vienetui formulės kiekvienos komponentės varžai skaičiuoti [2]

	[m ²]	R_{eff} cell [Ω]	r [Ω m ²]
Emitteris	I: $a \cdot \frac{s}{2}$	$\frac{1}{6} R_{sh} \frac{(s - w_f)}{l_f}$	$\frac{1}{12} R_{sh} \frac{(s - w_f)}{l_f} a s$
Emitterio kontaktas	I: $a \cdot \frac{s}{2}$	$\frac{\sqrt{R_{sk} \rho_c}}{l_f} \coth\left(\frac{w_f}{2} \sqrt{\frac{R_{sk}}{\rho_c}}\right)$	$\frac{\sqrt{R_{sk} \rho_c}}{l_f} \coth\left(\frac{w_f}{2} \sqrt{\frac{R_{sk}}{\rho_c}}\right) a \frac{s}{2}$
Pirštas	I: $a \cdot \frac{s}{2}$	$\frac{2}{3} \rho_f \frac{l_f}{A_f}$	$\frac{1}{3} \rho_f \frac{l_f}{A_f} a s$
Magistralė	II: $2 \cdot a \cdot b$	$\frac{2}{3} \rho_{bus} \frac{b}{h_{bus} w_{buc}}$	$\frac{1}{3} \rho_{bus} \frac{b^2}{h_{bus} w_{buc}} a$
Bazė	$8 \cdot a \cdot b \cdot N_s$	$\frac{\rho_b \cdot d}{8 \cdot N_s \cdot a \cdot b}$	$\rho_b \cdot d$
Bazės kontaktas	$8 \cdot a \cdot b \cdot N_s$	$\frac{\rho_{rc}}{8 \cdot N_s \cdot a \cdot b}$	ρ_{rc}
Apatinės pusės metalo sluoksnis	$2 \cdot a \cdot b \cdot N_s$	$\frac{1}{3} \frac{\rho_{m_rs} \cdot l_f}{2 \cdot b \cdot N_s \cdot h_{m_rs}}$	$\frac{1}{3} \frac{\rho_{m_rs} \cdot l_f}{h_f} a$

2.6 Maksimali galia neįtakota elektriniu ir optiniu nuostolių

Nuostoliai atsiradę dėl varžų yra prarastos dėl nuostolių galios ir maksimalios galios, kurią teoriškai įmanoma pasiekti, santykis. Maksimali teorinė fotovoltinio elemento galia apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$P_{\max} = j_{\max} V_a A_{uc} \quad (2.12)$$

V_a - įtampa, j_{\max} srovės tankis, be optinių ir elektrinių nuostolių atsiradusių dėl šukų pavidalo viršutinio kontakto.

Srovės tankį j mažina optiniai nuostoliai. Maksimalus teorinis srovės tankis be optinių nuostolių yra apskaičiuojamas:

$$j_{\max} = \frac{j}{1 - p_s}, \quad (2.13)$$

kur p_s - uždengtos šukų pavidalo viršutinio kontakto ir viso viršutinės pusės plotų santykis. Srovės tankis tarp kontaktų ja turėtų būti lygus maksimaliam teoriniam srovės tankiui, jeigu šviesa neatsispindėtų nuo kontaktų į saulės elementą. Tačiau dėl minėtų atspindžių srovės tankis tarp kontaktų yra didesnis už j_{\max} :

$$j_a = \frac{j}{1 - p_c}, \quad (2.14)$$

kur p_c – nepatekusios šviesos ir visos patekusios į saulės elementą šviesos santykis.

Priešingai nei srovės tankiui, įtampą V mažina elektriniai nuostoliai, o optiniai nuostoliai neįtakoją. Maksimali įtampa V_a , kai neįtakoją elektriniai nuostoliai apskaičiuojama pagal formulę:

$$V_a = V + r_s j \quad (2.15)$$

įstatę gauname:

$$P_{\max} = \frac{j}{1 - p_s} (V + r_s \cdot j) A_{uc} \quad [2, 4]. \quad (2.16)$$

2.7 Elektriniai galios nuostoliai

Kadangi srovės tankis yra nevienodas skirtinguose saulės elemento taškuose, įvesti dydžiai tokie kaip efektinė varža R_{ef} ir varža ploto vienetui r . Elektriniai galios nuostoliai apskaičiuojami:

$$P_{loss} = R_{eff} I_{uc(i)}^2 = R_{eff} (jA_{uc})^2 \quad (2.17)$$

$$P_{loss} = r \frac{I_{uc(i)}^2}{A_{uc(i)}} = r \cdot j^2 A_{uc} \quad (2.18)$$

kur P_{loss} - elektriniai galios nuostoliai.

Galios nuostolių ir pilnutinė galios santykis apskaičiuojamas:

$$p_{e,x} = \frac{P_{loss}}{P_{gain}} = \frac{j}{V_a} (1 - p_s) \cdot r \quad (2.19)$$

Galima apskaičiuoti kiek galios prarandama dėl kiekvienos nuosekliosios varžos komponentės [2, 4].

2.8 Metalinio tinklelio optimizavimas maksimaliam galios taškui

Srovės tankis maksimaliam galios taške yra išreiškiamas formule:

$$J_{mpp} = J_{mpp,a} (1 - p_s) \quad (2.20)$$

Įtampa:

$$V_{mpp} = V_{mpp,a} - R_s \cdot J_{mpp} = V_{mpp} - R_s (J_{mpp,a} (1 - p_s)) \quad (2.21)$$

Tai reiškia, maksimalus galios taškas lygus

$$\begin{aligned} P_{mpp} &= J_{mpp} V_{mpp} = (J_{mpp,a} (1 - p_s)) (V_{mpp} - R_s (J_{mpp,a} (1 - p_s))) \\ &= J_{mpp,a} V_{mpp,a} - J_{mpp,a} V_{mpp,a} p_s - (1 - p_s)^2 R_s J_{mpp,a}^2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Atmetus visus nuostolius maksimalus galios taškas būtų lygus

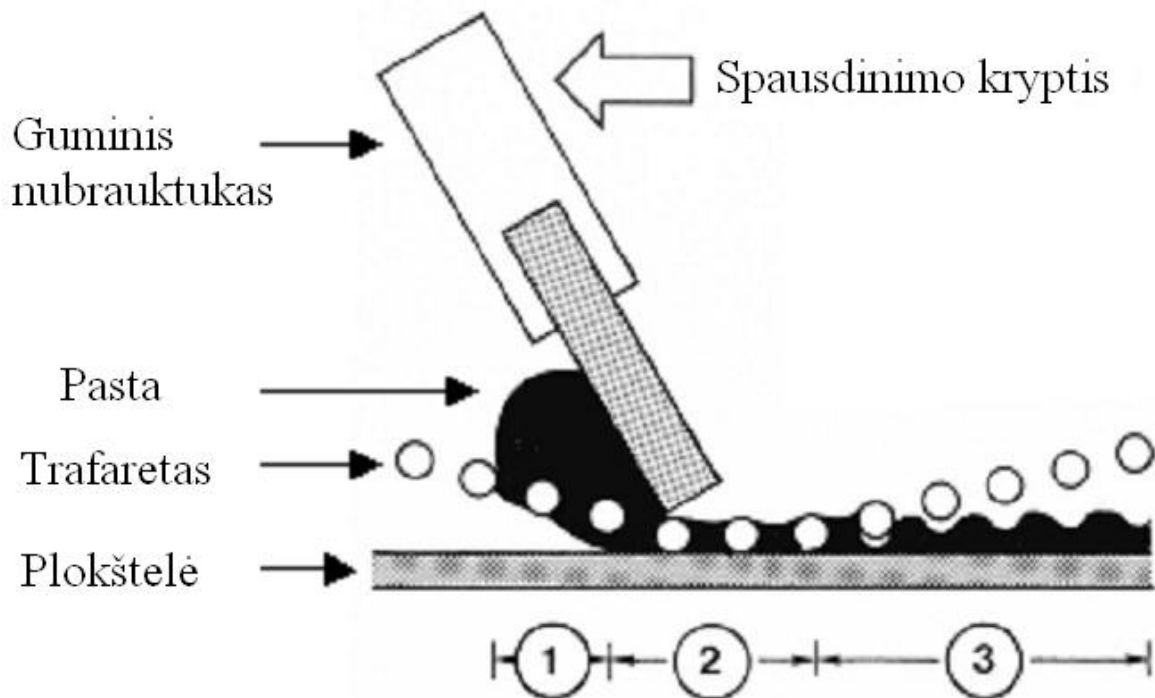
$$P_{mpp,max} = J_{mpp,a} V_{mpp,a} \quad (2.23)$$

Panaudojus (2.22) ir (2.23) formules galime gauti pilnutinius nuostolius:

$$p = \frac{P_{mpp}}{P_{max,mpp}} = 1 - p_s - (1 - p_s)^2 R_s \frac{J_{mpp,a}}{V_{mpp,a}} = 1 - p_s - p_{e,mpp} \quad [2, 4, 10, 11]. \quad (2.24)$$

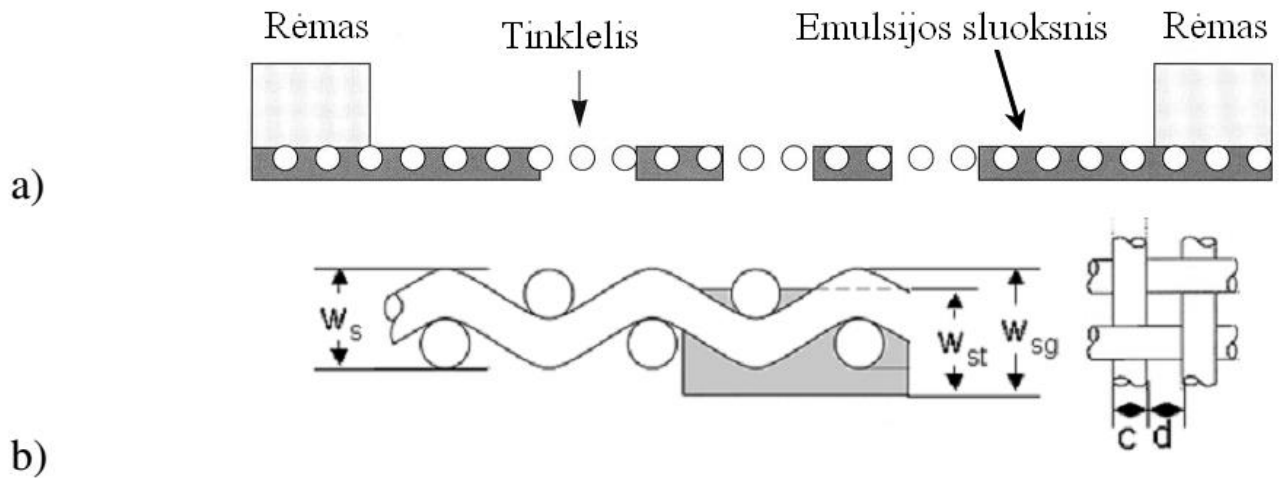
2.9 Trafaretinis spausdinimas

Spausdinimo metu metalo pasta yra praspaudžiama pro atviras emulsijos vietas per tinkleli ant saules elemento paviršiaus. Šį procesą sudaro trys žingsniai. Pirmiausiai ant trafareto viršaus yra tolygiai paskirstoma metalo pasta. Po to su guminiu nubrauktuku pasta yra praspaudžiama pro metalinį tinklelį ant plokštelės paviršiaus. Ir paskutiniame žingsnyje, trafaretas yra atkeliamas, palikdamas atspausdintą pastą ant plokštelės. Spausdinimo kokybe priklauso nuo pastos ir spausdinimo parametrų.



2.10 pav. Trafaretinio spausdinimo procesas [12]

1. Atviros emulsijos vietos yra užpildomos pasta.
2. Pro tinklelį pasta yra praspaudžiama guminiu nubrauktuku.
3. Kai trafaretas yra atkeliamas, pasta lieka ant plokštelės paviršiaus [12].



2.11 pav. Trafareto su metaliniu tinkleliu struktūra, w_{st} – emulsijos storis, w_{sg} – trafareto storis, w_s – metalinio tinklelio storis, c – vielos storis, d – akies storis [2].

Kaip pavaizduota 2.11 pav. Trafaretas sudarytas iš aliuminio rėmo, metalinio tinklelio ir emulsijos sluoksnio, kuris yra suformuotas taip, kad būtų galima spausdinti norimą atvaizdą. Aliuminio rėmo dydis turi būti pakankamai didelis. 2.10 b pav. pavaizduoti parametrai charakterizuojantys trafaretą. Dydis a charakterizuoja kokia ploto dalis yra atvira pro tinkleli

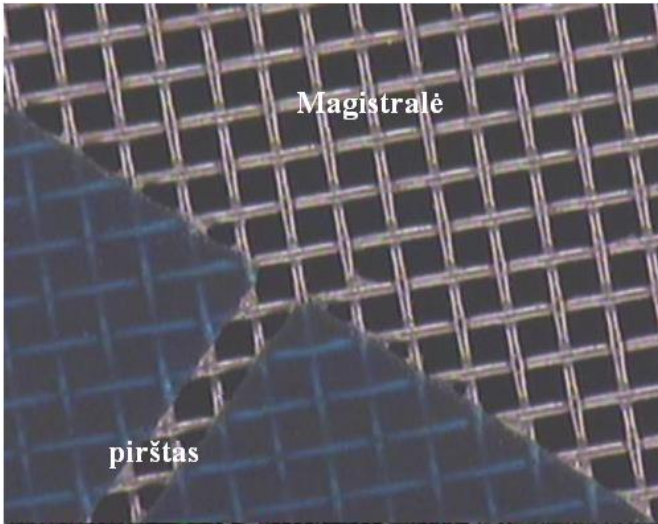
$$a_0 = \frac{d^2}{(c+d)^2} \quad (2.25)$$

Ypatingai plonos linijos spausdinimui reikalingos tam, kad šis santykis būtų kuo didesnis. Tačiau dėl tinklelio trūkimo rizikos atstumas tarp vielų negali būti didelis.. Minimalus šukų formos kontakto storis w_{f_min} , kuris gali būti pasiektas trafarete priklauso nuo vielos storio ir atstumo tarp vielų.

