



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS

FIZIKOS KATEDRA

Paulius Gailiūnas

FOTOVOLTINIO MODULIO SU KONCENTRATORIUMI

PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

**THE DESIGN AND INVESTIGATION OF A PHOTOVOLTAIC MODULE
WITH CONCENTRATOR**

Baigiamasis magistro darbas

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621J91001
technologijų studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Artūras Jukna
(Vardas, pavardė)

(Data)

Paulius Gailiūnas

FOTOVOLTINIO MODULIO SU KONCENTRATORIUMI
PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS
THE DESIGN AND INVESTIGATION OF A PHOTOVOLTAIC MODULE
WITH CONCENTRATOR
Baigiamasis magistro darbas

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621J91001
technologijų studijų kryptis

Vadovas

prof. dr. Artūras Jukna
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) 2013-05-31
(Data)

Konsultantas

h. dr. med. Gintautas Polimocius
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) 2013-05-31
(Data)

Konsultantas

Stefanas Cyžas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) 2013-05-31
(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

doc. dr. Angelė Kavaliauskienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) 2013-05-27
(Data)

Vilnius, 2013

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Fundamentinių mokslų fakultetas
Fizikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Saulės elementų ir modulių inžinerijos** programos baigiamasis darbas
Pavadinimas **Fotovoltinio modulio su koncentratoriumi projektavimas ir tyrimas**
Autorius **Paulius Gailiūnas**
Vadovas **prof. dr. Artūras Jukna**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe suprojektuotos ir pagamintos dviejų rūšių šviesos koncentratorinės sistemos: jungtinė parabolinė ir sistema su Frenelio lęšiu. Atlikta saulės elementų efektyvumo analizė, išnagrinėtos šviesą koncentruojančių sistemų rūšys bei aptarti jų optiniai parametrai. Frenelio lęšis ir koncentratorinių sistemų laikančiosios konstrukcijos pagamintos vakuuminio formavimo būdu, ieškant pigesnės gamybos technologijos. Baigiamajame darbe atlikti optinio pralaidumo ir lūžio rodiklio, matomos šviesos bangų ilgių ruože, tyrimai bei saulės elementų, esančių šviesos koncentratorinėse sistemose, voltamperinių ir voltvatinių charakteristikų tyrimai. Iš tyrimų rezultatų nustatyti šviesos koncentravimo laipsniai. Darbe diskutuojama apie pigių optinių sistemų galimus pritaikymus ir jų tobulinimo būdus. Išnagrinėjus teorinę ir praktinę dalis, pateiktos išvados ir pasiūlymai.

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, saulės elementų efektyvumo ribos, saulės šviesos koncentratoriai ir jų panaudojimas fotoelektrinėse sistemose, eksperimentinių tyrimų metodika, prototipų gamyba, eksperimentiniai tyrimai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 82 p. teksto be priedų, 95 pav., 13 lent., 22 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Frenelio lęšis, jungtinis parabolinis koncentratorius, lūžio rodiklis, optinė koncentratorinė sistema, optinis pralaidumas, šviesos koncentravimo laipsnis, vakuuminis plastiko formavimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Fundamental Sciences
Department of Physics

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Solar Cell and Modules Engineering** study programme Final Work

Title **The Design and Investigation of a Photovoltaic Module with Concentrator**

Author **Paulius Gailiūnas**

Academic supervisor **Prof Dr Artūras Jukna**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

Concentrated PV systems (compound parabolic and Fresnel CPV) have been designed and investigated. The efficiency of solar cells and the types of light concentrated systems have been analyzed and their optical parameters have been discussed. Fresnel lens and the CPV system holding structure have been fabricated by means of vacuum forming machine in this way making the technology of production less expensive. Optical transmittance and refractive index of Fresnel lens were measured in the range of visible light wavelengths. Current-voltage and voltage-power characteristics of solar cells built inside the CPV systems were investigated, based on results the degree of light concentration by Fresnel lens and compound parabolic CPV has been determined. Some discussions regarding possible applications of concentrated PV systems containing the Fresnel lens as well as possible ways of CPV design improvements are given in current work. After analysed theoretical and practical parts, conclusions and suggestions are proposed.

Thesis structure: introduction, theoretical and experimental parts, results of experiments, conclusions and references.

Thesis consist of: 82 p. text without appendixes, 95 pictures, 13 tables, 22 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: concentrated PV system, compound parabolic concentrator, Fresnel lens, light concentration, refractive index, resin transfer molding, optical transmittance.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo
bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Paulius Gailiūnas, 20075658

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Fundamentinių mokslų fakultetas

(Fakultetas)

Saulės elementų ir modulių inžinerija, SEMIfm-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

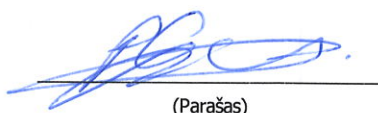
**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2013 m. birželio 4 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Fotovoltinio modulio su koncentratoriumi projektavimas ir tyrimas“ patvirtintas 2011 m. spalio 25 d. dekanų potvarkiu Nr. 367fm, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: , Gintautas Jakimavičius. Mano darbo vadovas prof. dr. Artūras Jukna.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesus mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Paulius Gailiūnas

(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

Technologijos (J900)..... studijų kryptis

Saulės elementų ir modulių inžinerija..... studijų programa, valstybinis kodas 621J91001

PAŽYMA
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ

.....Nr.

Vilnius

Studentas (ė).....Paulius Gailiūnas.....
(Vardas, pavardė)

Studento (ės) studijų svertinis įvertinimų vidurkis.....balo.

Baigiamojo darbo tema: FOTOVOLTINIO MODULIO SU KONCENTRATORIUMI PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS.....

Baigiamasis darbas peržiūrėtas ir studentui (ei)
leidžiama ginti šį baigiamąjį darbą magistro laipsnio suteikimo komisijoje.

Katedros vedėjasprof. dr. Artūras Jukna.....
(Parašas) (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

VADOVO ATSILIEPIMAS
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ
„FOTOVOLTINIO MODULIO SU KONCENTRATORIUMI PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS“

Magistriniame baigiamajame darbe nagrinėjamos šviesos srautą koncentruojančio fotovoltinio modulio technologijos problemos. Sukurta, eksperimentiškai išbandyta ir ištirta šviesos srauto koncentratoriaus technologija, ištirta koncentratoriaus formos įtaka fotoelektrinio elemento elektrinėms savybėms. Darbo autoriaus sukurto, šviesos srautą koncentruojančio, fotoelektrinio modulio pagrindinės charakteristikos palygintos su standartinių fotoelektrinių modulių charakteristikomis. Darbo metodikos dalyje detaliai aprašytos medžiagos, autoriaus panaudotos šviesos srautą koncentruojančio fotovoltinio modulio technologijoje, supažindinama su tyrimams naudotais prietaisais bei pritaikytomis tyrimų metodikomis. Tad, darbas turi ne tik išliekamąją mokslinę, bet ir praktinę vertę. Autoriaus aiškiai pateikti eksperimentinių tyrimų rezultatai ir suformuluotos mokslinės išvados. Darbas atliktas savarankiškai, tuo pat metu verslo institucijoje UAB „Moderniosios e-technologijos“ magistrantui dalyvaujant mokslinio projekto vykdyme. Tad baigiamajame darbe panaudota tik nedidelė dalis gautų rezultatų, glaudžiai susijusių su magistrinio darbo tema.

Magistro laipsnio suteikimo komisijai magistro baigiamąjį darbą siūlau įvertinti 10 balų (puikiai).

Vadovas
(Parašas)

.....prof. dr. Artūras Jukna.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

Technologijų studijų kryptis

TVIRTINU
Katedros vedėjas

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa, valstybinis
kodas 621J91001

(Parašas)
Artūras Jukna
(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei)

Pauliui Gailiūnui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **Fotovoltinio modulio su koncentratoriumi projektavimas ir tyrimas**
The design and investigation of a photovoltaic module with concentrator

patvirtinta 2011 m. spalio 25 d. dekanų potvarkiu Nr. 367fm

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. gegužės 31 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Šviesą koncentruojančio fotovoltinio modulio projektavimas;
Modulio gamybos technologijos ruošimas;
Koncentratoriaus įtakos fotoelemento elektrinėms savybėms tyrimas;
Koncentratorinio fotomodulio pagrindinių charakteristikų palyginimas su serijiniu būdu gaminamų fotomodulių charakteristikomis.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: Gintautas Jakimavičius UAB „Modernios e-technologijos“
Aleksandras Čyžas UAB „Modernios e-technologijos“

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas **prof. dr. Artūras Jukna**
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

.....
(Parašas)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

Paulius Gailiūnas
(Vardas, pavardė)
2011-10-02
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Atsiliepimas apie magistrantūros baigiamąjį darbą

Magistrantūros studijos

2013 m. birželio 10 d.

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa

Valstybės kodas 621J91001

Technologijų studijų kryptis

Studentas **Paulius Gailiūnas** parengė baigiamąjį magistro darbą tema:

**FOTOVOLTINIO MODULIO SU KONCENTRATORIUMI PROJEKTAVIMAS
IR TYRIMAS**

Siekiant padidinti fotoelektrinių modulių efektyvumą – naudojami šviesą koncentruojantys įrenginiai. To pasekoje yra atpiginami patys moduliai bei sutaupoma žaliava, naudojama saulės elementams gaminti. Taip panaudojus koncentratorius, pasiekiamas didesnis sistemos efektyvumas. Todėl baigiamojo magistrinio darbo tema yra aktuali ir turi taikomąjį pobūdį.

Darbo tikslai ir uždaviniai yra realūs ir atitinka magistriniam darbui keliamus reikalavimus.

Magistrinio darbo ataskaitą sudaro 82 p., 95 paveikslėliai, 13 lentelių ir literatūros sąrašas.

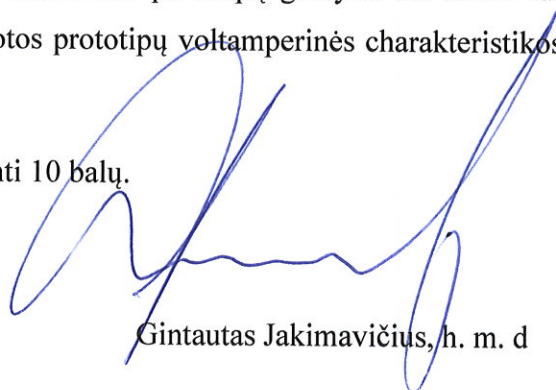
Literatūros analizės dalyje yra aprašomos saulės elementų efektyvumo ribos, kas yra aktualu projektuojant bei gaminant koncentratorinius fotoelektrinius modulius. Yra apžvelgti galimi koncentratorių tipai, išskirti jų privalumai bei trūkumai. Tuo tikslu pasirenkant tolimesnę darbo eigą.

Metodinėje dalyje aprašyti naudojami prietaisai, naudojamos medžiagos, kompiuterinio modeliavimo ypatybės bei eksperimentinių tyrimų metodika.

Detaliai aprašyta fotovoltinių modulių su koncentratoriais prototipų gamyba bei atlikti lūžio rodiklio ir optinio pralaidumo tyrimai. Taip pat išmatuotos prototipų voltamperinės charakteristikos ir nustatyti koncentracijos laipsniai.