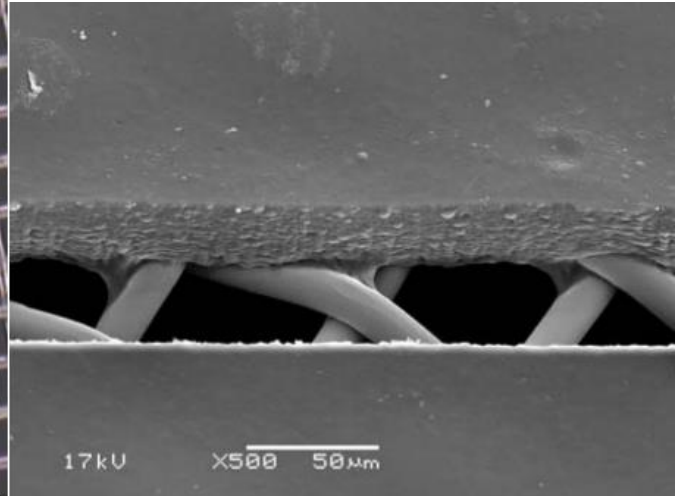
$$w_{f_min} = c \frac{(2c+d)\sqrt{2}}{d} \quad (2.26)$$

Teoriškai praspaudžiamos pastos kiekis pro vieną tinklelio akį apskaičiuojamas tokia formule:

$$V_{paste} = w_{st} \cdot d^2 \quad [2, 13]. \quad (2.27)$$



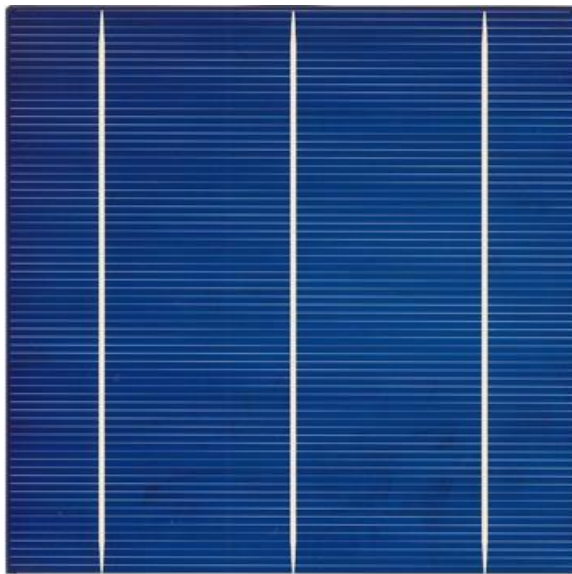
a) [14]



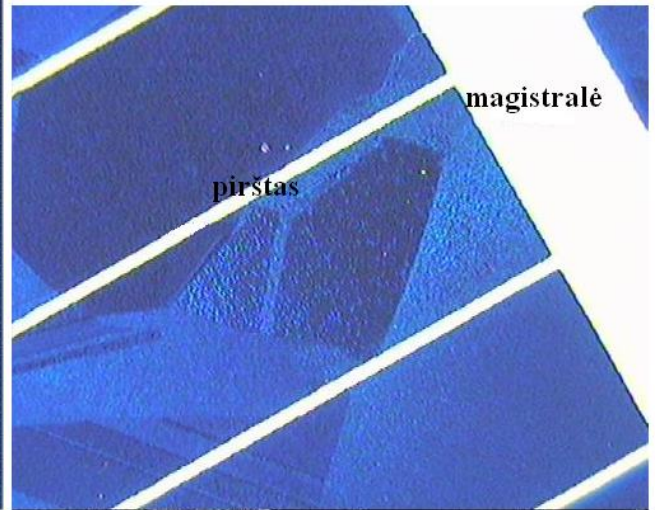
b) [12]

2.12 pav. a) Emulsija padengtas metalinis tinklelis formuojantis magistralės ir šukų formos kontaktus

b) priartintas trafareto šukų formos kontaktas [15]



a)



b)

2.13 pav. Atspausdintas šukų pavidalo viršutiniai kontaktai [15]

2.10 Pastų reikalavimai

Pastos turi būti:

1. Praspaudžiamos pro tinklelį (pastos dalelės turi būti pakankamai mažos kad galėtų būti praspaudžiamos pro metalinį tinklelį) ir užtikrinančios aukštą šukų formos kontaktų aukščio ir ploto santykį.
2. Užtikrinančios gerą elektrinį laidumą.
3. Gerai sukimbančios su plokštele.
4. Išlydoma.
5. Užtikrinančios ilgalaikį stabilumą [16].

Taip pat labai svarbu, kad pasta būtų lengvai spausdinama ir kad galutinio produkto efektyvumas būtų aukštas.

Pasta susideda iš mažų metalinių dalelių, kurios pasižymi dideliu laidumu (dažniausiai jų matmenys yra nuo 1 μm iki 7 μm). Metalinio tinklelio atviros vietos (akys) turi būti maždaug 5 kartus didesnės už didžiausią galimą metalinę dalelę pastoje, tam kad būtų išvengta metalinio tinklelio užsikimšimų [2]. Taip pat pastos sudėtyje yra stiklinių miltelių (kurie reikalingi užpildyti tarpus tarp kietų metalines dalelių) organinių junginių ir tirpiklių.

Svarbu, kad po džiovinimo proceso iš pastos išgaruotų tirpikliai, o liktų metalinės ir stiklo dalelės įterptos į organinius junginius, kurie sulipina daleles. Idealiu atveju, po kontaktų įdeginimo organiniai junginiai turi visiškai išdegti, o metalinės ir stiklo dalelės – suformuoti didelio aukščio ir pločio santykio šukų formos kontaktą. Metalinis kontaktas turi būti gero laidumo, mažos metalo su emiteriu (ar baze) kontakto varžos, užtikrinti gerą mechaninį prilipimą prie plokštelės [2, 16].

3 Tyrimo metodai

3.1 Matavimų metodika

Metalizacija – tai procesas, kurio metu yra suformuojami saulės elemento viršutinės ir apatinės pusės kontaktai, kurie yra užnešami trijų pakopų trafaretinio spausdinimo linijoje ir užtvirtinami greito deginimo krosnyje Rehm RFS-D 500. Pirmiausiai naudojant trafaretą atspausdinami ir išdžiovinami apatinės pusės sidabro ir aliuminio kontaktai. Tada plokštelės greitai apverčiamos ir ant kitos jų pusės atspausdinamas sidabro kontaktų tinklelis ir magistralės.

Po kontaktų spausdinimo, plokštelės yra patalpinamos į specialią deginimo krosnį, kurioje viršutiniai kontaktai suformuojami per nitrido sluoksnį. Kitoje pusėje deginimo metu suformuotas Si ir Al lydinys kompensuoja saulės elemento pusę ir sukuria apatinio paviršiaus lauką (BSF). BSF apsaugo mažą dalį fotogeneruojamų krūvio nešėjų, kad jie nepasiektų apatinės plokštelės pusės ir taip sumažina rekombinaciją apatinėje pusėje. Aliuminis taip pat veikia kaip matinis veidrodis, kuris atspindi didelio bangos ilgio šviesą, kurios dar nespėjo absorbuoti saulės elementas.

Proceso eiliškumas:

- Pirmas trafaretinis apatinės pusės Ag kontaktų spausdinimas:
 - kontaktai spausdinami pagal numatytus reikalavimus.
- Pirmas džiovinimas:
 - reikia nustatyti tokią temperatūrą, kuri atitiktų pastos reikalavimus.
- Antras trafaretinis apatinės pusės Al kontakto spausdinimas:
 - apatinės pusės Al kontaktas turi būti spausdinimas išlaikant tuos pačius atstumus į visas keturias puses.
- Antras džiovinimas (greito degimo krosnis):
 - reikia nustatyti tokią temperatūrą, kuri atitiktų pastos reikalavimus.
- Trečias trafaretinis priekinės pusės Ag kontaktų spausdinimas:
 - priekinės pusės Ag kontaktas turi būti spausdinimas išlaikant tuos pačius atstumus į visas keturias puses.

Greito degimo krosnyje saulės elemento kontaktai yra galutinai suformuojami juos įdeginant į silicio plokštelę. Degimo krosnis turi transportavimo juostą, kuria elementai keliauja per 18 skirtingos temperatūros zonų.

Pirmose septyniose greito degimo krosnies zonose temperatūra siekia ne daugiau 300 C. Čia kontaktų pastos yra galutinai išdžiovinamos. Kitose penkiose zonose yra palaikoma iki 600 C temperatūra. Čia sudeginamos spausdinimo pastos organinės liekanos. Po to plokštelės keliauja per tris zonas įkaitintas iki 700-900 C. Šiose zonose vienu metu vyksta šie procesai:

- Priekinės pusės tinklelio (Ag) įdeginimas per antireflekcinį SiN_x (ARC) sluoksnį. Taip pat suformuojamas ominis kontaktas su n tipo emiteriu.

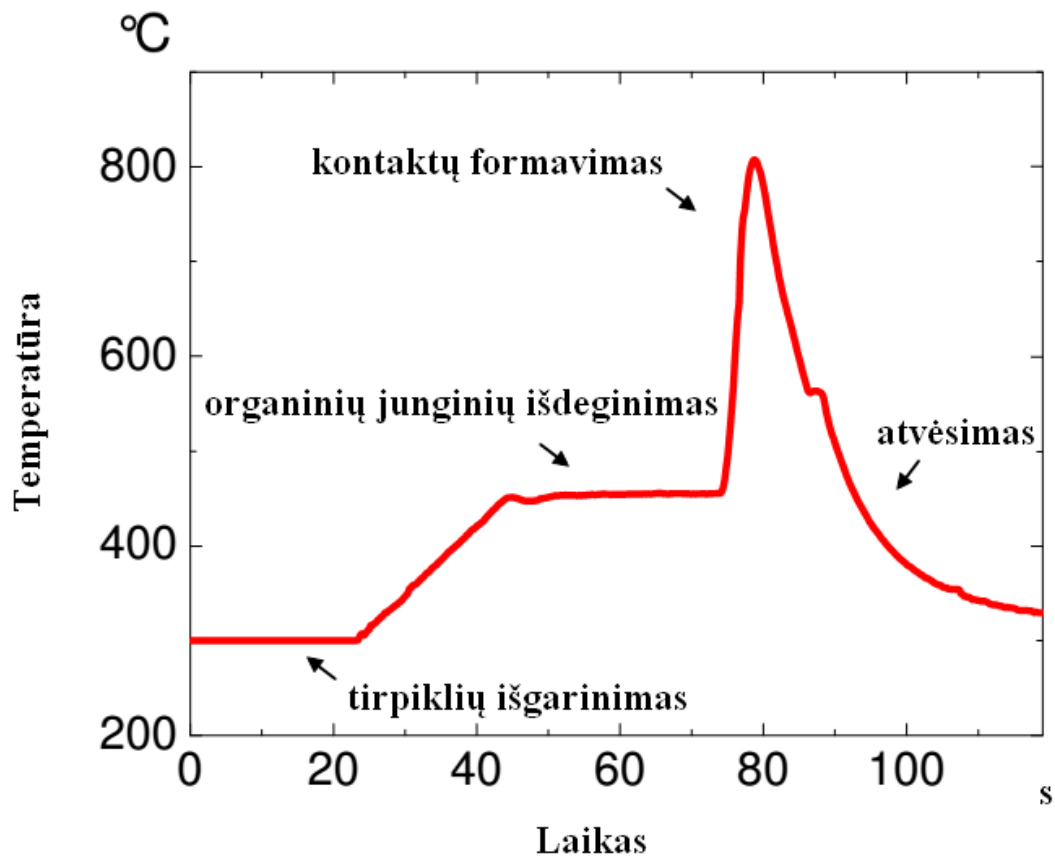
- Apatinėje saulės elemento dalyje suformuojamas Al-Si lydinys, kuris veikia kaip elektrinis kontaktas, bei apatinio paviršiaus laukas BSF: fosforu legiruotas sluoksnis kompensuojamas Al^{3+} jonais legiruotu sluoksniu. Šio sluoksnio dėka mažinama krūvio nešėjų rekombinacija apatinėje plokštelės pusėje.
- Vandenilio atomai, esantys silicio nitrido sluoksnyje, difunduoja į Si plokštelę, kur prisotina laisvus ryšius esančius defektinėse mc-Si zonose. Taip sumažinama krūvio nešėjų rekombinacija saulės elemento viduje.

Likusiose paskutinėse 4 zonose saulės elementai su įdegintais abiejų pusių kontaktais yra atvėsunami. Siekiant išvengti neigiamo šiluminio poveikio bei sumažinti elementų sulūžimo tikimybę. Plokštelės greito degimo krosnyje tarp skirtingų zonų pereina tolygų, bet greitą temperatūros kilimą.

Transportavimo greitis gali būti keičiamas nuo 1 m/min iki 7m/min.

Būtinai staigus temperatūros kilimo intervalas gaunamas veikiant saulės elementus matomiems ir trumpabangiams infraraudoniesiems didelio intensyvumo spinduliams. Be to, visos šildymo zonos yra atskirtos vienos nuo kitų apsaugotos nuo spinduliavimo ekranais siekiant išvengti temperatūros išplitimo krosnies ilgiu.

Dėl tos pačios priežasties, krosnies kamera yra sukonstruota taip, kad šilumos laidumas į išorę būtų nedidelis.



3.1 pav. Schema vaizduojanti saulės elemento, keliančio per krosnį, temperatūras. Temperatūras galima suskirstyti į keturias zonas: tirpiklių išgarinimo zona, organinių junginių išdeginimo zona, kontaktų formavimo zona ir plokštelės atvėsimo zona [2]

Po greito degimo proceso yra testuojama saulės elementų elektrinė ir optinė kokybė. Naudojamas STC (angl. Standart Test Conditions) tipo testavimo standartas esant 1000 W/m^2 apšviestumui, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai, oro masei, lygiai $1,5 \text{ kg}$, ir AM1,5G (moduliuotos amplitudės) signalo spektrui.

3.2 Bandiniai

Eksperimentams naudojami trys skirtingi šukų pavidalo viršutinės pusės trafaretai

A trafaretas: 400 akučių skaičius colyje, 18 μm vielų storis, 12 μm emulsijos storis, 96 kontaktai, kurių plotis - 50 μm , trys 1,5 mm pločio magistralės.

B trafaretas: 350 akučių skaičius colyje, 16 μm vielų storis, 15 μm emulsijos storis, 110 kontaktai, kurių plotis - 40 μm , trys 1,5 mm pločio magistralės.

C trafaretas: 400 akučių skaičius colyje, 18 μm vielų storis, 18 μm emulsijos storis, 96 kontaktai, kurių plotis - 50 μm , trys 1,4 mm pločio magistralės.

Eksperimentams naudojami du apatinės pusės kontaktams

D trafareto ir E trafareto parametrai tokie pat: 250 akučių skaičius colyje, 36 μm vielų storis, 10 μm emulsijos storis. Trafaretai skiriasi tik tuo, kad E trafareto vielų sujungimų vietos yra suspaustos.

Naudojamos pastos viršutinės pusės kontaktui:

A Ag (sidabro) pasta

B Ag (sidabro) pasta

C Ag (sidabro) pasta

D Ag (sidabro) pasta

E Ag (sidabro) pasta

Naudojamos pastos apatiniam kontaktui:

G Al (aliuminio) pasta

H Al (aliuminio) pasta

Eksperimentui naudojamos 156 x 156 mm dydžio kvadrato formos p-tipo polikristalinio silicio plokštelės. Jų storis 200mm. Plokštelės yra teksūrizuotos, turi p-n sandūrą; plokštelės padengtos antireflektingu-pasyvaciniu SiN_x sluoksniu. Plokštelių kraštai yra chemiškai izoliuoti. Visos plokštelės su kuriomis buvo atlikti eksperimentai yra komerciniai saulės elementai. Taip pat visi eksperimentai atlikti komercinės gamyklos sąlygomis.

4 Rezultatai ir jų aptarimas

Pagaminti saulės elementai su vienodu trafaretu (A) naudojant skirtingas sidabro pastas (A, B, C, D). Su kiekviena pasta pagaminta po 50 plokštelių. Kiekviena pasta buvo bandoma su skirtingomis įdeginimo temperatūromis ir geriausi kiekvienos pastos rezultatai pateikti 3 lentelėje. Čia pateikti apskaičiuoti optinių nuostolių ir elektrinių parametrų ir nuostolių vidurkiai. Optiniai nuostoliai apskaičiuoti pagal formulę:

$$p_s = \frac{\text{viršutinių kontaktų plotas}}{\text{SE viršutinės pusės plotas}}$$

Elektriniai nuostoliai apskaičiuoti pagal formulę:

$$p_{el} = \frac{I_{sc}}{U_{oc}} R_{ser} + \frac{U_{oc}}{I_{sc} R_{sh}},$$

kur – U_{oc} atviros grandinės įtampa, I_{sc} - trumpojo jungimo srovė, R_{ser} – nuosekioji varža, R_{sh} – šunto varža.

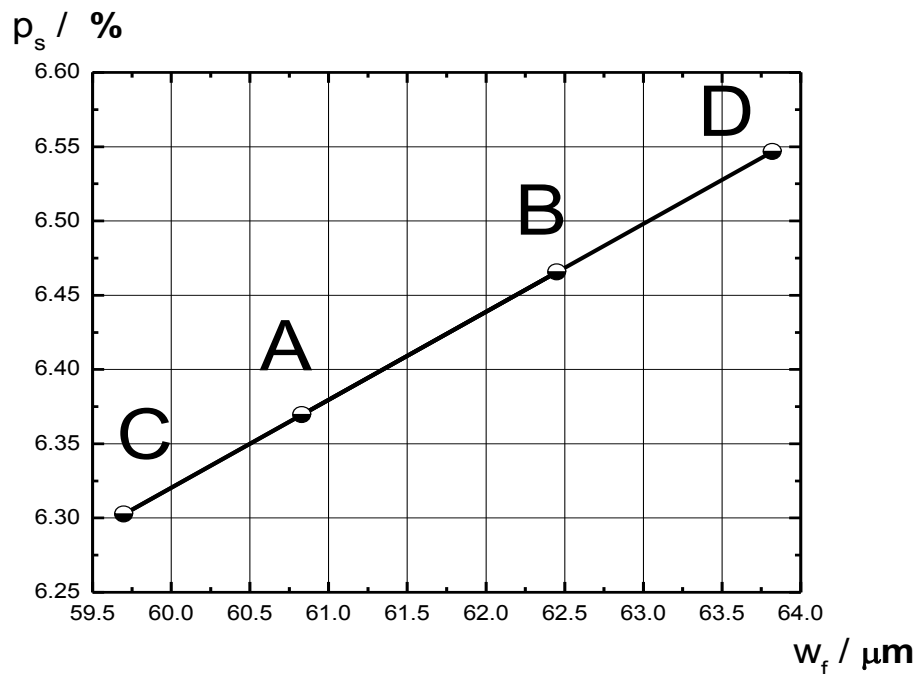
Taip pat parašyta programa "Matlab" pagalba, kuri teoriškai apskaičiuoja nuostolių pasiskirstymo žemėlapius, iš kurio galime matyti, kaip keičiasi nuostoliai, kintant šukų formos kontaktų skaičiui ir jų pločiui. Kad tai apskaičiuotume, reikia įvesti kontaktų savitąją varžą $\rho = 3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, emiterio varžą $R_{sh} = 70 \Omega/\square$, magistralės plotį $w_{bus} = 1,4 \text{ mm}$, kontaktų aukštį $h = 8,53 \mu m$ ir $9,53 \mu m$ (skaičiavimams imta vidutinė kontaktų aukščio vertė, kuri apskaičiuota pagal kontaktų svorį ant saulės elemento, realiai tiek magistralių tiek šukų formos kontaktų aukščiai gali skirtis), trumpojo jungimo srovę $I_{sc} = 8.73 \text{ A}$ ir 8.71 A , atviros grandinės įtampą $U_{oc} = 627,28 \text{ mm}$ ir 627.28 mm ir užpildos faktorių $FF = 78,44 \%$ ir $78,53 \%$. Pakeitus, bet kurį iš išvardintų parametrų nuostolių, pasiskirstymo žemėlapiai taip pat pasikeis. Teoriniams skaičiavimams imti E pastos B trafareto ir C trafareto duomenys.

Šio eksperimento tikslas ištirti viršutinės pusės šukų formos kontaktų optines ir elektrines savybes, naudojant skirtingas sidabro pastas ir skirtingus trafaretus.

3 lentelė. Saulės elementų, pagamintų su skirtingomis viršutinės pusės kontaktų sidabro pastomis optinių ir elektrinių parametrų vidurkiai

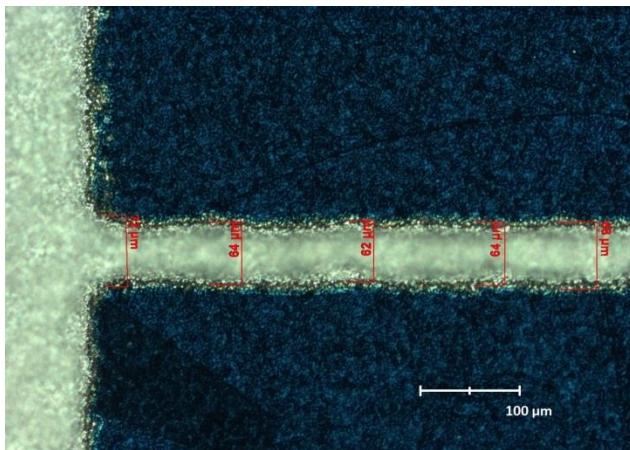
	η / %	V_{oc} / mV	I_{sc} / A	FF / %	N_f	R_{ser} / m Ω	R_{shunt} / Ω	w_f / μm	p_s / %	p_{el} / %	p_{visi} / %
A pasta A traferetas	17.60 (± 0.04)	630.83 (± 1)	8.60 (± 0.01)	79.02 (± 0.09)	96	1.89 (± 0.01)	330 (± 10)	60.83	6.37	2.6	8.97
B pasta A traferetas	17.61 (± 0.04)	632.13 (± 1)	8.59 (± 0.01)	79.03 (± 0.09)	96	1.88 (± 0.01)	297 (± 10)	62.45	6.47	2.58	9.05
C pasta A traferetas	17.34 (± 0.04)	628.13 (± 1)	8.60 (± 0.01)	78.20 (± 0.09)	96	1.99 (± 0.01)	357 (± 10)	59.7	6.30	2.75	9.05
D pasta A traferetas	17.60 (± 0.04)	630.47 (± 1)	8.62 (± 0.01)	78.89 (± 0.09)	96	1.98 (± 0.01)	382 (± 10)	63.82	6.55	2.73	9.27

η – naudingumo koeficientas, V_{oc} – atviros grandinės įtampa, I_{sc} - trumpojo jungimo srovė, FF – užpildos daugiklis, R_{ser} – nuosekioji varža, R_{shunt} – šunto varža, w_f – šukų formos kontaktų plotis, N_f – kontaktų skaičius, p_s – optiniai nuostoliai, p_{el} – elektriniai nuostoliai, p_{visi} – optinių ir elektrinių nuostolių suma.

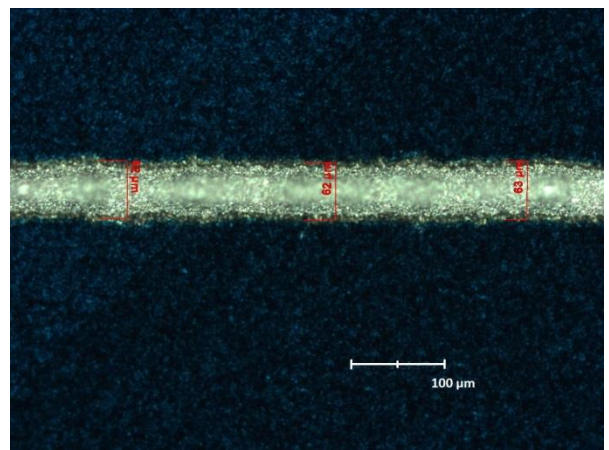


4.1 Optinių nuostolių p_s priklausomybė nuo kontaktų pločio w_f , esant tam pačiam kontaktų skaičiui $N_f = 96$

Su optiniu mikroskopu padarytos atspausdintų bandinių viršutinės pusės kontaktų nuotraukos, a) nuotraukose pavaizduota kaip šukų formos kontaktai jungiasi su magistrale.



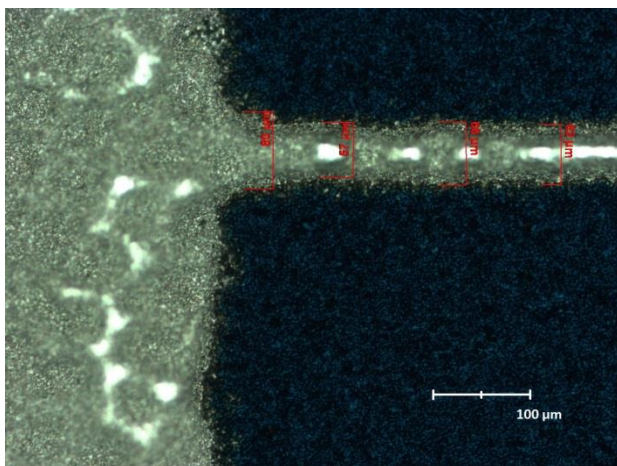
a)



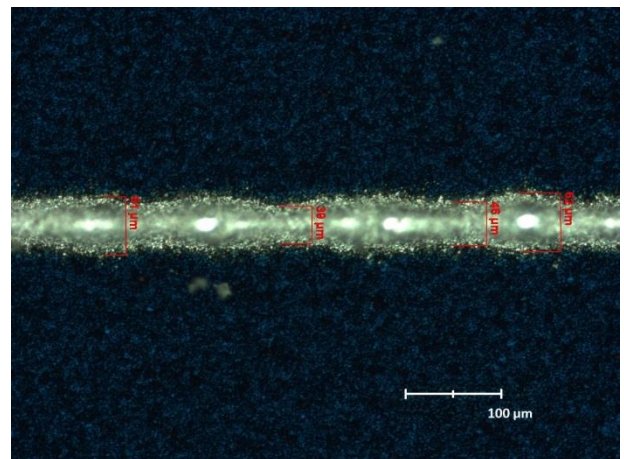
b)

4.2 pav. A pasta ir A trafaretu atspausdinti ir išdeginti viršutiniai kontaktai

A pasta ir A trafaretu atspausdinti kontaktai (4.2 pav.) yra gana tolygaus pločio, skirtumas tarp kontakto susiaurėjimų ir išplatėjimų yra apie 14 %, vidutinis kontaktų plotis iš 3 lentelės $w_f = 60.83 \mu\text{m}$.



a)

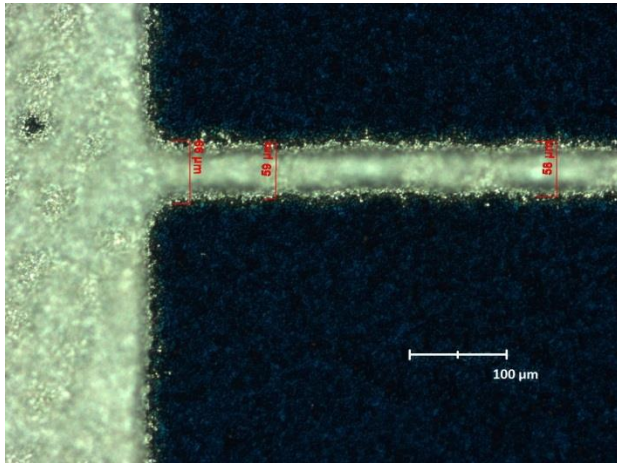


b)

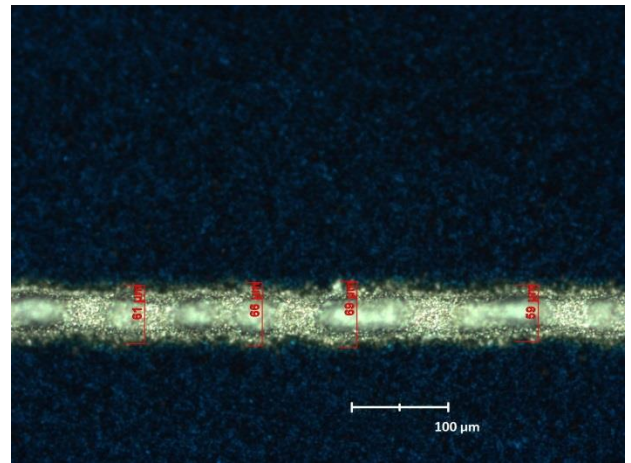
4.3 pav. B pasta A trafaretu atspausdinti ir išdeginti viršutiniai kontaktai

B pasta ir A trafaretu atspausdintų kontaktų (4.3 pav.) susiaurėjimų ir išplatėjimų skirtumas yra apie 37 %. Gaminant saulės elementus masiškai (atlikus daug spausdinimo ciklų su šia pasta tose

pačiose susiaurėjimo vietose ant nauju plokštelių gali atsirasti kontaktų trūkiai, kurie labai blogina tiek išvaizdos, tiek elektrines savybes. Toks kontaktų netolygumas didina nuosekliją varžą, mažina užpildos faktorių ir mažina efektyvumą. Vidutinis kontaktų plotis iš 3 lentelės $w_f = 62.45 \mu\text{m}$. Dėl didesnio kontaktų pločio yra didesni optiniai nuostoliai.