Darbo atliktas puikiai, todėl siūlau šį darbą vertinti 10 balų.

konsultantas



Gintautas Jakimavičius, h. m. d

TURINYS

IVADAS	15
1. SAULĖS ELEMENTŲ EFEKTYVUMO RIBOS	17
2. SAULĖS ŠVIESOS KONCENTRATORIAI IR JŲ PANAUDOJIMAS FOTOELEKTRINĖSE SISTEMOSE	20
2.1. ISTORIJA	20
2.2. KONCENTRATORIAUS SAMPRATA	21
2.3. KONCENTRACIJOS KOEFICIENTAS	22
2.4. OPTINĖS KONCENTRATORIAUS SAVYBĖS	23
2.5. SAULĖS ŠVIESOS KONCENTRAVIMO TECHNOLOGIJOS	25
2.6. KONCENTRATORIŲ RŪŠYS	26
2.6.1. Paraboliniai koncentratoriai	27
2.6.2. Hiperboliniai koncentratoriai	28
2.6.3. Frenelio koncentratorius	29
2.6.4. Jungtinis parabolinis (CPC)	31
2.6.5. Dielektrinis visiško atspindžio koncentratorius	33
2.6.6. Plokšti didelio koncentravimo įrenginiai	35
2.6.7. Kvantinių taškų koncentratoriai	36
2.6.8. Koncentratorių privalumai ir trūkumai	37
3. KONCENTRATORIŲ KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS, PRIETAISAI IR MEDŽIAGOS, EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA	38
3.1. KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS	38
3.1.1. Jungtinio parabolinio koncentratoriaus kompiuterinis modeliavimas	39
3.1.2. Jungtinio parabolinio koncentratoriaus laikančiųjų konstrukcijų kompiuterinis modeliavimas	44
3.1.3. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu kompiuterinis modeliavimas	45
3.1.4. Fotoelementų matricos projektavimas	47
3.2. MEDŽIAGOS	47
3.2.1. Poliesterinė derva	47
3.2.2. Lęšio gamyboje naudojamos medžiagos	48
3.2.3. Silicio saulės elementai	49
3.2.4. Fotoelementų matricos pagrindas	51
3.3. PRIETAISAI	51
3.3.1. Saulės imitatorius QuickSun 120CA	51
3.3.2. Vakuuminio formavimo mašina RTM light	52
3.4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA	53
3.4.1. Lūžio rodiklio matavimas	53
3.4.2. Optinio pralaidumo tyrimas	54
4. PROTOTIPŲ GAMYBA	55
4.1. JUNG TINIO PARABOLINIO KONCENTRATORIAUS GAMYBA	55
4.2. KONCENTRATORIAUS SU FRENELIO LĘŠIU PROTOTIPO GAMYBA	61
5. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	67
5.1. POLIESTERINĖS DERVOS LŪŽIO RODIKLIO MATAVIMAS	67
5.2. POLIESTERINĖS DERVOS OPTINIO PRALAUDUMO TYRIMAS	68
5.3. PROTOTIPŲ ELEKTRINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI	72

5.3.1. Jungtinių parabolinių koncentratorių prototipų elektrinių savybių tyrimas	72
5.3.2. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu elektrinių savybių tyrimai	79
IŠVADOS	83
LITERATŪROS SĄRAŠAS	84
PRIEDAI	86

Paveikslų sąrašas

- 1 pav. Skirtingų medžiagų saulės elementų teorinis efektyvumo maksimumas
- 2 pav. Teorinio maksimalaus efektyvumo priklausomybė nuo puslaidininkio draudžiamųjų energijų juostos pločio esant spektrui AM1.5
- 3 pav. Fotoelemento energijos balansas
- 4 pav. Paprasto saulės elemento ir saulės elemento su koncentratoriumi palyginimas
- 5 pav. Santykinio efektyvumo priklausomybė nuo koncentracijos
- 6 pav. Bendrinis koncentratorius (Θ_{in} , Θ_{out} – atitinkamai spindulių kritimo ir išėjimo kampai, α – priėmimo kampas)
- 7 pav. Skersinis parabolinio koncentratoriaus pjūvis (F – židinio nuotolis, D – parabolės plotis, $\Theta_{max, in}$ – maksimalus krintančių spindulių kampas, $\Theta_{max, r}$ – maksimalus kampas tarp simetrijos ašies ir atspindėjusio šviesos spindulio, l_{max} – pusės saulės elemento ilgis)
- 8 pav. Hiperbolinis koncentratorius
- 9 pav. Hiperboloidas, nubrėžtas „MatLab“ programa
- 10 pav. Laužiamojo lęšio geometrija
- 11 pav. Skersinis Frenelio koncentratoriaus pjūvis (ϕ – lęšio briaunos kampas, θ – šviesos atspindžio kampas)
- 12 pav. Koncentratorių pavyzdžiai, naudojant Frenelio lęšį ir antrinį optinį elementą
- 13 pav. Jungtinis parabolinis koncentratorius (kairėje) ir spindulių judėjimas koncentratoriaus viduje (dešinėje)
- 14 pav. Parabolinis veidrodis
- 15 pav. Dvidimensis jungtinis parabolinis koncentratorius su 20° priėmimo kampu, kur originalios parabolės 1 ir 2 yra pasuktos 20° kampu (1° ir 2°)
- 16 pav. Dvidimensis jungtinis parabolinis koncentratorius (f_l – parabolinių židinio nuotolis, Θ_{max} – maksimalus kritusio šviesos spindulio kampas, ϕ – sukimosi kampas z ašies atžvilkiu, R – nuo parabolės paviršiaus atspindėjusio šviesos spindulio trajektorija)
- 17 pav. DTIRC koncentratoriaus schema (P_1 – išorinis paviršius, P_2 – pilnai atspindintis šoninis profilis, P_3 – išėjimo anga)
- 18 pav. DTIRC koncentratoriaus efektyvumo priklausomybė nuo jo paviršiaus išlenktumo
- 19 pav. RXI koncentratorius
- 20 pav. Kvantinių taškų koncentratoriaus veikimo principas
- 21 pav. Simuliacija naudojant „SCHOTT“ firmos Frenelio lęšį
- 22 pav. Parabolinis koncentratorius, kurio plotis 20 cm, gylis – 5,50 cm ir židinio nuotolis – 5 cm
- 23 pav. Parabolinis koncentratorius, kurio plotis 20 cm, gylis – 10,40 cm ir židinio nuotolis – 2,5 cm
- 24 pav. Parabolinis koncentratorius, kurio plotis 20 cm, gylis – 20,25 cm ir židinio nuotolis – 1,25 cm
- 25 pav. Jungtinis parabolinis koncentratorius su dviem elementų juostomis
- 26 pav. Jungtinis parabolinis koncentratorius (I prototipas)
- 27 pav. Įvairių matmenų jungtiniai paraboliniai koncentratoriai (a – $240 \times 240 \text{ mm}^2$, b – $240 \times 220 \text{ mm}^2$)
- 28 pav. Įvairių matmenų jungtiniai paraboliniai koncentratoriai (c – $240 \times 200 \text{ mm}^2$, d – $240 \times 180 \text{ mm}^2$)
- 29 pav. Įvairių matmenų jungtiniai paraboliniai koncentratoriai (e – $200 \times 200 \text{ mm}^2$, f – $160 \times 200 \text{ mm}^2$)
- 30 pav. Jungtinis parabolinis koncentratorius (II prototipas)
- 31 pav. I jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipo laikančiųjų konstrukcijų brėžiniai (kairėje – kraštinės šablonas, dešinėje – galo šablonas)
- 32 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipo galo šablonai frezavimui

- 33 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipo kraštinių šablonai frezavimui
- 34 pav. Metalinio peilio konstrukcija
- 35 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) galo šablonai frezavimui
- 36 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) kraštinės šablonai frezavimui
- 37 pav. Fotoelementų matrica I paraboliniam koncentratoriui ir koncentratoriui su Frenelio lęšiu (I)
- 38 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus fotoelementų matrica
- 39 pav. Formos gamybos planas
- 40 pav. *Precizika MET SC* saulės elementai
- 41 pav. Saulės elemento VACH, esant skirtingai apšvitai
- 42 pav. Fotoelementų matricos pagrindas
- 43 pav. Saulės imitatorius *QuickSun 120CA*
- 44 pav. Vakuuminio formavimo mašina *RTM light*
- 45 pav. Briusterio kampo matavimo schema
- 46 pav. Optinio pralaidumo matavimo schema
- 47 pav. Formų ruošimas kraštinės gamybai
- 48 pav. Jungtinio parabolinio koncentratoriaus II prototipo formos šoninėms sienelėms formuoti
- 49 pav. I jungtinio parabolinio koncentratoriaus kraštinė sienelė
- 50 pav. Šoninė sienelė su reflektiniu sluoksniu
- 51 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipo šoninė sienelė
- 52 pav. Formos (II jungtinio parabolinio koncentratoriaus), ant kurių liejamas silikonas
- 53 pav. Silikoninės formos (II jungtinio parabolinio koncentratoriaus)
- 54 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus galinės laikančiosios konstrukcijos
- 55 pav. Išfrezuotos fotoelementų juostelės
- 56 pav. Fotoelementų juostelė su prilituotais elementais (I jungtinio parabolinio ir koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) prototipų testavimui)
- 57 pav. Fotoelementų juostelės su prilituotais elementais (II jungtinio parabolinio koncentratoriaus testavimui)
- 58 pav. I surinktas jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipas
- 59 pav. II surinktas jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipas
- 60 pav. Formos (koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I)), ant kurių liejamas silikonas
- 61 pav. Silikoninės formos (koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I))
- 62 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) galinės laikančiosios konstrukcijos
- 63 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) formos galų gamybai
- 64 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) prototipo galai
- 65 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) šoninė sienelė
- 66 pav. Metaliniai peiliai
- 67 pav. Parafino drožimo staklės
- 68 pav. Parafino forma
- 69 pav. Silikono užliejimas
- 70 pav. Frenelio lęšio silikoninė forma
- 71 pav. Frenelio lęšio epoksidinės dervos forma
- 72 pav. Išlietas Frenelio lęšis
- 73 pav. Frenelio lęšis, užlietas ant stiklo
- 74 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) prototipas
- 75 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) prototipas
- 76 pav. Atspindžio priklausomybė nuo kritimo kampo, naudojant 550 nm bangos ilgio šviesą
- 77 pav. Bandinio 2 pr optinis pralaidumas
- 78 pav. Bandinio 4 pr optinis pralaidumas
- 79 pav. Bandinio 2pr optinis sunormuotas pralaidumas

80 pav. Bandinio 4 pr optinis sunormuotas pralaidumas

81 pav. 1 – osios fotoelementų matricos (56 pav.) voltamperinė (1) ir voltvalitinė (2) charakteristikos

82 pav. 2 – osios fotoelementų matricos voltamperinė ir voltvatinė charakteristikos

83 pav. Lygiagrečiai sujungtų dviejų fotoelementų matricų (58 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

84 pav. Fotoelementų matricos su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi (56 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

85 pav. Lygiagrečiai sujungtų juostelių su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi (58 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

86 pav. 1 – osios fotoelementų matricos (56 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

87 pav. 2 – osios fotoelementų matricos (matuota pakartotinai) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

88 pav. 1 – osios fotoelementų matricos su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi (56 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

89 pav. 2 – osios fotoelementų matricos su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi (56 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

90 pav. Fotoelementų matricos (57 pav.) be koncentratoriaus voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

91 pav. Fotoelementų matricos su II jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi (59 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos.

92 pav. Fotoelementų matricos (56 pav.) be Frenelio lęšio (I) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

93 pav. Fotoelementų matricos su Frenelio lęšiu (I) (74 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

94 pav. Fotoelementų matricos (57 pav.) be Frenelio lęšio (II) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

95 pav. Fotoelementų matricos su Frenelio lęšiu (I) (75 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Koncentratorių tipai pagal optinius principus

2 lentelė. Koncentratorių privalumai ir trūkumai

3 lentelė. Fizikinės-mechaninės *Polylite 32032-20* dervos skystos būsenos savybės

4 lentelė. Fizikinės-mechaninės dervos kietos būsenos savybės

5 lentelė. Elektriniai saulės elemento parametrai

6 Lentelė. Tirtų bandinių lūžio rodikliai

7 lentelė. Spektrometro nuostačiai

8 lentelė. Bandinių žymenys

9 lentelė. I jungtinio parabolinio koncentratoriaus elektrinės charakteristikos

10 lentelė. I jungtinio parabolinio koncentratoriaus elektrinės charakteristikos

11 lentelė. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus elektrinės charakteristikos

12 lentelė. I koncentratoriaus su Frenelio lęšiu elektrinės charakteristikos

13 lentelė. II koncentratoriaus su Frenelio lęšiu elektrinės charakteristikos

Santrumpos

FE – fotoelektra

ŠKS – šviesos koncentratorinė sistema

KFM – koncentratorinis fotoelektrinis modulis

VACH – voltamperinė charakteristika

CPV – koncentruota fotoelektra (*Concentrated PhotoVoltaic*)

CPC – jungtinis parabolinis koncentratorius (*Compound Parabolic Concentrator*)

DTIRC – dielektrinis visiško vidaus atspindžio koncentratorius (*Dielectric Totally Internally Reflecting Concentrator*)

QDC – kvantinių taškų pagrindu sukurti koncentratoriai (*Quantum Dot Concentrator*)

CAP – koncentracijos ir priėmimo produktas (*Concentration-Acceptance Product*)

Fizikinių dydžių lentelė

P_{in}	Iėjimo galia
E_G	Elektrono išlaisvinimo energija
FF	Užpildymo koeficientas
I_{SC}	Trumpojo jungimo elektros srovė
V_{OC}	Atvirosios grandinės elektros įtampa
A_m	Saulės modulio aktyvus plotas
I_p	Saulės šviesos intensyvumas
n	Medžiagos lūžio rodiklis
F	Parabolės židinio nuotolis
n_{fl}	Medžiagos, iš kurios pagamintas Frenelio lęšis, lūžio rodiklis

IVADAS

Šiuolaikiniame pasaulyje energija reikalinga įvairiems poreikiams tenkinti. Energijos poreikis pasauliniu mastu vis didėja, tradiciniai ištekliai vis labiau senka, ir jų gavimo būdai bei panaudojimas vis labiau kenkia mus supančiai aplinkai. Energijos ištekliai skirstomi į tradicinius iškastinius (t.y. akmens anglis, nafta, gamtinės dujos ir kt.) ir alternatyviuosius iškastiniams. Šiandien žmonija vis dar orientuota į tradicinius išteklius. Todėl per paskutinius šimtmečius buvo sunaudoti dideli iškastinio kuro kiekiai, kartu padaryta didelė žala aplinkai (t.y. CO₂ kiekio atmosferoje padidėjimas, dėl kurio Žemėje sustiprėja šiltnamio efektas, atsiranda ozono skylės ir kt.).