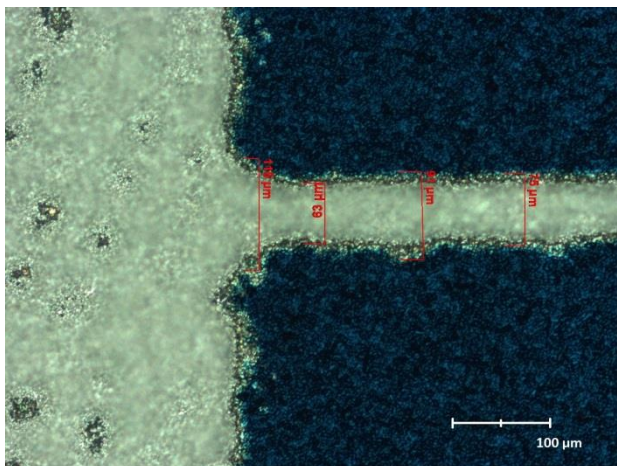
a)



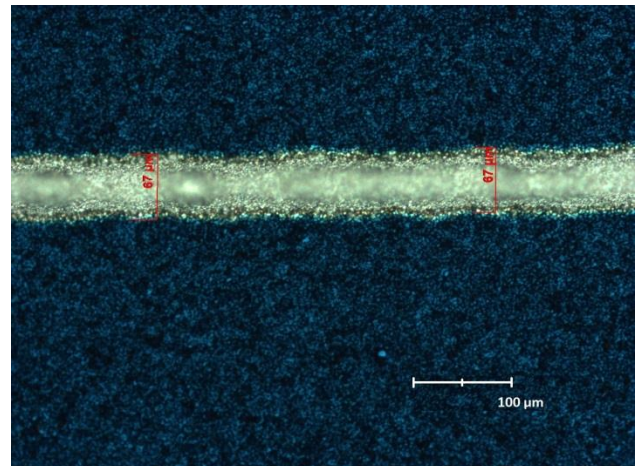
b)

4.4 pav. C pasta A trafaretu atspausdinti ir išdeginti viršutiniai kontaktai

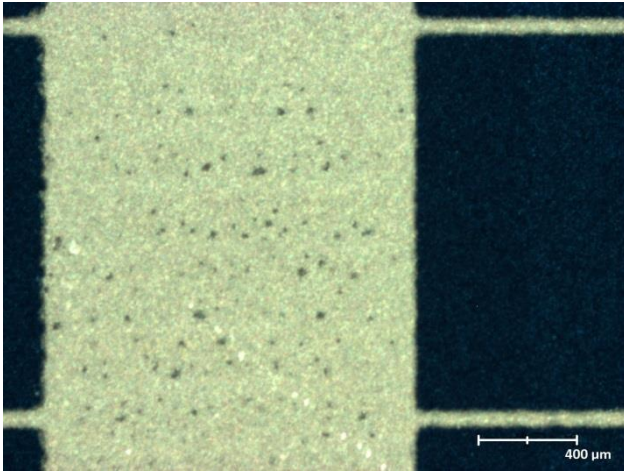
C pasta ir A trafaretu atspausdintų kontaktų (4.4 pav.) susiaurėjimų ir išplatėjimų skirtumas yra apie 40 %. Vidutinis kontaktų plotis iš 3 lentelės $w_f = 59.7 \mu\text{m}$. Dėl mažo kontaktų pločio sumažėja optiniai nuostoliai, bet padidėja nuoseklioji varža, kuri įtakoja elektrinius nuostolius.



a)



b)



c)

4.5 pav. D pasta A trafaretu atspausdinti ir išdeginti viršutiniai kontaktai

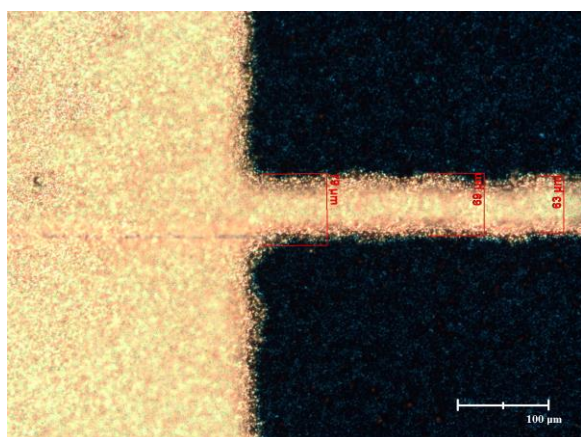
D pasta ir A trafaretu atspausdintų kontaktų (4.5 pav.) susiaurėjimų ir išplatėjimų skirtumas yra apie 31 %. Vidutinis kontaktų plotis iš 3 lentelės $w_f = 63.82 \mu\text{m}$. Matomi pastos išsiliejimai, a) paveikslėlyje matoma kontakto sritis, kurio plotis siekia $91 \mu\text{m}$. Tai lemia blogą išvaizdos kokybę ir padidėjusius optinius nuostolius.

Pagaminti saulės elementai naudojant vieną sidabro pastą (E) su skirtingais trafaretais (B, C). Su kiekvienu skirtingu trafaretu pagaminta po 500 plokštelių. Rezultatai pateikti 4 lentelėje.

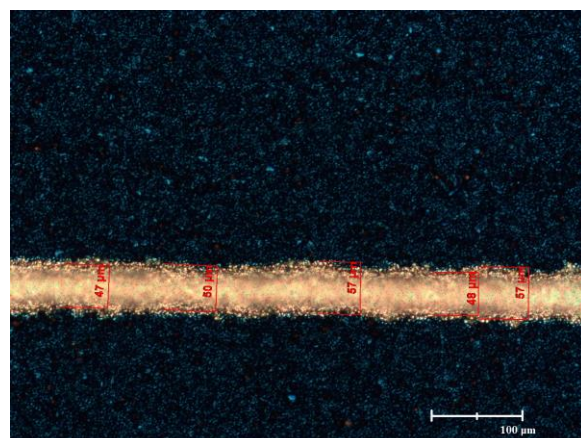
4 lentelė. Saulės elementų, pagamintų su skirtingomis viršutinės pusės kontaktų sidabro pastomis optinių ir elektrinių parametrų vidurkiai

	η / %	V_{oc} / mV	I_{sc} / A	FF / %	N_f	R_{ser} / m Ω	R_{shunt} / Ω	w_f / μm	p_s / %	p_{el} / %	p_{visi} / %	p_t / %
E pasta B traferetas	17.65 (±0.04)	627.52 (±1)	8.73 (±0.01)	78.44 (±0.09)	110	1.62 (±0.01)	373 (±10)	53.42	6.4	2.27	8.67	8.52
E pasta C traferetas	17.63 (±0.04)	627.28 (±1)	8.71 (±0.01)	78.53 (±0.09)	96	1.72 (±0.01)	415 (±10)	62	6.34	2.41	8.75	8.66

η – naudingumo koeficientas, V_{oc} – atviros grandinės įtampa, I_{sc} - trumpojo jungimo srovė, FF – užpildos daugiklis, R_{ser} – nuosekioji varža, R_{shunt} – šunto varža, w_f – šukų formos kontaktų plotis, N_f – kontaktų skaičius, p_s – optiniai nuostoliai, p_{el} – elektriniai nuostoliai, p_{visi} – optinių ir elektrinių nuostolių suma, p_t – teoriškai apskaičiuota optinių ir elektrinių nuostolių suma

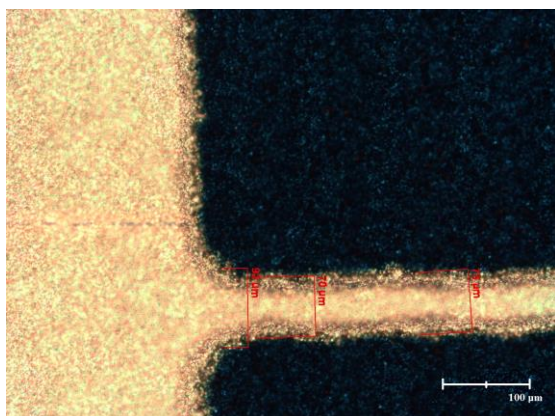


a)

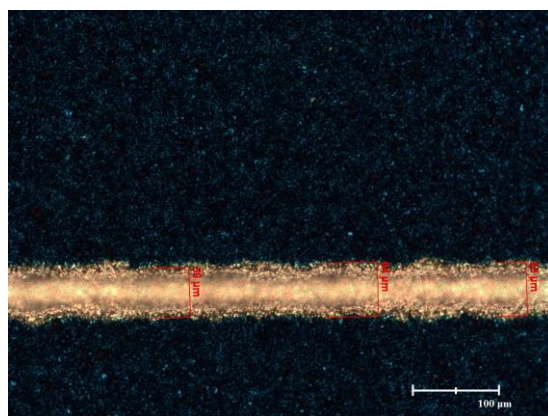


b)

4.6 pav. E pasta B trafaretu atspausdinti ir išdeginti viršutiniai kontaktai



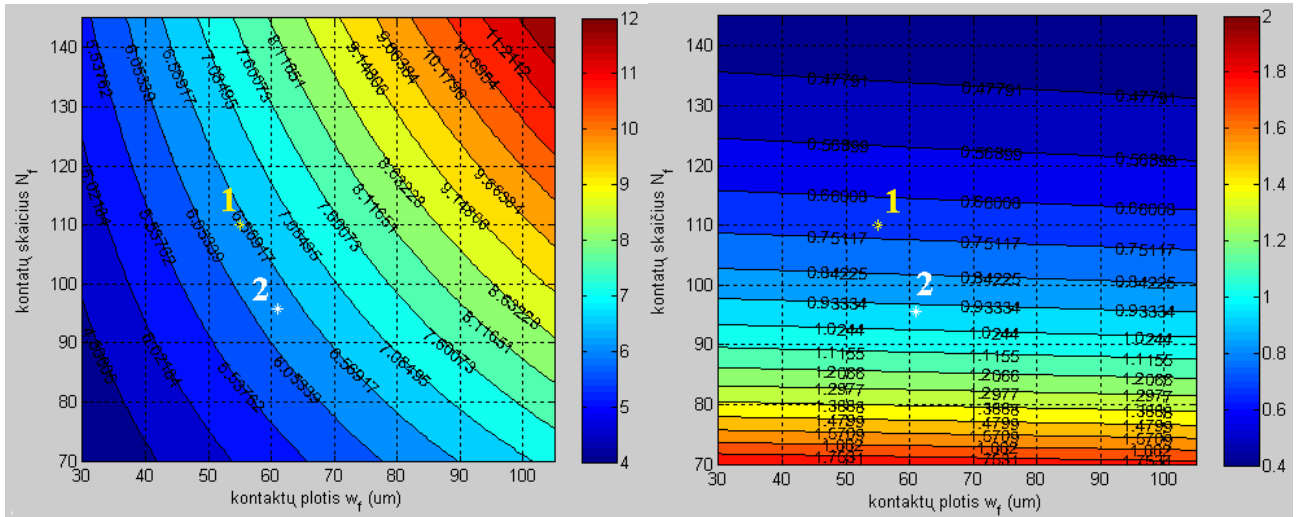
a)



b)

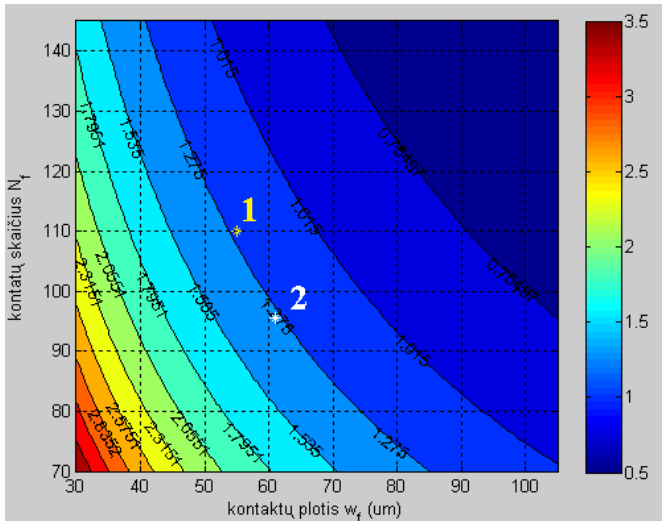
4.7 pav. E pasta C trafaretu atspausdinti ir išdeginti viršutiniai kontaktai

4.6 ir 4.7 paveiksluose matomi gana tolygaus pločio kontaktai gauti su E pasta, skirtumas tarp kontakto susiaurėjimų ir išplatėjimų yra apie 17 % su B trafaretu ir apie 10 % su C trafaretu, vidutinis kontaktų plotis gautas su B trafaretu $w_f = 53.43 \mu\text{m}$, su C trafaretu $w_f = 62 \mu\text{m}$. Nuosekioji varža R_{ser} tiek su E pasta gauta mažesnė nei su kitomis pastomis, nors trafaretai ir skirtingi. A ir C trafaretai skiriasi tik emulsijos storiu (12 ir 18 μm) ir magistralių pločiu (1,4 mm ir 1,5 mm). Kontaktų pločiai su A ir C trafaretu gauti labai panašūs. Nuosekioji varža, sumažinus magistralės plotį nuo 1,5 mm iki 1,4 mm, teoriškai turėtų padidėti 1,073 karto. Nuosekiosios varžos R_{ser} sumažėjimą galėjo lemti geresnė E pastos cheminė sudėtis ir kontaktų aukščio ir pločio santykis (ASP), kurį galėjo įtakoti storesnė C trafareto emulsija.



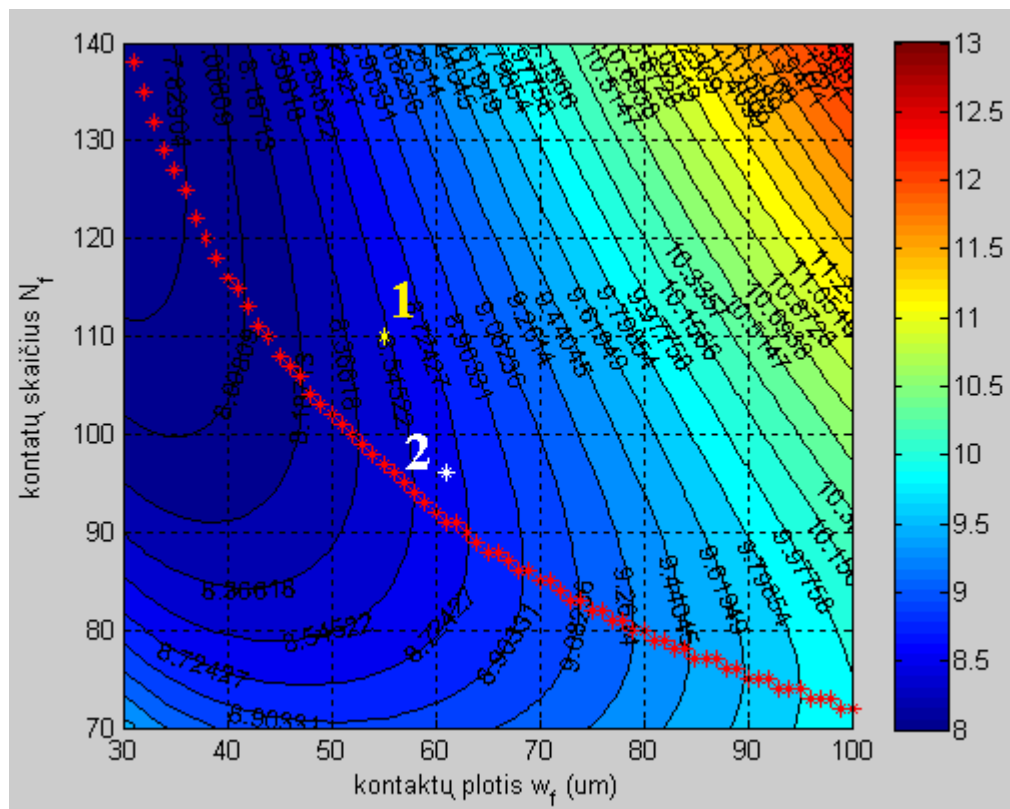
a)

b)



c)

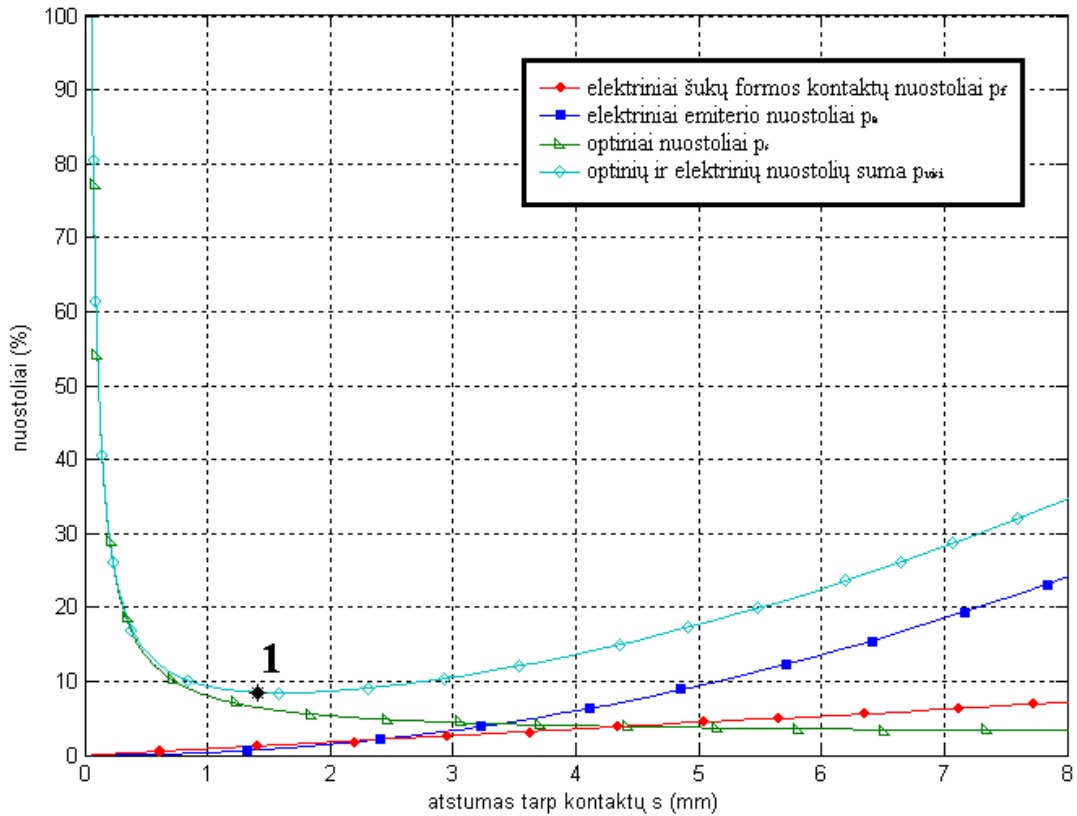
4.8 pav. Teoriškai apskaičiuotų nuostolių pasiskirstymo žemėlapis a) Optiniai nuostoliai $p_s(\%)$, b) elektriniai nuostoliai $p_e(\%)$ atsiradę dėl emiterio varžos $R = 70 \Omega/\square$, c) elektriniai nuostoliai $p_f(\%)$ dėl kontaktų varžos



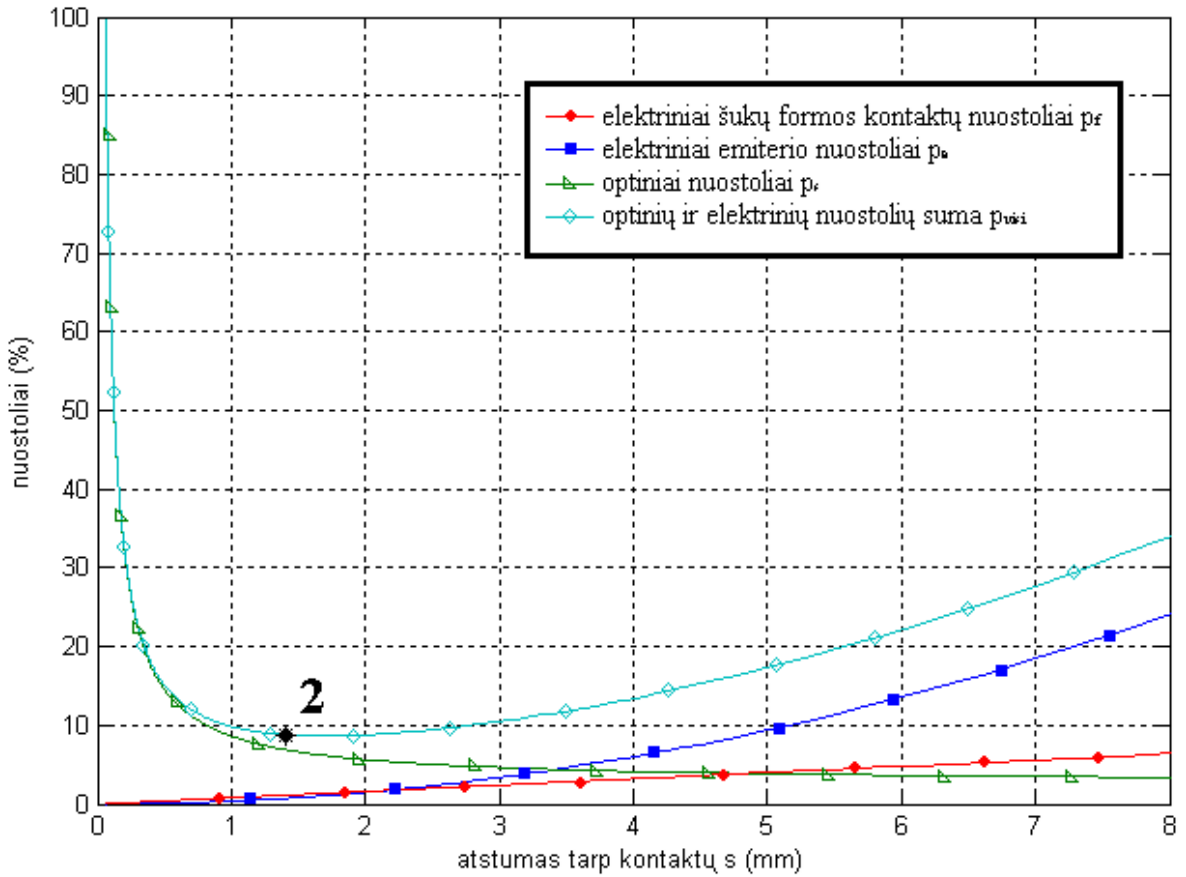
4.9 pav. Teoriškai apskaičiuotų optinių ir elektrinių nuostolių ($p_s(\%) + p_f(\%) + p_e(\%)$) pasiskirstymo žemėlapis

4.8 ir 4.9 paveiksluose galetonas taškas pažymėtas numeriu 1 yra teoriškai apskaičiuoti nuostoliai kai saulės elementas turi $N_f = 110$ šukų formos kontaktų, kurių plotis $w_f = 53.43 \mu\text{m}$. Baltas taškas pažymėtas numeriu 1 yra teoriškai apskaičiuoti nuostoliai, kai saulės elementas turi $N_f = 96$ šukų formos kontaktus, kurių plotis $w_f = 62 \mu\text{m}$. Raudoni taškai yra teoriškai apskaičiuoti ekstremumai $p_{\text{visi}}\{N_f(w_f)\}$; jie parodo kiek saulės elementas turi turėti šukų formos kontaktų N_f prie pasirinkto kontaktų pločio w_f , kad nuostoliai būtų mažiausi.

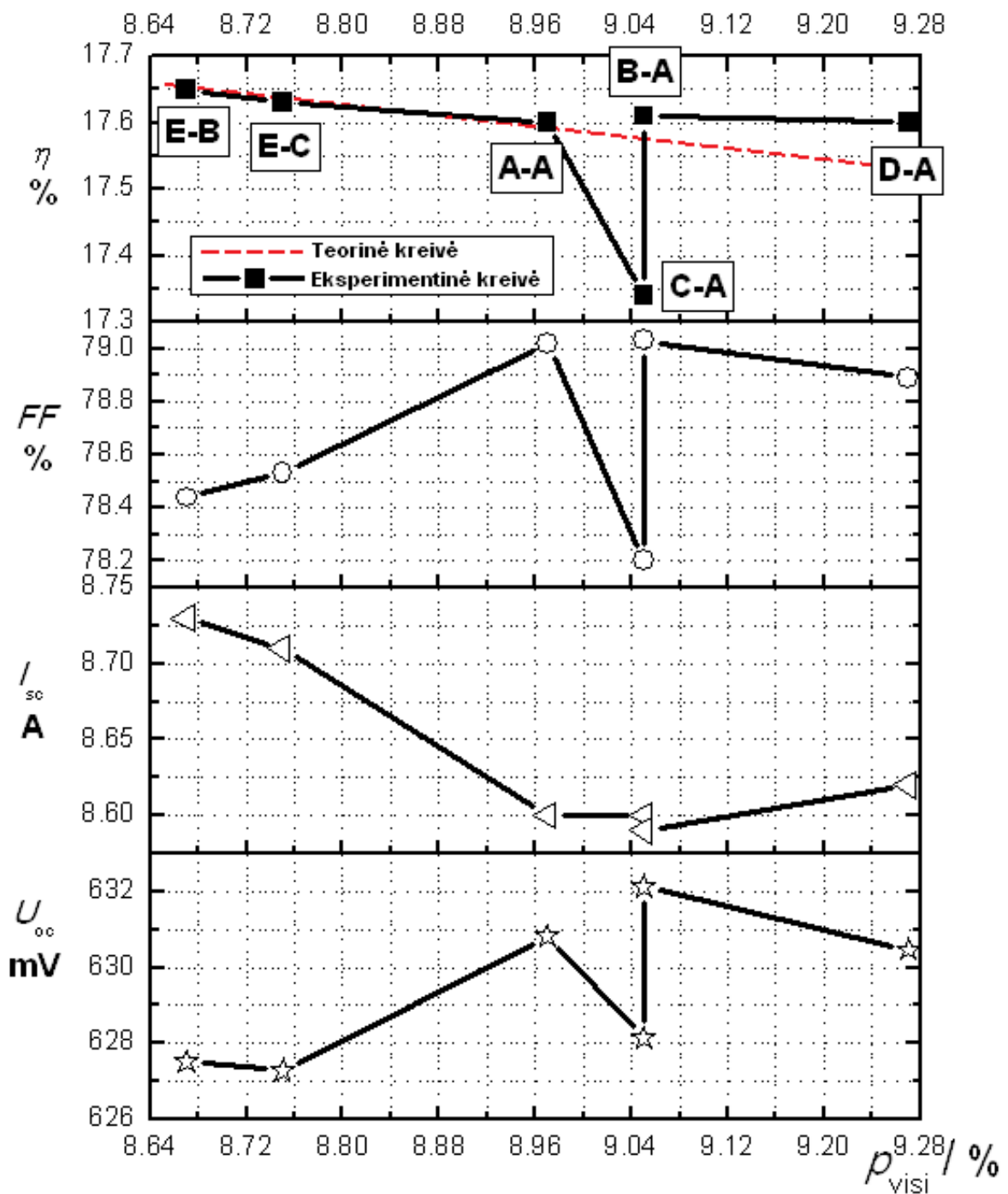
Apskaičiuotais nuostolių pasiskirstymo žemėlapiams galima remtis, keičiant trafareto kontaktų skaičių N_f , kontaktų plotį w_f , emulsijos ir metalinio tinkelio vielų storį, nuo kurių priklauso kontaktų aukštis h , kad gautume kuo mažesnius nuostolius p saulės elemente, kuo didesnę naudingumo koeficientą η , ir kuo mažesnę kainos per vatą santykį, kuris optimizuojant viršutinius kontaktus priklauso nuo sunaudoto sidabro kiekio kontaktams.



4.10 pav. Teoriškai apskaičiuoti nuostoliai nuo atstumo $s = L/(N_f - 1)$ tarp šukų formos kontaktų, kai kontaktų plotis w_f pastovus. $L = 153$ mm. Čia apskaičiuoti nuostoliai, kai kontaktų plotis $w_f = 53,42$ μm , kuris gautas su B trafaretu. Taškas pažymėtas numeriu 1 atitinka nuostolius, kai saulės elementas turi $N_f = 110$ šukų formos kontaktų.



4.11 pav. Teoriškai apskaičiuoti nuostoliai nuo atstumo $s = L/(N_f - 1)$ tarp šukų formos kontaktų, kai kontaktų plotis w_f pastovus. $L = 153$ mm. Čia apskaičiuoti nuostoliai, kai kontaktų plotis $w_f = 62$ μm , kuris gautas su C trafaretu. Taškas pažymėtas numeriu 2 atitinka nuostolius, kai saulės elementas turi $N_f = 96$ šukų formos kontaktus.