Žmonijos energijos poreikiui sparčiai didėjant, mūsų gerovė ima kelti grėsmę pasaulio išlikimui. Mokslininkų prognozuojami klimato atšilimo padariniai panašėja į dar nesenai įsivaizduojamus nerealius ir matytus tik fantastiniuose filmuose. Tikroji grėsmė priklausys nuo mūsų šiandieninių sprendimų. Tik jie gali išsaugoti esamą pasaulį, kuriame žmogaus ūkinė veikla ir gamta egzistuoja harmoningai. Mums tereikia pereiti nuo tradicinių prie atsinaujinančių energijos šaltinių. Be abejo, visuotinis perėjimas prie atsinaujinančių išteklių nepaprastas uždavinys, tačiau palaipsniui pereidami prie alternatyvios energijos, mes ne tik apsaugosime gamtą, bet ir sutaupysime didelę dalį savo lėšų, išleidžiamų šilumos ar elektros energijai, taip pat tapsime mažiau priklausomi nuo naftą ir dujas eksportuojančių šalių politinio šantažo.

Energetika, pagrįsta atsinaujinančiais energijos šaltiniais, tarp jų ir saulės, yra reali ir perspektyvi. Žmonijos priešinimasis branduolinės energijos naudojimui, ypač po pastarojo meto nelaimių atominėse elektrinėse, kasdien didėja. Iškastinio kuro išteklių Lietuvoje beveik nėra, todėl būtina naudoti saulės energiją išgaunančius įrenginius. Daugelyje pasaulio vietų saulės energiją naudojančiais gėlintuvais gėlinamas vanduo, džiovynklose – džiovinami įvairūs maisto produktai ir kt. Tačiau šiame darbe didžiausias dėmesys bus skirtas fotoelektros panaudojimo Lietuvoje galimybėms.

Nors fotoelektra sparčiai plėtojama kaip energetikos sritis, bet jos gaminamos energijos kaina kol kas keletą kartų viršija įprastinės elektros energijos kainą ir yra per brangi vartotojui. Sparti šios srities plėtra atskleidė kitą svarbią problemą – silicio (Si) trūkumą. Dėl silicio žaliavos poreikio ir kainos nuolatinio augimo, fotoelektros elementų gamyba tampa vis mažiau pelninga, be to, Europos Sąjungos gamintojai vis sunkiau konkuruoja su Kinijos gamintojais dėl pigios darbo jėgos, siūlančiais pigesnius saulės elementus. Labiausiai silicio trūkumą jaučia Europos elementų gamintojai. Jie yra aktyviausi naujų strategijų fotoelektros sektoriuje siekėjai, kuriantys naujas

bendro kapitalo įmonės, diegiantys bei įsisavinantys naują technologiją, kurdami iš principo naujus gaminius.

Vienas iš kainos mažinimo bei silicio žaliavos taupymo būdų – tai fotoelektrinių modulių konstrukcijų tobulinimas, kuriant koncentratorinius fotoelektrinius modulius (toliau – KFM), leidžiančius naudoti mažesnes silicio plokšteles. Būtent šios plokštelės ir yra brangiausia fotoelektrinio modulio sudedamoji dalis, lemianti išgaunamą elektros energijos kiekį. Dėl koncentruojančių elementų, pasiekiamas didesnis saulės elementų ar modulių efektyvumas.

KFM technologijose naudojami sąlygiškai nebrangūs optiniai komponentai – tokie kaip veidrodžiai ir lęšiai, fokusuojantys šviesą į mažą puslaidininkinės medžiagos aktyvų plotą. Saulės koncentratorių būna įvairių rūšių, kurie plačiai bus apžvelgti analitinėje dalyje.

Darbo **tikslai** – suprojektuoti šviesą koncentruojančius fotovoltinius modulius, paruošti modulių gamybos technologiją, ištirti koncentratorių įtaką fotoelementų elektrinėms savybėms ir palyginti pagrindinių koncentratorinių fotomodulių elektrines charakteristikas su serijiniu būdu gaminamų fotomodulių charakteristikomis.

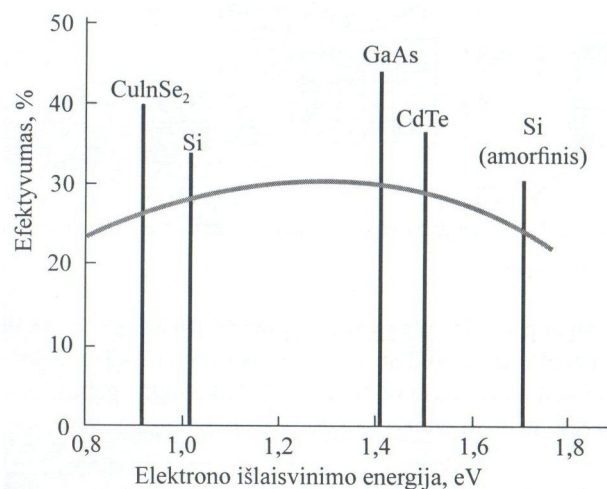
Darbo **uždaviniai**:

1. Išnagrinėti galimus šviesą koncentruojančių fotoelektrinių modulių tipus, pasirenkant tolimesnę modulio projektavimo eigą.
2. Pasirinkus koncentratoriaus tipą, paruošti fotoelektrinio modulio gamybos technologiją.
3. Ištirti pagamintų koncentratorių optines ir elektrines savybes bei nustatyti šviesos koncentracijos laipsnius.
4. Palyginti gautus eksperimentinius ir skaičiavimų rezultatus su serijiniu būdu gaminamų koncentratorinių fotoelektrinių modulių charakteristikomis.

Autoriaus indėlis – suprojektuotos ir pagamintos 4 skirtingų matmenų ir optinių parametrų šviesą koncentruojančios sistemos. Atlikti lūžio rodiklio ir optinio pralaidumo tyrimai bei išmatuotos voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos, taip nustatant šviesą koncentruojančių sistemų koncentracijos koeficientus. Koncentruojančios sistemos gamintos įmonėje UAB „Modernios E – Technologijos“, elektrinės charakteristikos matuotos UAB „Precizika MET SC“ laboratorijoje.

1. SAULĖS ELEMENTŲ EFEKTYVUMO RIBOS

Saulės elemento galios ir saulės energijos ekspozicijos į saulės elementą santykis standartinėmis sąlygomis, esant temperatūrai $T = 300\text{ K}$, vadinamas jo efektyvumu. Saulės elementų gamintojo tikslas – pasiekti kuo didesnę elemento energijos konversijos efektyvumą. Tačiau konversijos nuostoliai mažina viršutinę efektyvumo teorinę ribą (žr. 1 pav.) (Kytra 2006).



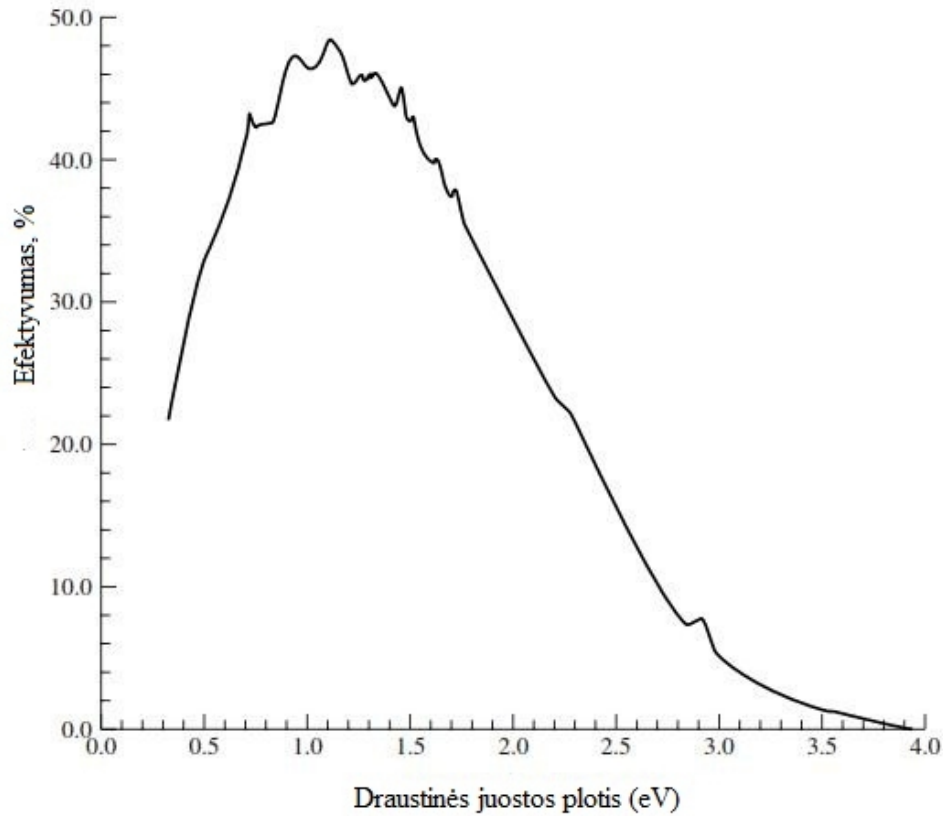
1 pav. Skirtingų medžiagų saulės elementų teorinis efektyvumo maksimumas (Kytra 2006)

Kiekvienas puslaidininkis saulės šviesos energiją, esant skirtingam bangų ilgio diapazonui, į elektros energiją verčia nevienodai. Iš to išplaukia, kad dalis spinduliuojamos energijos ne visada gali būti panaudota, nes šios energijos nepakanka aktyvuoti krūvininkams (dėl skirtingų E_g). Todėl didelė dalis energijos nėra konvertuojama į elektros energiją, o virsta šilumine energija, sugerama kristaline gardele. Ši priežastis lemia puslaidininkio temperatūrą, kuriai pakilus, mažėja saulės elemento efektyvumas. Prie elementų efektyvumo mažėjimo taip pat prisideda šviesos nuostoliai dėl elektrinių įvadų kuriamo šešėlio bei atspindžio nuo saulės elemento paviršiaus. Elektrinių nuostolių atsiranda tiek dėl saulės elemento elektrinės varžos, tiek dėl išorinės elektros grandinės netobulumo. Išskiriami ir mechaniniai nuostoliai (kristalų defektai, paviršiaus defektai, *Si* paviršiaus kokybė ir kt.). Visiems minėtiems nuostoliams sumažinti naudojama daug įvairių būdų. Vienintelis ko nepavyksta išvengti – tai šviesos kvantų (fotonų) energijos neatitikimo puslaidininkinės medžiagos sugerties energinėms juostoms, lemiančioms optinę medžiagos sugertį įvairiems šviesos bangos ilgiams (Kytra 2006).