4.12 pav. SE elektrinių parametų priklausomybė nuo apskaičiuotų optinių ir elektrinių nuostolių sumos

$$p_{\text{visi}} = p_s + p_{\text{el.}}$$

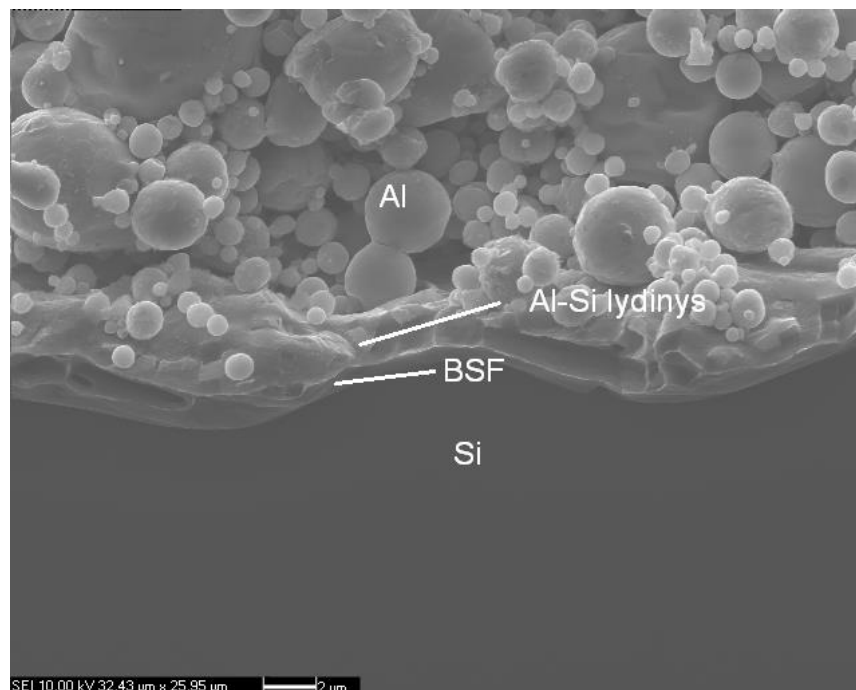
Iš 4.12 pav. matoma, kad naudingumo koeficientas η yra didžiausias kai nuostoliai p_{visi} yra mažiausi. Matoma, kad naudingumo koeficientas ne visiškai priklauso nuo apskaičiuotų nuostolių. Tai gali įtakoti tai, kad skaičiuojant nuostolius nėra atsižvelgta į metalo su puslaidininkiu sandūros varžos

nuostolius, rekombinacinius nuostolius ir šviesos, atspindėjusios nuo kontakto kraštų, patekusios į saulės elementą ir absorbuotos.

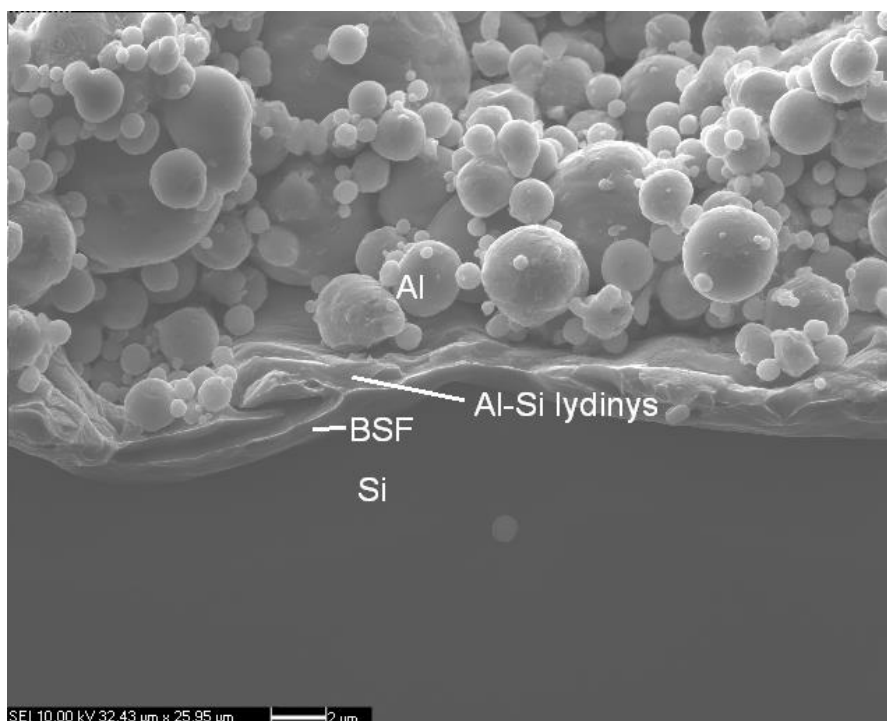
Šio eksperimento tikslas ištirti galinės pusės G aliuminio pastą ir palyginti su pagrindine („baseline“) H aliuminio pasta, ištirti, kaip skiriasi SE naudingumo koeficientas ir elektriniai parametrai naudojant dvi skirtingas aliuminio pastas ir keičiant jų įdeginimo pikines temperatūras aukšto degimo krosnyje. Ištirti, kaip galinio paviršiaus sluoksnis (BSF) įtakoja SE elektriniams parametrams.

Pagaminti saulės elementai, užnešant ir išdžiovinant ant galinės pusės aliuminio pastą (naudojamos dvi skirtingos aliuminio pastas (G) ir (H) ir du skirtingi trafaretai (D, E), kad būtų galima gauti skirtingus užnešamos pastos kiekius ant SE (mg/cm^2)), toliau plokštelės su išdžiovintomis pastomis praėjo pro greito degimo krosnį Rehm, kur kontaktai buvo įdeginami (eksperimente buvo keičiama pikinė įdeginimo temperatūra). Kiekviena bandinių grupę sudaro 80 plokštelių.

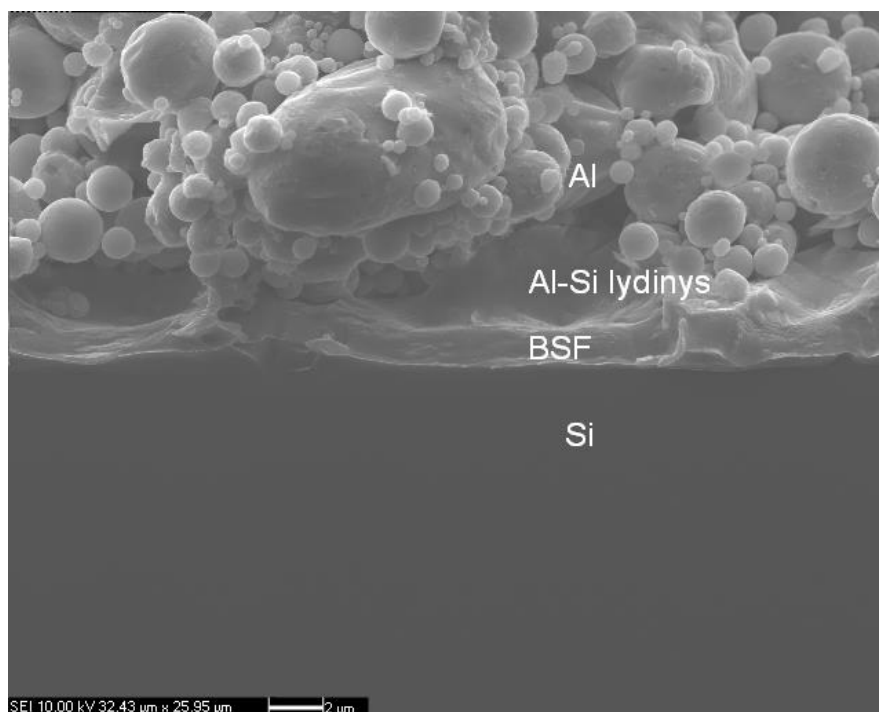
Su skenuojančiu elektroniniu mikroskopu ScanCam Apollo 300, esant 3700 didinimui, padarytos saulės elementų, pagamintų su skirtingomis galinės pusės Al pastomis, nuotraukos.



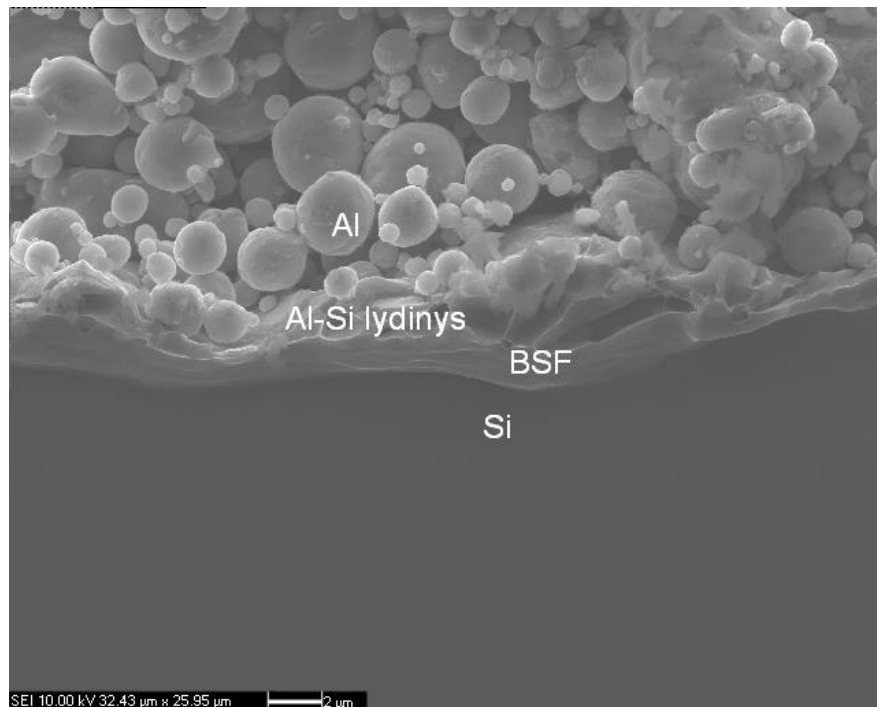
4.13 pav. Saulės elemento, pagaminto su G Al pasta ir D trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF sluoksnis, SEM nuotrauka, esant 850 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 6,2 \text{ mg}/\text{cm}^2$, **BSF = 0,73 μm**, $T = 850 \text{ °C}$.



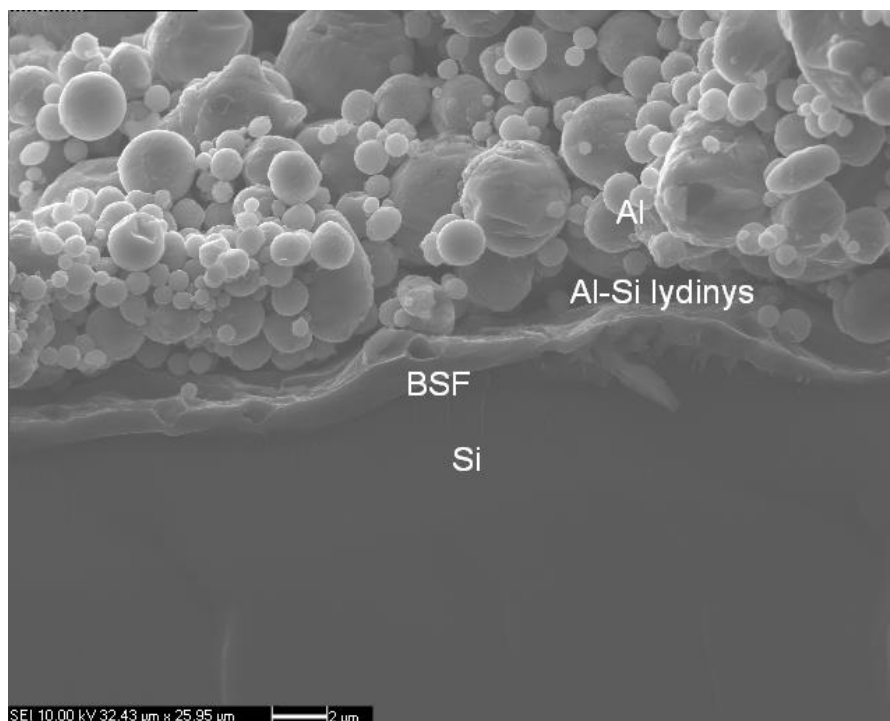
4.14 pav. Saulės elemento, pagaminto su G Al pasta ir D trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF suloksnis, SEM nuotrauka, esant 850 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 6,2 \text{ mg/cm}^2$, **BSF = 0,83 μm**, $T = 860 \text{ °C}$.



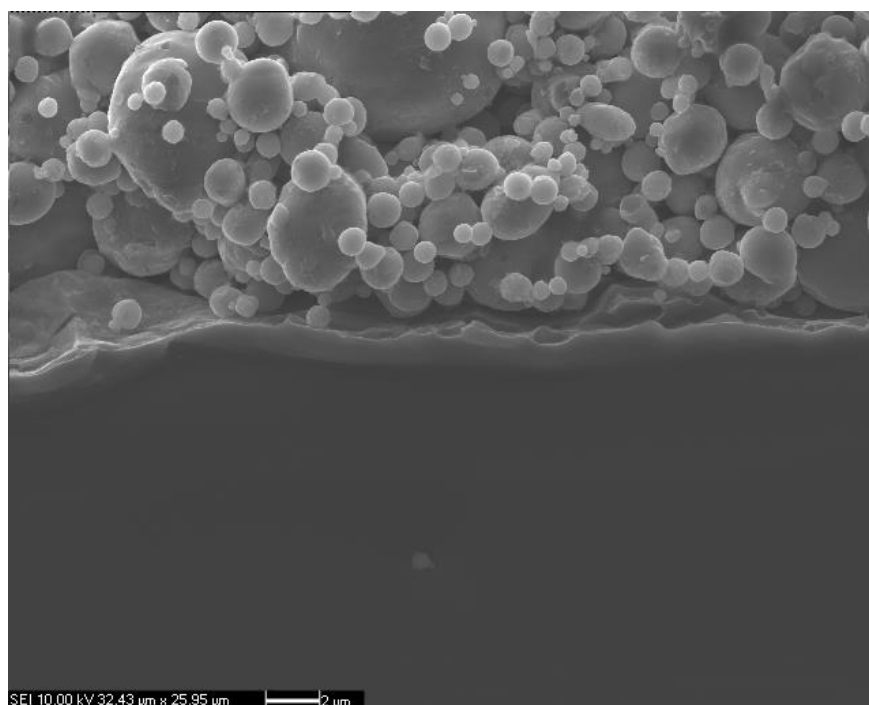
4.15 pav. Saulės elemento, pagaminto su G Al pasta ir D trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF suloksnis, SEM nuotrauka, esant 850 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 6,2 \text{ mg/cm}^2$, **BSF = 0,93 μm**, $T = 870 \text{ °C}$.