Literatūros šaltinyje (Luque *et al.* 2003) teigiama, kad kiekviena medžiaga gali sugerti fotonus, kurių energija didesnė arba lygi E_g (t.y. puslaidininkio medžiagos draustinės energijos juostos pločiui). Tad maksimalus saulės elemento efektyvumas:

$$\eta_{\max}(E_G) = \frac{\frac{1}{q} E_G I_{\text{inc}}}{P_{\text{in}}} = \frac{E_G}{(P_{\text{in}} / A)} \int_{\lambda < \lambda_G} f(\lambda) d\lambda, \quad (1.1)$$

čia P_{in} – įėjimo galia, A – saulės elemento plotas, E_G – draudžiamųjų energijų juostos plotis, $f(\lambda)$ – energijos pasiskirstymas spektre.



2 pav. Teorinio maksimalaus efektyvumo priklausomybė nuo puslaidininkio draudžiamųjų energijų juostos pločio esant spektrui AM1.5 (Luque *et al.* 2003)

Literatūros šaltinyje (Tiwari *et al.* 2010) fotoelektrinio modulio elektrinis efektyvumas išreiškiamas:

$$\eta_{em} = \left(\frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{A_m \cdot I_p} \right) \cdot 100, \quad (1.2)$$

čia FF – užpildymo koeficientas (siliciui lygus 0,88), I_{SC} – trumpojo jungimo elektros srovė, V_{OC} – atvirosios grandinės elektros įtampa, A_m – modulio aktyvusis plotas, I_p – saulės šviesos intensyvumas, krintantis į fotoelektrinį modulį.

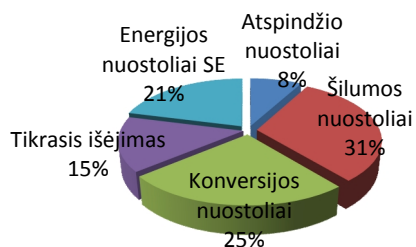
Shockley-Queisser riba – didžiausia teorinė saulės elementų efektyvumo riba. Tai vienas iš svarbiausių saulės elementų gamybos rodiklių (Shockley *et al.* 1961). Ribą apibūdina trys faktoriai:

Įkaitusio kūno spinduliuotė. Spinduliuotė priklauso nuo saulės elemento temperatūros. Bet koks energijos praradimas saulės elemente virsta šiluma, taip sumažinamas elemento efektyvumas. Kai saulės elemento temperatūra didėja, intensyvėja ir jo spinduliuotė, kol pasiekiamas pusiausvyra, pvz., esant temperatūrai 360 K. Tuomet saulės elemento efektyvumas mažesnis, palyginti su kambario temperatūros elementu.

Rekombinacija apibrėžia viršutinę efektyvumo lygio ribą. Pasiekus tam tikrą lygį, yra toks judančių skylių kiekis, kai fotoelektronai neberekombinuoja. Siliciuje šis reiškinys sumažina teorinį efektyvumą iki 10 %. Medžiagose, kuriose yra didesnis elektronų (arba skylių) judris, gali būti pasiekti geresni rezultatai nei silicio atveju. Galio arsenido (*GaAs*) elementuose nuostoliai tesiekia 5 %. Naudojant veidrodinius arba lęšių koncentratorius, šis reiškinys sustiprėja.

Spektriniai nuostoliai. Kad elektronas iš valentinės juostos pereitų į laidumo juostą reikalinga energija. Tik fotonai, kurių energija didesnė, sužadins fotoelektroną. Silicio laidumo juostą nuo valentinės skiria $1,12\text{ eV}$ (kambario temperatūroje) draudžiamųjų energijų juosta, atitinkanti raudonos spalvos šviesą. Kitaip tariant, matomos ir artimo infraraudonųjų spindulių spektro dalies fotonai dalyvauja elektros energijos gamyboje, o infraraudonieji spinduliai, mikrobangos ir radijo bangos – ne. Tai apriboja energijos kiekį, išgaunamą iš Saulės. Iš 1000 W/m^2 Žemę pasiekiančios šviesos galios, apie pusė ją sudarančių fotonų energija mažesnė nei $1,12\text{ eV}$. Tad teoriškai Si saulės elementų energijos konvertavimo efektyvumas siekia tik 50 %.

Vien dėl juodojo kūno spinduliuotės ir krūvininkų rekombinacijos, saulės elementų teorinis efektyvumas negali būti didesnis kaip 68 %. Spektriniai nuostoliai sudaro didžiausią dalį. Komercinėje gamyboje pasiekiamas tik kiek didesnis nei 18 % fotoelemento efektyvumas. Tai sąlygoja papildomai atsiradę atspindžio nuo paviršiaus ir kt. nuostoliai. Energijos nuostoliai saulės elemente, susiję su elemento vidaus varža ir gali siekti 21 %. Bendras fotoelemento energijos pasiskirstymo balansas pavaizduotas 3 pav.



3 pav. Fotoelemento energijos nuostolių balansas

Pastangos padidinti efektyvumą bent keliomis procento dalimis reikalauja didelių investicijų, bet duoda milžinišką efektą generuojant elektros energiją fotoelektrinėse jėgainėse. Šioje srityje atliekami moksliniai tiriamieji darbai tiek gerinant pačių fotoelementų charakteristikas, tiek kuriant naujas fotoelektrinių modulių gamybos technologijas ir ieškant naujų, netradicinių medžiagų jų gamybai. Nepaisant fotoelektros naudojimo privalumų, platų jos pritaikymą stabdo gan didelės pagamintos elektros energijos kainos. Vienas iš kainos mažinimo būdų yra fotoelektrinių modulių konstrukcijos tobulinimas, kuriant koncentratorinius fotoelektrinius modulius, leidžiančius surinkti ir panaudoti didesnę saulės energijos srautą ir naudoti mažiau ir mažesnio ploto saulės elementus, kurių kaina sudaro didžiausią dalį fotoelektrinių modulių kainos.

2. SAULĖS ŠVIESOS KONCENTRATORIAI IR JŲ PANAUDOJIMAS FOTOELEKTRINĖSE SISTEMOSE

2.1. ISTORIJA

Legenda sako, kad apie 212 m. prieš mūsų erą graikų mokslininkas Archimedas, panaudojęs bronzos lakštus saulės šviesos fokusavimui, sudegino medinį Romos imperijos laivyną, apgulęs Sirakūzus.

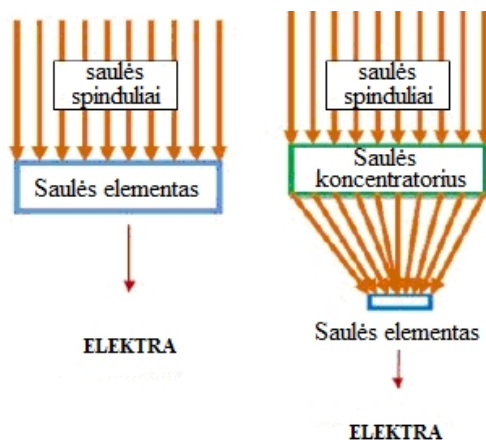
1860 m. prancūzų matematikas *Augustas Mouchetas* pasiūlė garo mašinos, maitinamos saulės energija, idėją. Kiek vėliau, jis kartu su asistentu *Abeliu Pifre'o* sukonstravo pirmą saulės energijos variklį. Šis variklis tapo šiuolaikinių parabolinių saulės kolektorių pirmtaku. Pasibaigus antrajam pasauliniam karui, mokslininkas ir rašytojas – fantastas *Arthuras C. Clarkas* pasiūlė idėją palydovo, aprūpinamo saulės energija maitinamu garo varikliu.

1969 m. *Odeillo* pastatė saulės krosnį. Tai atrodė kaip aštuonių aukštų parabolinių veidrodžių sistema. Žinoma, visa tai buvo iki 1980 m., kai buvo pastatytas pirmasis didelės galios saulės šiluminės elektros generatoriaus bokštas. Visi šie atradimai davė pradžią ir toli gražu ne

pabaigą šios dienos šviesą koncentruojančioms sistemoms (toliau - ŠKS), kurios su kiekviena diena vis tobulinamos ir gaunami stulbinantys rezultatai.

2.2. KONCENTRATORIAUS SAMPRATA

Šviesos koncentratorius - tai įrenginys, kuriuo šviesa surenkama iš didelio ploto ir nukreipiama į mažo ploto saulės elementą ar kito tipo išėjimą. Supaprastinta tokio įrenginio schema pavaizduota 4 pav.



4 pav. Saulės elemento ir saulės elemento su koncentratoriumi palyginimas

Priklausomai nuo koncentratoriaus paskirties, skiriasi ir medžiagos, iš kurių jis gaminamas. Saulės kolektoriams skirti koncentratoriai dažniausiai gaminami iš veidrodžių, o pastatuose integruotose fotoelektros (toliau – FE) sistemose dažniausiai naudojamas stiklas ar permatomas plastikas (akrilas). Šios medžiagos yra palyginti pigios, ir todėl jos gali būti naudojamos fotoelektrinėse sistemose. Būtent todėl tos pačios energinės išeigos saulės elementas su koncentratoriumi pigesnis nei elementas be koncentratoriaus. Pasaulyje jau priimta, jog ekonomiškai naudingiausios saulės jėgainės ateityje turės koncentratorius ir nedidelio ploto, tačiau labai efektyvius silicio saulės elementus.

Pagrindinės kliūtys fotoelektros energijai konkuruoti su standartinėmis energijos rūšimis yra šios: mažas efektyvumas, didelė žaliavų kaina ir gamybos kintamumas, priklausantis nuo meteorologinių sąlygų. Vienas iš būdų padidinti efektyvumą – naudoti šviesą koncentruojančią fotoelektrinę jėgainę (*concentrated photovoltaic*), o tai leidžia pasiekti didesnę saulės elementų efektyvumą bei sutaupyti silicio žaliavos, atpiginant fotoelektrinį modulį. Tačiau atsiranda ir trūkumų:

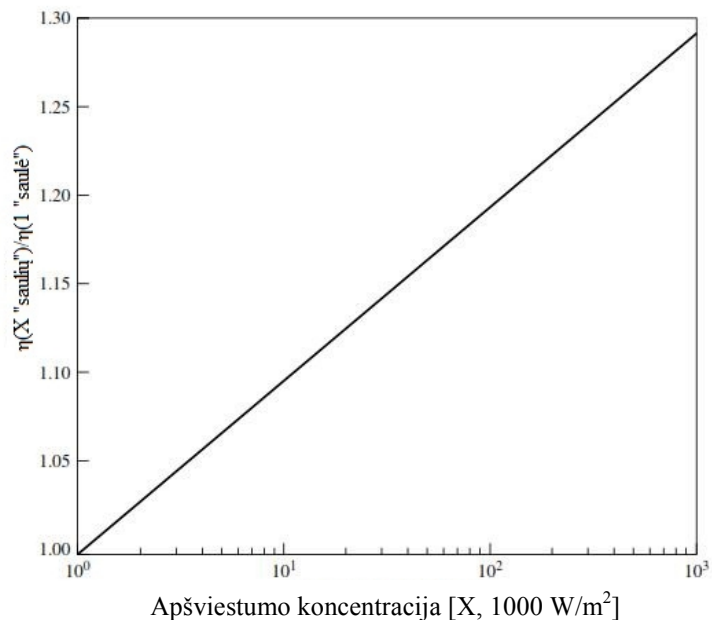
- koncentratoriams reikalingos saulės sekimo sistemos, didinančios saulės modulių užimamą plotą, tačiau šie moduliai netinkami, integruoti juos į pastatus;
- ilgaamžiškumas, palyginti su standartiniais fotoelektriniais moduliais, nėra visiškai ištirtas (Antonini 2010).

2.3. KONCENTRACIJOS KOEFICIENTAS

Yra keletas apibrėžimų, apibūdinančių koncentracijos koeficientą. Populiariausias iš jų – geometrinis, literatūroje įvardintas „*geometric concentration ratio*“ (Antonini 2010). Jis apibrėžiamas kaip pirminio lęšio paviršiaus ploto santykis su aktyviu saulės elemento plotu. Koncentracija dar gali būti matuojama vadinamosiomis saulėmis. Standartinis, pikinis saulės šviesos intensyvumas yra $0,1 \text{ W/cm}^2$ (1000 W/m^2). Saulių koncentracija apibrėžiama kaip sufokusuotos saulės elemento aktyviajame paviršiaus plote šviesos intensyvumui padalintam iš pikinio saulės šviesos intensyvumo. Pavyzdžiui, 10 W sufokusavus į 2 cm^2 saulės elementą, gaunama 50 saulių koncentracija (Luque *et al.* 2003).