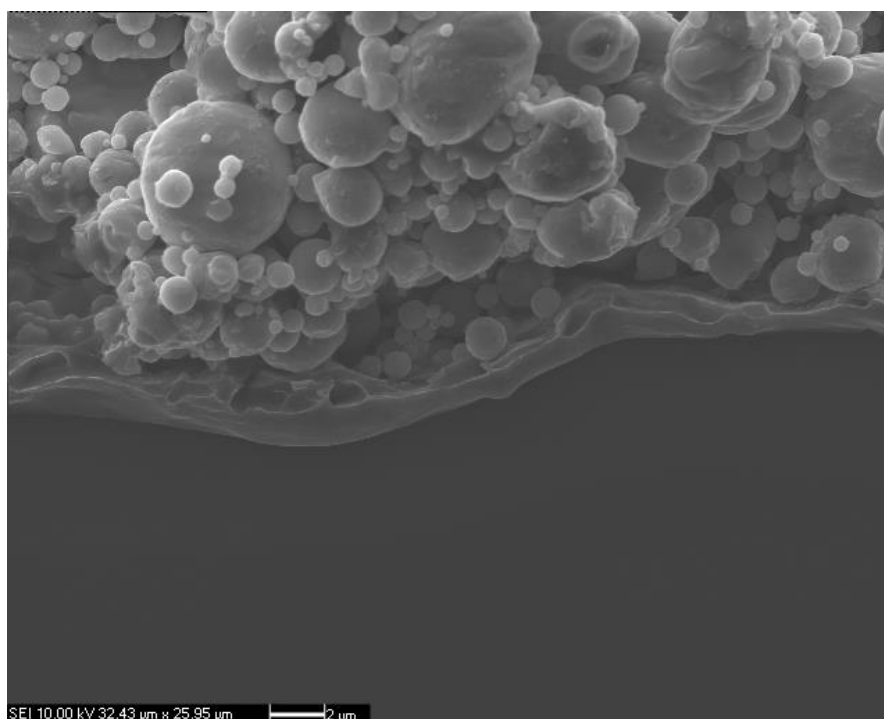
4.16 pav. Saulės elemento, pagaminto su G Al pasta ir E trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF suloksnis, SEM nuotrauka, esant 850 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 5,4 \text{ mg/cm}^2$, **BSF = 0,99 μm**, $T = 850 \text{ °C}$.



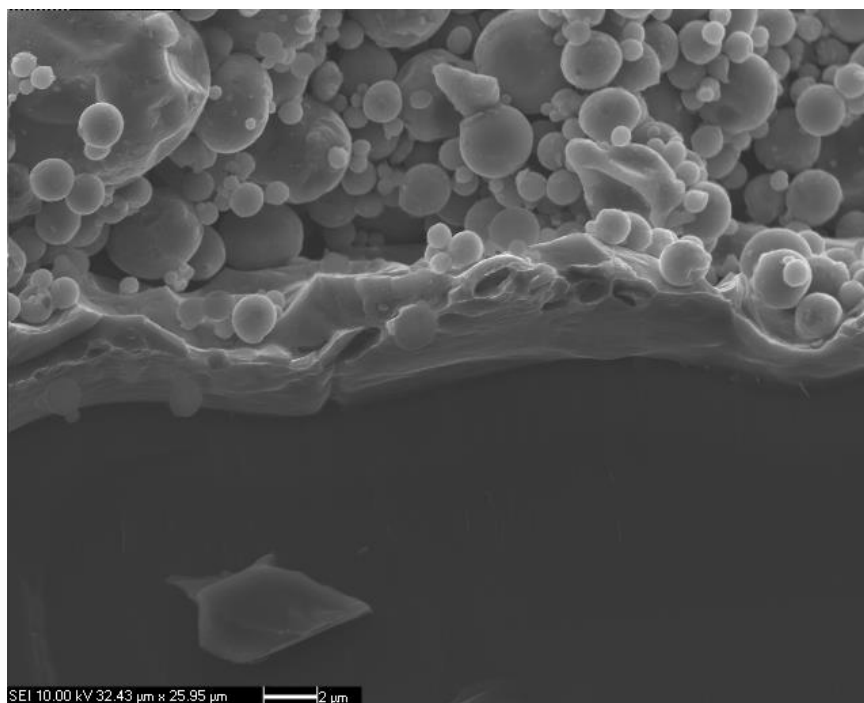
4.17 pav. Saulės elemento, pagaminto su G Al pasta ir E trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF suloksnis, SEM nuotrauka, esant 860 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 5,4 \text{ mg/cm}^2$, **BSF = 1 μm**, $T = 860 \text{ °C}$.



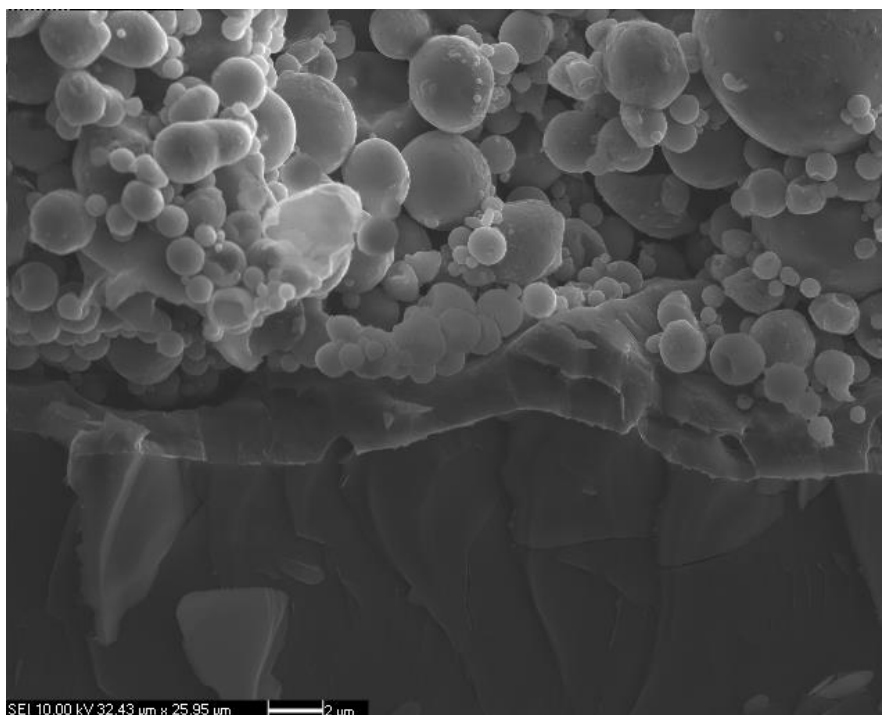
4.18 pav. Saulės elemento, pagaminto su G Al pasta ir E trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF suloksnis, SEM nuotrauka, esant 850 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 5,4 \text{ mg/cm}^2$, **BSF = 1,07 μm**, $T = 870 \text{ °C}$.



4.19 pav. Saulės elemento, pagaminto su G Al pasta ir E trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF suloksnis, SEM nuotrauka, esant 850 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 5,4 \text{ mg/cm}^2$, **BSF = 1,16 μm**, $T = 880 \text{ °C}$.



4.20 pav. Saulės elemento, pagaminto su H Al pasta ir D trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF suloksnis, SEM nuotrauka, esant 850 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 6,2 \text{ mg/cm}^2$, **BSF = 2,2 μm**, $T = 870 \text{ °C}$.



4.21 pav. Saulės elemento, pagaminto su H Al pasta ir D trafaretu skerspjūvio, kurioje matosi BSF suloksnis, SEM nuotrauka, esant 850 °C pikinei įdeginimo temperatūrai. Užneštos ant SE aliuminio pastos masė $M = 6,2 \text{ mg/cm}^2$, **BSF = 2,93 μm**, $T = 880 \text{ °C}$.

5 lentelė. Saulės elementų, pagamintų su skirtingomis apatinės pusės kontaktų aliuminio pastomis elektrinių parametų vidurkiai

	$T /$ °C	$M /$ mg/cm ²	$BSF /$ μm	$\eta /$ %	V_{oc} / mV	I_{sc} / A	FF / %	R_{ser} / mΩ	R_{shunt} / Ω
G pasta D traferetas	850	6,2	0,73	17.28 (±0.04)	623 (±1)	8.70 (±0.01)	77.57 (±0.09)	2.3 (±0.01)	141 (±10)
G pasta D traferetas	860	6,2	0,83	17.36 (±0.04)	623 (±1)	8.68 (±0.01)	78.12 (±0.09)	1.9 (±0.01)	192 (±10)
G pasta D traferetas	870	6,2	0,93	17.34 (±0.04)	622 (±1)	8.66 (±0.01)	78.41 (±0.09)	1.8 (±0.01)	180 (±10)
G pasta E traferetas	850	5,4	0,99	17.35 (±0.04)	623 (±1)	8.67 (±0.01)	78.13 (±0.09)	2 (±0.01)	223 (±10)
G pasta E traferetas	860	5,4	1	17.52 (±0.04)	625 (±1)	8.70 (±0.01)	78.44 (±0.09)	1.8 (±0.01)	191 (±10)
G pasta E traferetas	870	5,4	1,07	17.59 (±0.04)	626 (±1)	8.70 (±0.01)	78.59 (±0.09)	1.8 (±0.01)	187 (±10)
G pasta E traferetas	880	5,4	1,16	17.45 (±0.04)	624 (±1)	8.70 (±0.01)	78.20 (±0.09)	1.8 (±0.01)	158 (±10)
H pasta D traferetas	870	6,2	2,2	17.62 (±0.04)	625 (±1)	8.75 (±0.01)	78.42 (±0.09)	1.8 (±0.01)	178 (±10)
H pasta D traferetas	880	6,2	2,93	17.63 (±0.04)	625 (±1)	8.71 (±0.01)	78.61 (±0.09)	1.7 (±0.01)	170 (±10)

η – naudingumo koeficientas, V_{oc} – atviros grandinės įtampa, I_{sc} - trumpojo jungimo srovė, FF – užpildos daugiklis, R_{ser} – nuosekioji varža, R_{shunt} – šunto varža, T – pikinė įdeginimo temperatūra, M – užneštos aliuminio pastos masė kvadratiniam centimetrui, BSF – galinio paviršiaus sluoksnio storis.

Iš gautų rezultatų matyti, kad SE naudingumo koeficientas ir kiti elektriniai parametrai yra geriausi naudojant H pasta.

Išvados

1. Ištirta, kad SE naudingumo koeficientas yra didžiausias $\eta = 17,65 \%$, kai apskaičiuotų optinių elektrinių nuostolių suma yra mažiausia $p_{\text{visi}} = 8,67 \%$. Tai gauta su E pasta ir B trafaretu.
2. Nustatyta, kad naudingumo koeficientas nepriklauso tiesiškai nuo apskaičiuotų optinių ir elektrinių nuostolių – teoriškai naudingumo koeficientas priklauso nuo nuostolių tiesiškai: $\eta = \eta_{\text{max}}(1-p)$, tai galėjo įtakoti, kad skaičiuojant nuostolius nėra atsižvelgta į metalo su puslaidininkiu sandūros varžos nuostolius, rekombinacinius nuostolius ir šviesos, atsispindejusios nuo kontakto kraštų, patekusios į saulės elementą ir absorbuotos.
3. Ištirta, kad A ir E pastos kontaktai yra tolygesni, nei kitų tirtų pastų, skirtumas tarp kontaktų susiaurėjimų ir išplatėjimų yra 10 - 17 %, o B, C, D pastų – 31 - 40 %, tai galėjo įtakoti skirtingos reologinės savybės.
4. Ištirta, kad SE naudingumo koeficientas yra didžiausias $\eta = 17,63 \%$, naudojant H galinės pusės aliuminio pastą, tai galėjo įtakoti gautas storesnis galinio paviršiaus suloksnis (BSF).

Literatūra

1. *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy*, OECD/IEA, Paris, 2014.
2. Ansgar Mette, Dissertation, *New Concepts for Front Side Metallization of Industrial Silicon Solar Cells*, 2007.
3. Helge Hannebauer, Tom Falcon, Rene Hesse, Thorsten Dullweber, and Rolf Brendel, *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011.
4. E. Lorenzo, *Solar Electricity. Engineering of Photovoltaic Systems*, Institute of Solar Energy, Polytechnic University of Madrid 1994.
5. M. A. Green, *Solar cells: operating principles, technology and system applications*, UNSW, Kensington 1998.
6. *Series resistance* <<http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/series-resistance>>.
7. *Optical losses* <<http://www.pveducation.org/pvcdrom/design/optical-losses>>.
8. S. Chaudhary, V. A., *Losses in Solar Cells*, 2006.
9. *Surface recombination* <<http://www.pveducation.org/pvcdrom/design/surface-recombination>>.
10. A. R. Burgers and J. A. Eikelboom, *Optimizing metalization patterns for yearly yield [solar cell fabrication]*, in Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California, USA, pp. 219-222, 1997.
11. A. R. Burgers, Dissertation Thesis, University Utrecht, Netherlands, 2005.
12. Leszek Adam Dobrzański, Małgorzata Musztyfaga, Aleksandra Drygała *Final Manufacturing Process of Front Side Metallisation on Silicon Solar Cells Using Conventional and Unconventional Techniques*, Institute of Engineering Materials and Biomaterials, Silesian University of Technology, Poland, 2012.
13. Dean Buzby, Art Dobie *Fine Line Screen Printing of Thick Film Pastes on Silicon Solar Cells*.
14. Liu Wen, Li Yueqiang, Chen Jianjun, Chen Yanling, Wang Xiaodong. and Yang Fuhua, *Optimization of grid design for solar cells* Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China. Screen Printed Solar Cells.
15. *Screen Printed Solar Cells* <<http://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/screen-printed>>.
16. Gunnar Schubert, Dissertation, *Thick Film Metallization of Crystalline Silicon Solar Cells*, August 2006.

Santrauka

Telekomunikacijų fizika ir elektronika

POLIKRISTALINIO SILICIO SAULĖS ELEMENTŲ KONTAKTŲ OPTIMIZAVIMAS

Donatas Bakutis

Darbo vadovė dr. Lina Petrėnienė

Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, Radiofizikos katedra, Vilnius; 2016. 52 p.

Darbo tikslas – optimizuoti viršutinės pusės kontaktus, keičiant sidabro pastas, ir palyginant jų elektrines ir optines savybes, palyginti galinės pusės G aliuminio pastą su pagrindine („baseline“) H aliuminio pasta, iširti, kaip galinio paviršiaus sluoksnis (BSF) įtakoja SE elektriniams parametrams.

Tyrimo metodika. Visi eksperimentai buvo atliekami komercinės gamyklos sąlygomis. Eksperimentuose metalizacijos procese naudojama šilkografijos technologija. Eksperimente buvo lyginamos 5 viršutinės pusės šukų formos kontaktams naudojamos sidabro pastos (A, B, C, D, E) su trimis skirtingais trafaretais (A, B, C). Kitame eksperimente buvo pagaminti saulės elementai, užnešant ir išdžiovinant ant galinės pusės aliuminio pastą (naudojamos dvi skirtingos aliuminio pastos (G) ir (H) ir du skirtingi trafaretai (D, E), kad būtų galima gauti skirtingus užnešamos pastos kiekius ant SE (mg/cm^2)), toliau plokštelės su išdžiovintomis pastomis praėjo pro greito degimo krosnį Rehm, kur kontaktai buvo įdeginami (eksperimente buvo keičiama pikinė įdeginimo temperatūra). Išmatuoti bandinių galinio paviršiaus sluoksniai (BSF).

Rezultatai. Palyginus visas 5 viršutinės pusės šukų formos kontaktams naudojamas sidabro pastas ir gavus rezultatus, matyti, kad SE naudingumo koeficientas yra didžiausias $\eta = 17,65 \%$, kai apskaičiuotų optinių elektrinių nuostolių suma yra mažiausia $p_{\text{visi}} = 8,67 \%$. Tai gauta su E pasta ir B trafaretu. Iš rezultatų matyti, kad naudingumo koeficientas ne visiškai priklauso nuo apskaičiuotų nuostolių. Tai gali įtakoti tai, kad skaičiuojant nuostolius nėra atsižvelgta į metalo su puslaidininkiu sandūros varžos nuostolius, rekombinacinius nuostolius ir šviesos, atsispindejusios nuo kontakto kraštų, patekusios į saulės elementą ir absorbuotos. Rezultatai rodo, kad A ir E pastos kontaktai yra tolygesni, nei kitų tirtų pastų, skirtumas tarp kontaktų susiaurėjimų ir išplatėjimų yra 10 - 17 %, o B, C ir D pastos kontaktai yra netolygūs, skirtumas tarp kontaktų susiaurėjimų ir išplatėjimų yra 31 - 40 %, tai galėjo įtakoti skirtingos reologinės savybės. Palyginus galinės pusės aliuminio pastas, gauta, kad SE naudingumo koeficientas yra didžiausias $\eta = 17,63 \%$, naudojant H galinės pusės aliuminio pastą, tai galėjo įtakoti gautas storesnis galinio paviršiaus sluoksnis (BSF).

Išvados. Ištirta, kad SE naudingumo koeficientas yra didžiausias $\eta = 17,65 \%$, naudojant E sidabro pastą ir B trafaretą, kai apskaičiuotų optinių elektrinių nuostolių suma yra mažiausia $p_{\text{visi}} = 8,67 \%$. Nustatyta, kad A ir E pastos kontaktai yra tolygesni, nei kitų tirtų pastų, skirtumas tarp kontaktų susiaurėjimų ir išplatėjimų yra 10 - 17 %, o B, C, D pastų – 31 - 40 %. Nustatyta, kad SE naudingumo koeficientas yra didžiausias $\eta = 17,63 \%$, naudojant H galinės pusės aliuminio pastą.

Summary

Telecommunications Physics and Electronics

POLYCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL CONTACT OPTIMIZATION

Donatas Bakutis

Supervisor Dr. Lina Petrėnienė

Department of Radiophysics, Faculty of Physics, Vilnius University. Vilnius; 2016. 52 p.

Purpose of the work. To optimize screen printed front contacts, comparing five different silver pastes by comparing their electrical and optical properties; to investigate and compare the back side aluminium paste with reference paste; to investigate how the back surface force (BSF) influences the electrical parameters of the SE.

Methods. All experiments were carried out in a commercial plant conditions. In experiments metallization process used to screen-printing technology. Were compared five different front side silver pastes (A, B, C, D, E) when using three different screens (A, B, C). In the other experiment, during the formation of a silicon solar cell, an aluminum pastes (G and H) are generally screen printed and dried on the back side of the silicon wafers. The wafers are then fired to form an Al-Si melt. Then electrical parameters and thickness of back surface field of wafers with different aluminum pastes were measured compared.

Results of The Research. A comparison of the five front side silver pastes the results obtained show that the efficiency of the SE is the largest $\eta = 17.65 \%$, while the effective optical power loss is the lowest $p_{\text{visi}} = 8.67 \%$. This is obtained with the E paste and B screen. The results show that the coefficient of performance is not entirely dependent on the calculated loss. This can result in the fact that the calculation of losses are not taken into account with a metal semiconductor junction resistance losses, recombinant losses and light reflected from the edges of the contact, when applied to solar cells and absorbed. The results show that (A) and (E) pastes contacts are more equal than the other tested pastes, investigated the difference between the narrowing and widening of contacts are from 10 to 17% and (B), (C) and (D) pastes contacts are uneven, the difference between the narrowing and widening of contacts are from 31 to 40%, this could result in different rheological properties. A comparison of the rear side of the aluminum pastes the results show that the efficiency is the highest $\eta = 17.63\%$ with (H) rear aluminum paste; it could affect the thickness of the back surface field layer (BSF).

Conclusions. Investigated that the efficiency of solar cell is the highest $\eta = 17.65\%$, while the effective optical power loss is the lowest $p_{\text{visi}} = 8.67 \%$. This is obtained with the E paste and B screen.

Investigated that (A) and (E) pastes contacts are more equal than the other tested pastes, the difference between the narrowing and widening of contacts are from 10 to 17% and (B), (C) and (D) pastes contacts are from 31 to 40%, this could result in different rheological properties. Investigated that the efficiency is the highest $\eta = 17.63\%$ with (H) rear aluminum paste.

Priedas Nr. 1

Programos kodas:

Nustatomi parametrai

```
L=153;      %tinklelio ilgis mm
w_bus=1.4;  %busbaro plotis mm w_bus=w_bus/10; %cm
a=156/6;    %3 magistralėm a=a/10; %cm
l_f=a-w_bus/2; %šukų formos kontakto ilgis l_f=l_f/10; %cm
n=76; %imtis
w_f=linspace(0.030,0.105,n); %šukų formos kontakto plotis mm w_f=w_f/10; % cm
N=linspace(70,145,n); %šukų formos kontaktų skaičius

Rs=1; %nuosekli varza Om
Rsh=2000; %shunto varza Om

Uoc=0.627281768; %atviros grandines itampa V
Jsc=0.03578081753; %trumpojo jungimo srovės tankis A/cm2
Isc=8.707619738; % trumpojo jungimo srove A
FF=78.44; %uzpildos faktorius
Ump=0.527165161; %maksimalaus galios taško itampa V
Jmp=0.03343629697; %maksimalaus galios taško srovės tankis A/cm2
P=Uoc*Isc*FF; %maksimali galia su nuostoliais W
% Optiniai nuostoliu p_c (%) priklausomybe nuo šukų formos kontaktų skaičiaus N ir
ju pločio w_f
Rch=Uoc/Jsc; %charakteringoji varza Rch=Ump/Imp
rs=Rs/Rch; %santykine nuoseklioji varza
rsh=Rsh/Rch; %santykine šunto varza
%uzpildos faktorius be elektriniu nuostoliu
FF0=0;
FF0=Rsh*Jsc*(1-(1-4*FF*(Uoc+0.7)/(Rsh*Jsc))^0.5)/(2*(Uoc+0.7)*(1-rs));
FF0=0.80.74899094;
Pmax=Uoc*Isc*FF0; %Maksimalus galios taskas be elektriniu nuostoliu BET su
optiniai nuostoliais

Rsh=70; %emiterio varza oM/sqr
qf=3/1000000; %kontaktų savitoji varža OM*cm
```



```

b=153/200; %cm
qbus=3/100000000; %magistralių savitoji varža OM*m
s=0; pc=0; P_shading=0; P_loss=0; pc=0; pf=0; pe=0; pall=0; pb=0; R_finger=0;
r_finger=0; r_emiterio=0; R_emiterio=0; P_loss_f=0; A_f=0; r_finger=0;

```

Teoriškai skaičiuojami nuostoliai nuo kontaktų skaičiaus ir jų pločio

```

for i=1:n
    s(i)=L/10/(N(i)-1);
    for j=1:n
        pc(i,j)=w_bus/(2*a)+(N(i)*w_f(j)*l_f)*(N(i)-1)/((N(i)+1)*L/10*a);
        P_shading(i,j)=Pmax/(1-pc(i,j))-Pmax;
        %emiterio elektriniai nuostoliai
        R_emiterio(i,j)=(1/6)*Rsh*(s(i)-w_f(j))/l_f;
        r_emiterio(i,j)=R_emiterio(i,j)*a*s(i)/2;
        pe(i,j)=Jmpp*r_emiterio(i,j)/Umpp;
        A_f(j)=w_f(j)*8.53/10000;
        %šukš formos kontaktų elektriniai nuostoliai
        R_finger(i,j)=(2/3)*qf*l_f/A_f(j);
        r_finger(i,j)=R_finger(i,j)*a*s(i)/2;
        P_loss_f(i,j)=Jmpp*Jmpp*r_finger(i,j)*a*s(i)/2;
        pf(i,j)=P_loss_f(i,j)/(Jmpp*Umpp*a*s(i)/2);
        %busbaro elektriniai nuostoliai
        pb(i,j)=Jsc*(1-pc(i,j))/(Umpp*3)*qbus*b^2*a/(100*8.53/1000000*(w_bus)/100);
    end
end
pall=pc+pe+pf+pb;

```

Teoriškai skaičiuojami nuostoliai įvedus kontaktų skaičių ir jų pločį

```

NN=0;
w_ff=0;
for i=1:n
    if N(i)==96; %įvesti kontaktų skaičių
        o=i;
        NN(i)=N(i);
        NN(i+1:i+5)=0;
    end
end

```

```

    if (0.0062>w_f(i)) && (w_f(i)>0.0060); %įvesti kontaktų plotį
        r=i;
        w_ff(o)=w_f(i);
        w_ff(i)=0;
    end
end
pc(o,r)
pall(o,r)    % gaunami nuostoliai

```

Atvaizduojamos nuostolių matricos nuo kontaktų skaičiaus ir jų pločio

```

figure
subplot(1,3,1);
w_f=w_f*10000;
[C,h]=contourf(w_f,N,pc*100,15);
clabel(C,h);
xlabel('kontaktų plotis (um)');
ylabel('kontaktų skaičius');
title('Optiniai nuostoliai p_c(%)');

subplot(1,3,2);
[C,h]=contourf(w_f,N,pe*100,15);
clabel(C,h);
xlabel('kontaktų plotis (um)');
ylabel('kontaktų skaičius');
title('emiterio varzos nuostoliai p_e(%)');

subplot(1,3,3);
[C,h]=contourf(w_f,N,pf*100,11);
clabel(C,h);
xlabel('kontaktų plotis (um)');
ylabel('kontaktų skaičius');
title('fingerio varzos nuostoliai p_f(%)');

figure
[C,h]=contourf(w_f,N,pall*100,30);
clabel(C,h);
xlabel('kontaktų plotis (um)');

```

```

ylabel('kontaktų skaičius');
title('kontaktų varzos nuostoliai p_a_l_l(%)');
k=0;
hold on
for i=1:n
    pall2=pall(:,i);
    plot(N,pall2);
    [ymax,imax,ymin,imin] = extrema(pall2);
    g(i)=ymin;
    k(i)=N(imin);
end
plot(w_f,k,'r*');
hold on
plot(w_ff*10000,NN,'y*');
grid on

```

Teoriškai skaičiuojami ir atvaizduojami nuostoliai nuo atstumo tarp kontaktų skaičiaus, įvedus kontaktų plotį

```

w_f=w_f/10000; w=w_f(r); w_f=0; w_f=w; s=0; P_loss=0; pc=0; pf=0; pe=0; pall=0;
pb=0; R_finger=0; r_finger=0; r_emiterio=0; R_emiterio=0; P_loss_f=0; A_f=0;
r_finger=0; o=0; r=0;

n=3156;
N=linspace(20,3175,n);
for i=1:n
    s(i)=L/10/(N(i)-1);
    %optiniai nuostoliai
    pc(i)=w_bus/(2*a)+(N(i)*w_f*l_f)*(N(i)-1)/((N(i)+1)*L/10*a);
    P_shading(i)=Pmax/(1-pc(i))-Pmax;
    %emiterio elektriniai nuostoliai
    R_emiterio(i)=(1/6)*Rsh*(s(i)-w_f)/l_f;
    r_emiterio(i)=R_emiterio(i)*a*s(i)/2;
    P_loss_e(i)=Jmpp*Jmpp*R_emiterio(i)*a*s(i)/2;
    pe(i)=Rsh*Jmpp*(s(i)-w_f)*s(i)*a/(12*Umpp*l_f);
    A_f=w_f*8.53/10000;

```

```

%kontaktų elektriniai nuostoliai
R_finger(i)=(2/3)*qf*l_f/A_f;
r_finger(i)=R_finger(i)*a*s(i)/2;
P_loss_f(i)=Jmpp*Jmpp*r_finger(i)*a*s(i)/2;
pf(i)=P_loss_f(i)/(Jmpp*Umpp*a*s(i)/2);
%magistralių elektriniai nuostoliai
P_loss_b=(1/12)*qbus*(L/10)^3*a*a*Jmpp*Jmpp/(w_bus*20/10000);
pb(i)=Jsc*(1-pc(i))/(Umpp*3)*qbus*b^2*a/(100*8.53/1000000*(w_bus)/100);

end

pall=pc+pe+pf+pb;

figure
plot(s*10,pe*100,s*10,pc*100,s*10,pf*100,s*10,pall*100);
axis([0 8 0 100]);
xlabel('atstumas tarp kontaktų s (mm)');
ylabel('nuostoliai(%)');
title('nuostoliai p_a_l_l(%)');

```