Jei energinę apšvitą pažymėtume X (1000 W/m^2), tai trumpojo jungimo grandinės elektros srovę, galima įvertinti iš sąryšio (Luque *et al.* 2003):

$$I_{SC}^{Xsuns} = X I_{SC}^{1sun} . \quad (2.1)$$



5 pav. Santykinio efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos (Luque *et al.* 2003)

Darant prielaidą, kad puslaidininkio temperatūra, kintant šviesos srautui, nekinta, sąryšį (2.1) galima užrašyti kaip saulės elementų efektyvumą, panaudojant koncentratorių:

$$\eta = \frac{FF^{Xsuns} V_{OC}^{Xsuns} I_{SC}^{Xsuns}}{P_{in}^{Xsuns}} = \frac{FF^{Xsuns} V_{OC}^{Xsuns} X I_{SC}^{1sun}}{X P_{in}^{1sun}} = \frac{FF^{Xsuns} V_{OC}^{Xsuns} I_{SC}^{1sun}}{P_{in}^{1sun}}. \quad (2.2)$$

Atvirosios grandinės įtampa užrašoma:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC} + I_{o1}}{I_{o1}} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC}}{I_{o1}}. \quad (2.3)$$

Iš (2.3) lygties:

$$V_{OC}^{Xsuns} = V_{OC}^{1sun} + \frac{kT}{q} \ln X. \quad (2.4)$$

FF yra V_{OC} funkcija, todėl:

$$\eta^{Xsuns} = \eta^{1sun} \left(\frac{FF^{Xsuns}}{FF^{1sun}} \right) \left(1 + \frac{\frac{kT}{q} \ln X}{V_{OC}^{1sun}} \right). \quad (2.5)$$

Iš pateiktų (2.1 – 2.5) formulių galima nustatyti koncentracijos koeficientą bei elemento efektyvumo pokytį, panaudojus koncentratorinę sistemą.

2.4. OPTINĖS KONCENTRATORIAUS SAVYBĖS

Saulės koncentratorių optika pastaruosiuos 30 metų buvo labai intensyviai plėtojama. Optikos tobulinimas žymiai pakeitė fotoelektros sritį. Sukurta daug inovacijų, įdiegta patobulinimų bei išrasti dar iki šiol nematyti saulės šviesą koncentruojantys elementai. Keletas optinių parametų perėmė vaidmenį koncentratoriuose, parametų tipai: geometriniai, susiję su idealiomis dizaino dalimis bei fizikiniai, susiję su medžiagų pasirinkimu bei kitomis gamybos technologijomis (Antonini 2010).

Pagrindiniai geometriniai parametrai:

- koncentracijos koeficientas;
- orientacijos į šviesos srautą optimalus kampas.

Pagrindiniai fizikiniai faktoriai:

- šviesos pralaidumas;
- šviesos atspindys;

- šviesos sugertis;
- dispersija;
- geltonavimo indeksas (YI – yellowing index);
- dvikrypčio atspindėjimo pasiskirstymo funkcija (BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function);
- dvikrypčio pralaidumo pasiskirstymo funkcija (BTDF – Bidirectional Transmission Distribution Function).

Dvikrypčio atspindėjimo pasiskirstymo funkcija lygi:

$$BRDF(\Theta_i, \varphi_i, \Theta_s, \varphi_s) = \frac{dL_s(\Theta_s, \varphi_s)}{dE_i(\Theta_i, \varphi_i)}, \quad (2.6)$$

čia Θ_i, φ_i krintančio šviesos srauto kampas sferinėse koordinatėse, Θ_s, φ_s - kampai, atitinkantys sklaidos kryptis, L_s – sklaidyta energija, E_i – apšvieta.

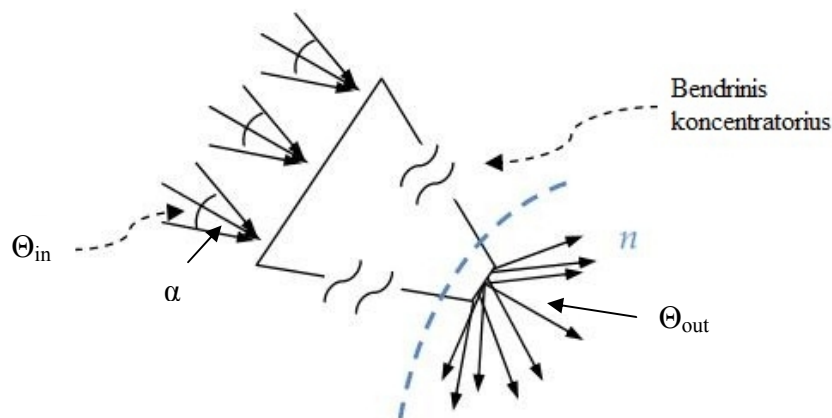
Šis optinis parametras gali tapti labai reikšmingas, esant medžiagų paviršių senėjimui, kai atsiranda nepageidaujama šviesos sklaida. Dvikrypčio pralaidumo pasiskirstymo funkcija paprastai apibūdina šviesos sklaidą skaidriose medžiagose, esant miglotam paviršiui (Antonini 2010).

Visi paminėti parametrai turi įtakos optiniam koncentratoriaus efektyvumui, kuris yra lygus:

$$\eta_{opt} = \frac{E_{Rs}}{E_{Es}}, \quad (2.7)$$

čia E_{Rs} – apšvita imtuvo paviršiuje, E_{Es} – apšvita įėjimo paviršiuje.

Viena svarbių teoremų koncentratorių optikoje: egzistuoja ryšys tarp koncentratoriaus priėmimo maksimalaus kampo ir koncentracijos maksimalaus koeficiento C_{max} . Šis ryšys pavaizduotas 6 pav. ir užrašytas (2.8) formulėje (Luque *et al.* 2003).



6 pav. Bendrinis koncentratorius (Θ_{in} , Θ_{out} – atitinkamai spindulių kritimo ir išėjimo kampai, α – priėmimo kampas) (Antonini 2010)

$$C_{\max} = \frac{n^2 \sin^2 \Theta_{out}}{\sin^2 \Theta_{in}}, \quad (2.8)$$

čia n – medžiagos, iš kurios pagamintas koncentratorius, lūžio rodiklis.

Literatūros šaltinyje (Benitez *et al.* 2010) kaip esminė funkcija CPV optikai minimas koncentracijos – priėmimo produktas (CAP) bei optinis polichromatinis efektyvumas, išreiškiamas trumpojo jungimo srove (2.10). Konkrečiu atveju naudojant Frenelio koncentratorių su antrine optika.

$$CAP = \sqrt{C_g} \sin \alpha, \quad (2.9)$$

čia C_g – yra geometrinė koncentracija, α – priėmimo kampas.

$$\eta_{opt, polychrom} = \frac{I_{SC}^{conc}}{C_g I_{SC}^{1sun}} = \frac{\min\{I_{SC, top}^{conc}, I_{SC, middle}^{conc}, I_{SC, bottom}^{conc}\}}{C_g \min\{I_{SC, top}^{1sun}, I_{SC, middle}^{1sun}, I_{SC, bottom}^{1sun}\}}. \quad (2.10)$$

Siekiant pagaminti geros kokybės ir aukšto koncentracijos koeficiento šviesos koncentratorinę sistemą, reikia detalai išanalizuoti koncentratorių optines savybes. Dažniausiai kuriami kompiuteriniai modeliai, kurių pagalba apskaičiuojami visi geometriniai ir fizikiniai parametrai.

2.5. SAULĖS ŠVIESOS KONCENTRAVIMO TECHNOLOGIJOS

Pasaulinėje praktikoje naudojamos įvairios saulės šviesos koncentravimo technologijos, pasižyminčios specifinėmis savybėmis (Muhammad-Sukki *et al.* 2010).

Privalumai:

- sumažėjusi sistemos efektyvumo priklausomybė nuo saulės elemento;
- padidėjęs surenkamo saulės šviesos srauto kiekis ir dėl to išaugęs saulės elemento efektyvumas;
- sumažėjusi sistemos kaina.

Trūkumai:

- sumažėjęs saulės elemento darbo laikas;
- reikalinga mechaninė saulės sekimo sistema;
- reikalingas saulės elementų aušinimas, siekiant palaikyti efektyviausią elemento darbo režimą.

Per pastaruosius keturis dešimtmečius saulės koncentratorių technologijos tobulėjo ypač sparčiai. Šiuo metu naudojami ir tiriami labai skirtingų tipų koncentratoriai:

- parabolinis (*Parabolic Concentrator*);
- hiperbolinis (*Hyperboloid Concentrator*);
- Frenelio lęšių (*Fresnel Lens Concentrator*);
- jungtinis parabolinis (*Compound Parabolic Concentrator (CPC)*);
- dielektrinis visiško vidinio atspindžio (*Dielectric Totally Internally Reflecting Concentrator (DTIRC)*);
- plokštieji didelio koncentravimo įrenginiai (*Flat High Concentration Devices*);
- kvantinių taškų pagrindu sukurti koncentratoriai (*Quantum Dot Concentrator (QDC)*).

1 lentelė. Koncentratorių tipai pagal optinius principus

<i>Tipas</i>	<i>Aprašymas</i>
Reflektoriniai	Pasiekę koncentratorių, saulės spinduliai jame atsispindės, taip patekdami į saulės elementą. Pvz.: paraboliniai, hiperboliniai ir t.t.
Refraktoriniai	Pasiekę koncentratorių, saulės spinduliai pakeis kryptį, taip krisdami tiesiai į saulės elementą. Pvz.: Frenelio lęšio tipo koncentratoriai.
Hibridiniai	Pasiekę koncentratorių, saulės spinduliai gali kristi ir pagal reflektorinius ir pagal refraktorinius principus. Pvz.: dielektrinis visiško vidaus atspindžio koncentratorius.
Liuminescenciniai	Dėl visiško vidaus atspindžio fotonai nukeliauja į saulės elementą. Pvz.: kvantinių taškų koncentratoriai.

2.6. KONCENTRATORIŲ RŪŠYS

Šiame skyrelyje trumpai apžvelgiamos galimos koncentratorių rūšys, nesigilinant į jų veikimą. Darbo eigoje bus projektuojami ir gaminami dviejų rūšių koncentratoriai: jungtinis parabolinis ir koncentratorius su Frenelio lęšiu. Tad jiems skirtas didesnis dėmesys.

2.6.1. Paraboliniai koncentratoriai

Elementariausia parabolinio koncentratoriaus schema pateikta 7 pav. Tai dviejų dimensijų šviesą koncentruojantis įrenginys. Ryšys tarp x ir y užrašomas:

$$y = \frac{1}{4}Fx^2, \quad (2.11)$$

čia F – parabolės židinio nuotolis.

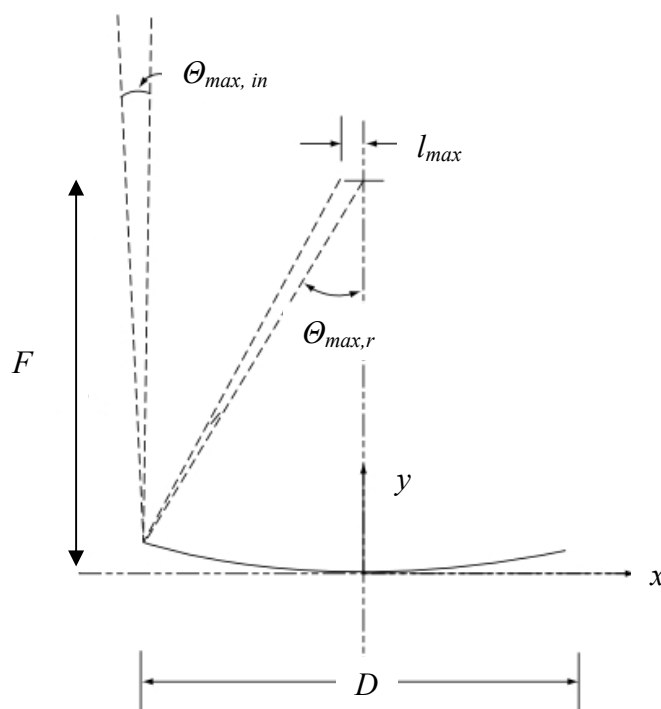
Jei šviesos srauto vektorius orientuotas statmenai, tada parabolės skersmuo D užrašomas:

$$\frac{y}{D/2} = \frac{1}{8f} \left(\frac{x}{D/2} \right)^2, \quad (2.12)$$

čia $f=F/D$ – parabolės židinio nuotolio ir skersmens santykis.

Dviejų dimensijų parabolinio koncentratoriaus, koncentravimo laipsnis lygus:

$$C = \cos \Theta_{\max,r} \frac{\sin \Theta_{\max,in}}{\sin \Theta_{\max,in}}. \quad (2.13)$$



7 pav. Skersinis parabolinio koncentratoriaus pjūvis (F – parabolės židinio nuotolis, D – parabolės skersmuo, $\Theta_{\max,in}$ – maksimalus krintančių spindulių kampas, $\Theta_{\max,r}$ – maksimalus kampas tarp simetrijos ašies ir atspindėjusio šviesos spindulio, $l_{\max}$ – pusės saulės elemento ilgis) (Luque *et al.* 2003)

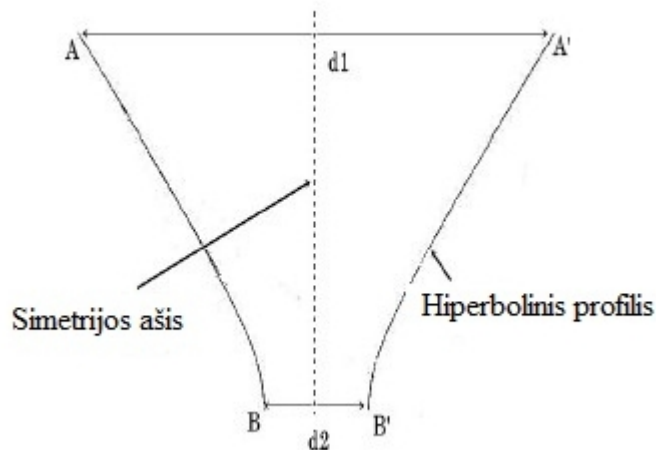
Parabolės formos koncentratoriai šiandien jau plačiai naudojami, nukreipiant saulės šviesos srautą į vieną tašką – židinį. Nebūtina naudoti visos parabolės, norint koncentruoti spindulius į reikiamą plotą, o daugelis dabartinių koncentratorių ir naudoja tik tam tikrą jos dalį (Muhammad-Sukki *et al.* 2010).

Šiuo metu naudojami du pagrindiniai parabolinio koncentratoriaus tipai. Viena jų panaudota saulės sekimo sistema, keičianti parabolės pjūvio posūkio kampą, o kitoje – naudojama į eilę sustatyta parabolių sistema. Abi šios sistemos dirba reflektoriniu principu ir naudojamos koncentravimui didelėse jėgainėse (Stine *et al.* 2012). *EUCLIDES-THERMIE* jėgainė, Kanarų salose naudoja parabolinių koncentratorių sistemą, kurios bendra galia – 480kW (Sala *et al.* 2000).

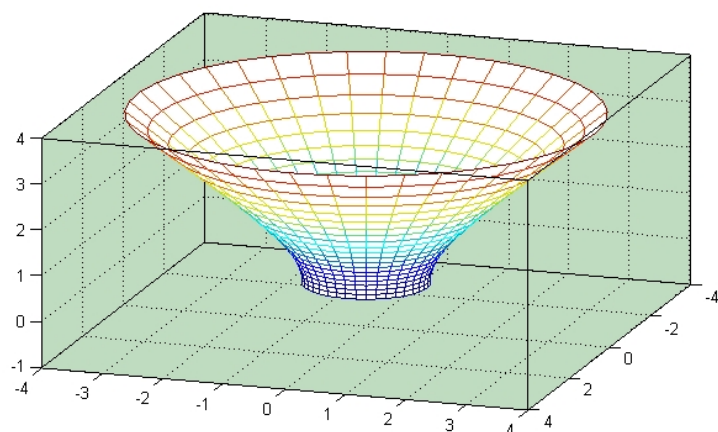
Nors šis koncentratorius leidžia pasiekti didelį efektyvumą, tam reikia didelio stebėjimo lauko ir patikimos ir, tuo pačiu, brangios saulės sekimo sistemos. Todėl šis koncentratorių tipas „nebeprigijo“ mažuose namų ūkiuose.

2.6.2. Hiperboliniai koncentratoriai

Bendroji hiperbolinio koncentratoriaus schema pavaizduota 8 pav. Šis koncentratorius sudarytas iš dviejų hiperbolinių sekcijų, AB ir A'B'. Hiperbolinio koncentratoriaus vaizdas gali būti įsivaizduojamas jo pjūvį sukant apie centro ašį 9 pav. Spindulių įėjimo ir išėjimo angų skersmenys pažymėti atitinkamai d1 ir d2. Jei hiperbolinis paviršius veidrodinis, saulės spinduliai, patekę į AA' sekciją, bus nukreipti ir sufokusuoti išėjimo ertmėje BB' (Welford *et al.* 1989).



8 pav. Hiperbolinis koncentratorius (Welford *et al.* 1989)

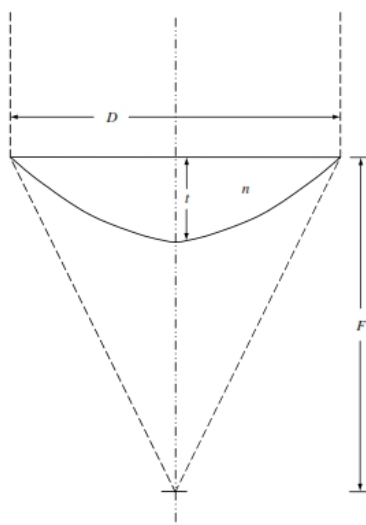


9 pav. Hiperboloidas, nubrėžtas naudojantis „MatLab“ programa

Koncentratorius kompaktiškas. Jį galima naudoti ir kaip antros pakopos koncentratorių, tačiau norint išgauti didesnę efektyvumą naudojamas įėjimo angos AA' dydžio lęšis. Dažniausiai literatūroje ir praktikoje sutinkamas pavyzdys yra šio koncentratoriaus naudojimas kartu su Frenelio lęšiu.

2.6.3. Frenelio koncentratorius

Frenelio lęšio veikimo principas panašus į standartinio lęšio, nukreipiant spindulius ir sufokusuojant juos viename taške (10 pav.). Toks lęšis gali būti analizuojamas spindulių sekimo (*ray-tracing*) būdu naudojant *Snell'io* dėsnį arba kitais atvejais remiantis *Fermat'o* principais (Luque *et al.* 2003).

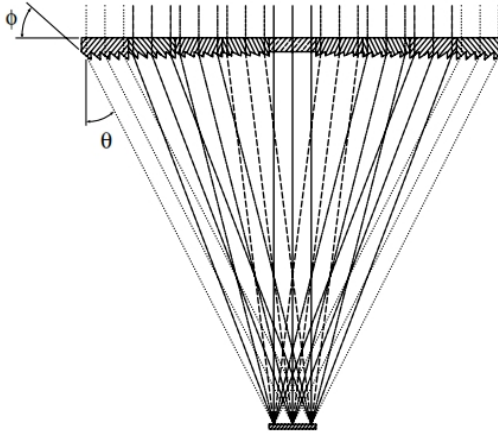


10 pav. Laužiančiojo lęšio geometrija (Luque *et al.* 2003)

Skersinis Frenelio koncentratoriaus pjūvis pavaizduotas 11 paveiksle. Statmenai orientuoto šviesos srauto atveju, šviesa atsispindi kampų θ , kuris lygus (Kwangsun *et al.* 2006):

$$\theta(i, j) = \arctan\left(\frac{d_{xy}(i, j)}{f}\right), \quad (2.14)$$

čia $d_{xy}(i, j)$ atstumas nuo lęšio centro iki koncentratoriaus centro, f – lęšio židinio nuotolis.



11 pav. Skersinis Frenelio koncentratoriaus pjūvis (ϕ – lęšio briaunos kampas, θ – šviesos atspindžio kampas) (Kwangsun *et al.* 2006)

Lęšio briaunos kampas ϕ , apskaičiuojamas remiantis *Snell'io* dėsnio:

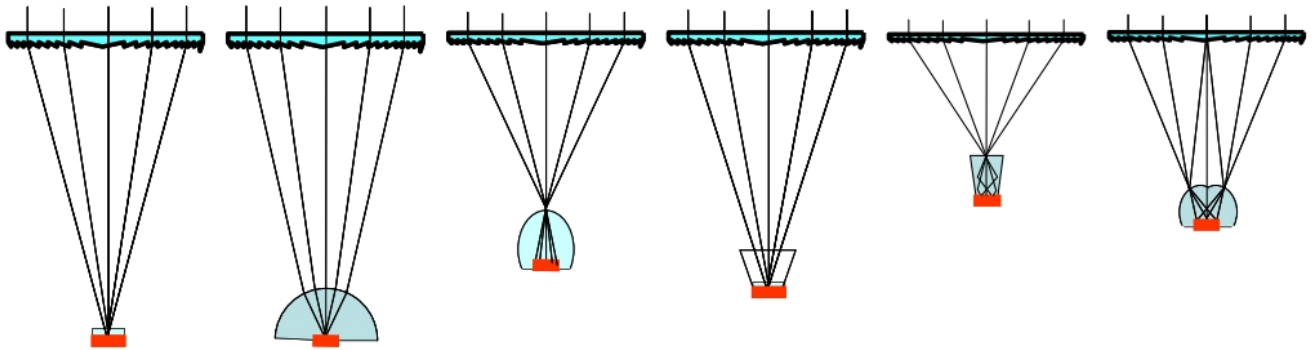
$$\phi(i, j) = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\sin^2 \theta(i, j)}{(n_l^2 - 2n_l \theta(i, j) + 1)}}\right), \quad (2.15)$$

čia n_l – medžiagos, iš kurios yra pagamintas Frenelio lęšis, lūžio rodiklis.

Iš lygčių (2.14) ir (2.15) nustatomi Frenelio lęšio briaunų kampai. Eksperimentinių tyrimų metodikoje nurodyta programa, kuria bus projektuojamas Frenelio lęšis.

Lęšis turi dvi dalis – lygų viršutinį paviršių ir kitoje pusėje esantį paviršių, sudarytą iš kantuotų briaunų. Šios briaunos artimos lęšio išlenktumui. Gerai pagamintas Frenelio lęšis gali turėti netgi 100 ar daugiau tokių briaunų viename milimetre (Stine *et al.* 2012).

Yra keletas būdų kaip naudoti šį koncentratorių: naudojant koncentravimą į tašką, arba į liniją. Frenelio lęšis turi savybę atskirti tiesiogiai krintančią ir atsispindėjusią šviesą, kas lemia jo gebėjimą kontroliuoti apšviestumą ir temperatūrą vidinėje ertmėje. Vienas iš esminių šio lęšio elementų – aštrios briaunos, todėl tai sukelia problemų gamyboje. Dėl klaidų gamybos procese, gali būti pagamintos ne itin aštrios briaunos, o tai lemtų šviesos spindulių išbarstymą ir blogą fokusavimo kokybę reikalingame taške.

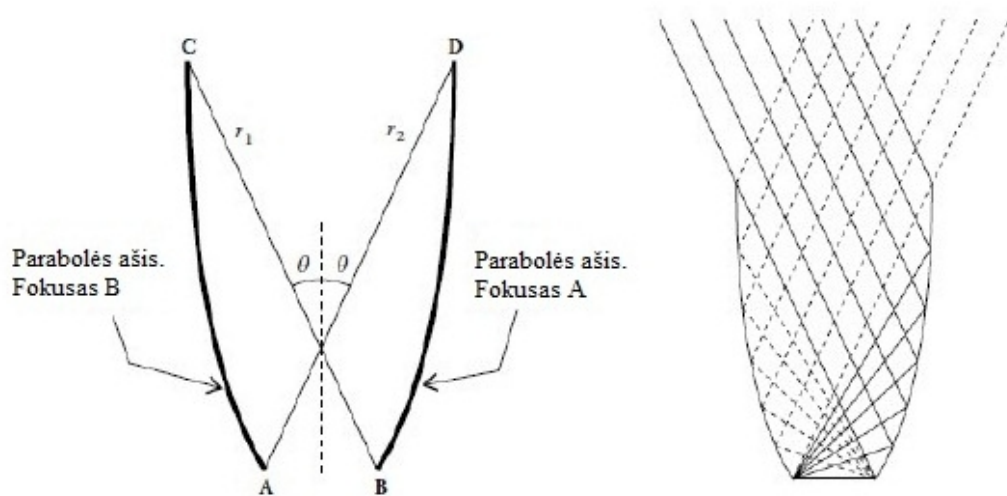


12 pav. Koncentratorių pavyzdžiai, naudojant Frenelio lęšį ir antrinį optinį elementą (Benitez *et al.* 2010)

Dažnai koncentratoriuose, su Frenelio lęšiu, naudojamas antrinis optinis elementas (*Secondary Optical Element (SOP)*), kurių literatūroje sutinkama įvairiausių rūšių. Literatūros šaltinyje (Benitez *et al.* 2010) yra nagrinėjami keletas tokio tipo koncentratorių (12 pav.).

2.6.4. Jungtinis parabolinis (CPC)

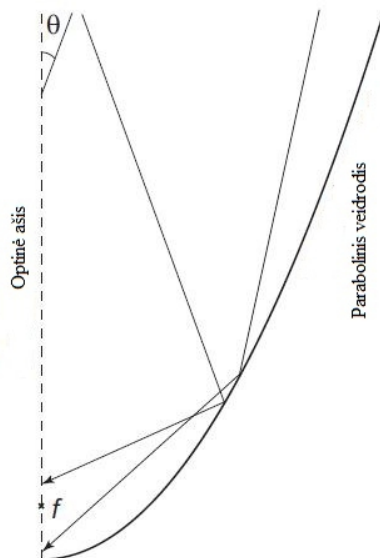
13 pav. pavaizduotas jungtinis parabolinis koncentраторius. Jis sudarytas iš dviejų parabolinių segmentų – AC ir BD ir gali būti išskaidytas į tris pagrindines dalis: plokščią įėjimo ertmę, visiškai atspindintį vidinio profilio paviršių ir išėjimo ertmę. Šviesos srautui krentant 20 laipsnių kampu, koncentраторius sukonscentruos visą įeinančią šviesą į išėjimo ertmę AB (Welford *et al.* 1989).



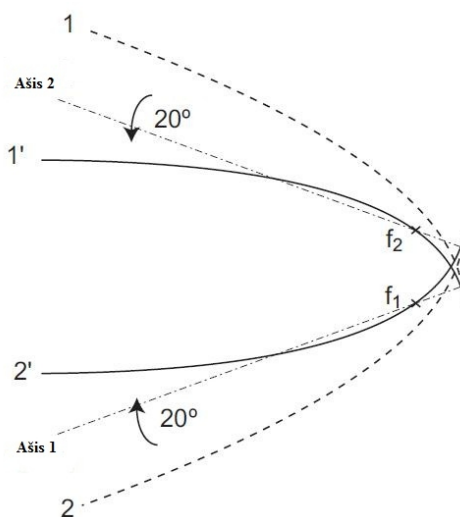
13 pav. Jungtinis parabolinis koncentраторius (kairėje) ir spindulių eiga koncentratatoriaus viduje (dešinėje) (Chaves 2008)

Šio koncentratoriaus ilgis priklauso nuo išėjimo ertmės ir leidžiamo šviesos įėjimo kampo. Mažinant šį kampą, koncentratorius didės. Didžiausias tokio koncentratoriaus privalumas tas, kad jam nereikalingas didelis stebėjimo laukas, o trūkumai atitinka parabolinio koncentratoriaus – jam reikalinga patikima sekimo sistema (Muhammad-Sukki 2010).

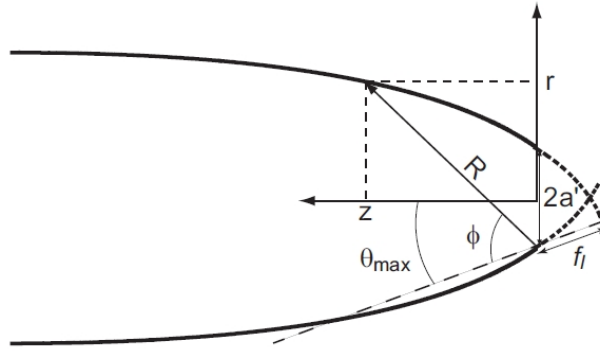
Parabolinis veidrodis atspindi krintančią šviesą į fokusavimo tašką. Jei šviesa krinta teigiamu kampu, optinės ašies atžvilgiu, bus sufokusuota žemiau fokusavimo taško, jei neigiamu kampu – aukščiau (14 pav.) (Nilson 2005).



14 pav. Parabolinis veidrodis (Nilson 2005)



15 pav. Dvidimensis jungtinis parabolinis koncentratorius su 20° priėmimo kampu, kur originalios parabolės 1 ir 2 pasuktos 20° kampu ($1'$ ir $2'$) (Nilson 2005)



16 pav. Dvidimensis jungtinis parabolinis koncentratorius (f_l – parabolio židinio nuotolis, $\theta_{\max}$ – maksimalus kritusio šviesos spindulio kampas, ϕ – sukimosi kampas z ašies atžvilgiu, R – nuo parabolės paviršiaus atsispindėjusio šviesos spindulio trajektorija) (Nilson 2005)

16 pav. pateiktas kitokio tipo dvidimensis jungtinis parabolinis koncentratorius, kuris aprašytas (2.16 – 2.20) lygtimis (Nilson 2005).

$$R = \frac{2f_l}{1 - \cos(\phi)}; \quad (2.16)$$

$$r = R \sin(\phi - \theta_{\max}) - a' = \frac{2f_l \sin(\phi - \theta_{\max})}{1 - \cos \phi} - a'; \quad (2.17)$$

$$z = R \cos(\phi - \theta_{\max}) = \frac{2f_l \cos(\phi - \theta_{\max})}{1 - \cos \phi}; \quad (2.18)$$

$$f_l = a'(1 - \cos(90^\circ + \theta_{\max})) = a'(1 + \sin \theta_{\max}); \quad (2.19)$$

$$2a' = \frac{2f_l}{1 - \cos(90^\circ + \theta_{\max})}. \quad (2.20)$$

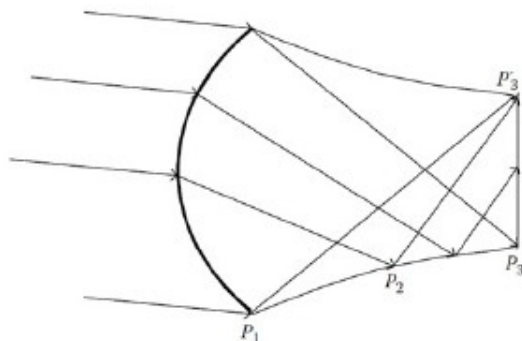
Jungtinis parabolinis koncentratorius pasirenkamas tolimesnių prototipų gamyboje, kadangi jis turi didžiausią priėmimo (palankumo) kampą, kas leidžia sekimo sistemoje didesnius nukrypimus (lyginant su koncentratoriumi su Frenelio lęšiu) bei įgalina sukonzentruoti atsitiktinai krintančius saulės šviesos spindulius. Taip pat nesunkiai pasiekiamas vidutinis koncentracijos koeficientas bei pasižymintis nesudėtinga ir lengva konstrukcija.

2.6.5. Dielektrinis visiško atspindžio koncentratorius

Pirmasis dielektrinis visiško vidaus atspindžio koncentratoriaus prototipas pristatytas 1987m. (Ning *et al.* 1987). Šis naujos klasės optinis elementas gali pasiekti koncentracijas, artimas teoriniam maksimumui. Galimi du būdai tokio tipo koncentratoriui pagaminti: maksimalios koncentracijos ir

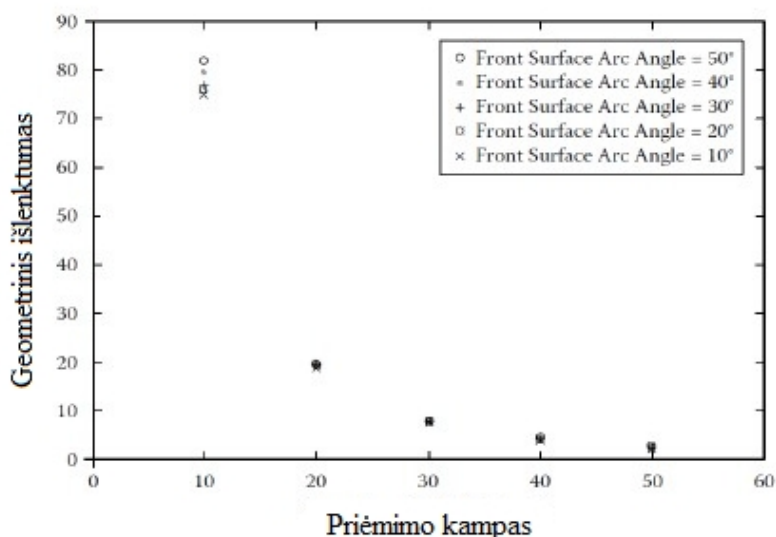
fazių išlaikymo metodais. Nors abu būdai sukurs beveik identišką struktūrą, pirmasis metodas leidžia pasiekti truputėlį didesnę koncentraciją ir todėl tinkamesnis saulės technologijoms.

Dielektrinis visiško vidaus atspindžio koncentratorius (17 pav.) susideda iš trijų dalių: išlenkto išorinio paviršiaus (P_1), pilnai atspindinčio šoninio profilio (P_2) ir išėjimo ertmės (P_3). Kai spinduliai patenka ant išorinio paviršiaus, jie nukreipiami į šoninį profilį, atsitrenkę į šoninę sieną, jie toliau keis kryptį, kol nukeliaus iki išėjimo angos. Išorinis lenktas paviršius gali būti hemisfera, tačiau pastaruoju metu vystomi ir parabolės, bei elipsės formos (Ramirez-Iniguez *et al.* 2005).



17 pav. DTIRC koncentratoriaus schema (P_1 – išorinis paviršius, P_2 – pilnai atspindintis šoninis profilis, P_3 – išėjimo anga) (Ning *et al.* 1987)

Koncentratoriaus gaunama saulės spinduliuotė priklauso nuo jo geometrinių savybių: priėmimo kampo, paviršiaus arkos išlenktumo. Koncentracija atvirkščiai proporcinga priėmimo kampui (18 pav.), o paviršiaus arkos kampas turi labai nedidelę įtaką (Muhammad-Sukki *et al.* 2010).



18 pav. DTIRC tipo koncentratoriaus efektyvumo priklausomybė nuo jo paviršiaus išlenktumo (Ramirez-Iniguez *et al.* 2008)

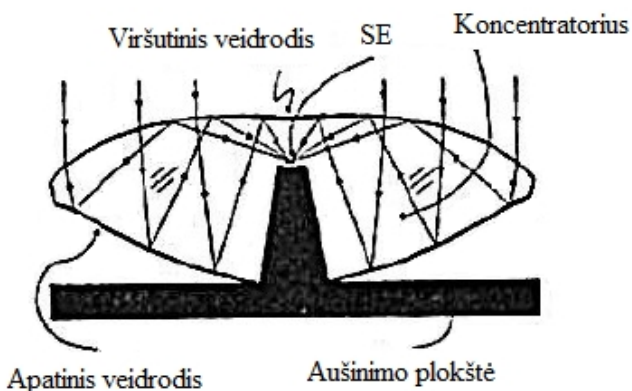
Šio koncentratoriaus privalumas – mažesnis užimamas plotas ir, priklausomai nuo matmenų, juo galima pasiekti didelę koncentraciją. Tačiau toks koncentratorius negali efektyviai sukonzentruoti šviesos į saulės elementą (Muhammad-Sukki *et al.* 2010).

DTIRC gali būti naudojamas kaip trijų ašių, besisukantis, simetrinis koncentratorius arba kaip dviejų ašių, panaudojant optinio suspaudimo principą. Šiuo metu toks koncentratorius naudojamas NASA, kaip antrinis koncentratorius saulės šilumos sistemose kosmose (Piszczor *et al.* 2000).

2.6.6. Plokšti didelio koncentravimo įrenginiai

Plokšti didelio koncentravimo įrenginiai – tai naujos kartos, Ispanijoje išvystyti, koncentratoriai. Šie koncentratoriai gali pasiekti teoriškai maksimalią koncentraciją, priklausomai nuo priėmimo kampo (kaip ir DTIRC). Šiuo metu egzistuoja penki eksperimentiniai tokio koncentratoriaus tipai: *RR*, *XX*, *XR*, *RX* ir *RXI* (Welford *et al.* 1989). Trumpiniais paaiškinama šviesos spindulio eiga koncentratoriuje - „X“ - nusako atspindį, „R“ - refrakciją, o „I“ - visišką vidaus atspindį. Tokiu būdu *XR* tipo koncentratoriuje šviesos spinduliai pirma atspindimi ir tada dėl refrakcijos keičia savo kritimo kampą, prieš pasiekdami priėmėją – saulės elementą. Kad būtų paprasčiau, čia bus apibūdinamos *RXI* tipo koncentratoriaus savybės (Minano *et al.* 1995).

RXI koncentratoriaus schema pateikta 19 pav. Koncentratorius, sukurtas pasinaudojant *Minano-Benitez'o* metodu, turi tris sekcijas – viršutinį paviršių su centre esančiu veidrodžiu, apatinį paviršių pagamintą iš veidrodžio ir priėmėją – saulės elementą. Naudojant *RXI* tipo apskritimiškai simetrišką koncentratorių, kurio dielektrike lūžio rodiklis 1,5, šviesos vektoriaus kampu $2,7^\circ$, gali būti pasiekta koncentracija – 1000 k.



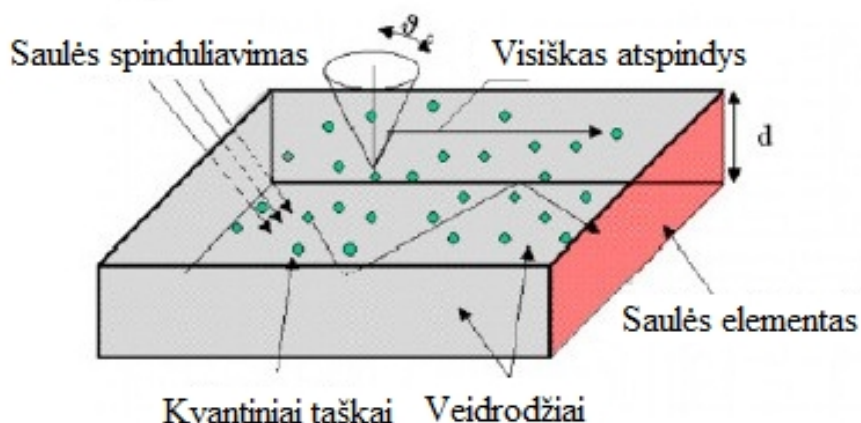
19 pav. *RXI* koncentratorius (Minano *et al.* 1994)

Šie koncentratoriai turi du pagrindinius privalumus: jie labai kompaktiški ir pasiekia labai aukštus koncentracijos lygius. Tačiau esti ir trūkumų. Dėl nepatogios saulės elemento tvirtinimo vietos, labai sunku sukurti elektrinį kontaktą ir įmontuoti pakankamo dydžio aušintuvą, o saulės elemento matmenys turi būti maži, tam, kad sumažinti šešėliavimo reiškinio įtaką (Terao *et al.* 2000).

2.6.7. Kvantinių taškų koncentratoriai

Kvantinių taškų pagrindu veikiantis koncentratorius – plokščias prietaisas, susidedantis iš trijų dalių: skaidraus stiklo lakšto ar plastiko, su įmaišytais kvantiniais taškais, atspindinčiais veidrodžiais, sumontuotais ant trijų kraštų ir galinio paviršiaus, ir išėjimo, kuriame sumontuotas saulės elementas (20 pav.) (Gallagher *et al.* 2007).

Kai saulės spinduliuotė pasiekia koncentratorių, dalis spinduliuotės bus atspindima fluorescencinės medžiagos ir sugerta kvantinių taškų. Tada fotonai iš kvantinių taškų yra vėl išspinduliuojami ir keliauja į saulės elementą. Koncentracijos santykis bus stiklo ar plastiko paviršiaus ploto santykis su saulės elemento plotu (Muhammad-Sukki *et al.* 2010).



20 pav. Kvantinių taškų koncentratoriaus veikimo principas (Gallagher *et al.* 2007)

Didžiausias kvantinių taškų koncentratoriaus privalumas tai, kad jis nereikalauja saulės sekimo sistemos. Jis taip pat gali pilnai išnaudoti tiesiogiai krintančią ir atspindėtą spinduliuotę. Tačiau tokių koncentratorių trūkumas – aukšti reikalavimai luminescenciniams dažams: didelis kvantinis našumas, tinkamas sugerties spektras ir jo pasislinkimas, bei stabilumas.

2.6.8. Koncentratorių privalumai ir trūkumai

2 lentelė. Koncentratorių privalumai ir trūkumai (Muhammad-Sukki *et al.* 2010)

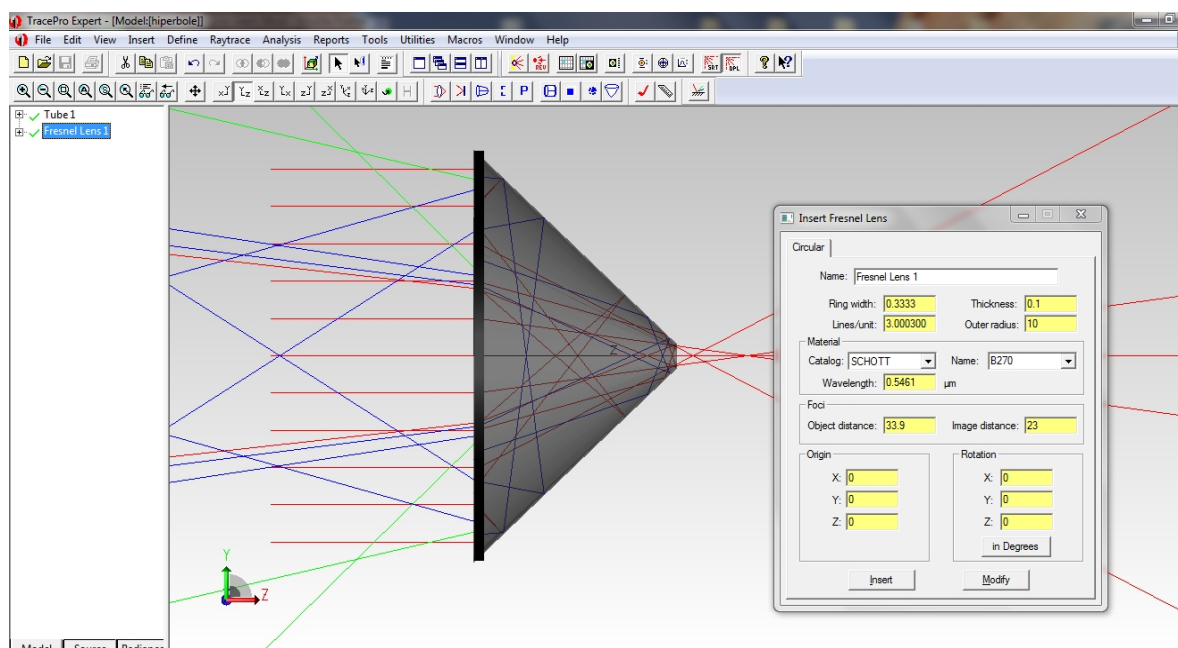
Koncentratoriaus tipas	Privalumai	Trūkumai
Parabolinis (<i>Parabolic Concentrator</i>)	• Stiprus koncentravimas.	• Reikalingas didelis apžvalgos laukas; • reikalinga gera saulės sekimo dangaus skliaute sistema.
Hiperbolinis (<i>Hyperboloid Concentrator</i>)	• Kompaktiškas.	• Reikalingas papildomas lęšis įėjimo angoje, norint kad koncentratorius veiktų efektyviai.
Frenelio lęšių (<i>Fresnel Lens Concentrator</i>)	• Plonesnis nei paprasti lęšiai; • reikalauja mažiau medžiagų; • geba atskirti atspindėtą ir tiesioginę šviesą – galimybė kontroliuoti spinduliuotę ir temperatūrą.	• Briunų kraštų netobulumai lemia netolygų šviesos išbarstymą ir blogą fokusavimo kokybę.
Jungtinis parabolinis (<i>Compound Parabolic Concentrator (CPC)</i>)	• Santykiniai didelis sukaupiamos šviesos energijos kiekis, nepaisant mažo apžvalgos lauko.	• Reikalinga labai gera saulės sekimo dangaus skliaute sistema.
Dielektrinis visiško vidaus atspindžio (<i>Dielectric Totally Internally Reflecting Concentrator (DTIRC)</i>)	• Didelis sukaupiamos šviesos kiekis, lyginant su CPC; • mažesnis nei CPC.	• Negali efektyviai perkelti visos saulės spinduliuotės, kurią surenką į žemesnio lūžio rodiklio medžiagą.
Plokšti didelio koncentravimo įrenginiai (<i>Flat High Concentration Devices</i>)	• Kompaktiškas; • labai didelė koncentracija.	• Sudėtingas elektrinio kontakto ir aušintuvo montavimas; • saulės elementas turi būti kiek įmanoma mažesnio ploto.
Kvantinių taškų pagrindu sukurti koncentratoriai (<i>Quantum Dot Concentrator (QDC)</i>)	• Nereikalinga sekimo sistema; • pilnai išnaudoja ir tiesiogiai krįtančią spinduliuotę, ir atspindėtą.	• Ribotas efektyvumas, priklausomai nuo liumenescensinių dažų savybių.

3. KONCENTRATORIŲ KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS, PRIETAISAI IR MEDŽIAGOS, EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Šiame skyriuje aprašytas koncentratorių modeliavimas, naudojamos medžiagos jo gamyboje, prietaisai bei atliktų eksperimentinių tyrimų metodika. Taip pat aprašyti saulės elementai, naudojami koncentratoriuje bei pateikiamas pradinis koncentratoriaus projektas.

3.1. KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS

Pradiniam susipažinimui su koncentratorių optika bei jos savybėmis buvo naudojama *Lambda Research group* sukurta programa „TracePro“. Ši programa leidžia sukurti dirbtinį saulės šaltinį, parinkti norimą kiekį lygiagrečių spindulių, juos nukreipti norima linkme ir t.t. Programos duomenų bazėje yra daugybė įvairių firmų (*SCHOTT, OHARA ir kt.*) optinių elementų. Kartu programa leidžia pasirinkti ir reflektorius bei absorberius. Žinoma, programos bandomoji versija neleidžia atlikti visų norimų ir reikiamų veiksmų koncentratoriaus kūrime, tokių kaip elektrinės dalies projektavimas, termodinaminių savybių tyrimų. Sekančiame etape modeliuojamos koncentratorių laikančiosios konstrukcijos ir reflektoriai.



21 pav. Simuliacija naudojant „SCHOTT“¹ firmos Frenelio lęšį

Modeliuojant jungtinį parabolinį koncentratorių, reikia gerai apskaičiuoti geometrinius parametrus. To nepadarius, koncentratorius neveiks tinkamai, šviesa bus išbarstoma ir

¹ „SCHOTT“ – viena žymiausių lęšių gamintojų.

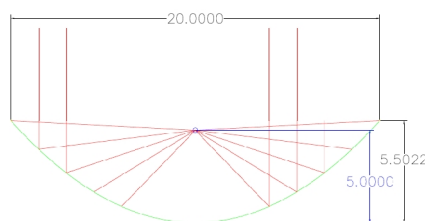
nesukoncentruojama į fotoelementus. Tinkamai sumodeliuotas ir pagamintas Frenelio lęšis nereikalauja papildomo reflektoriaus, todėl supaprastėja jo konstrukcija. Esant nedideliame krintančių spindulių išbarstymui, galima naudoti hiperbolės tipo sienelės, taip surenkant, kad ir menką dalį, išbarstytų spindulių.

Pradinis modeliavimas buvo vykdomas ir kitais būdais:

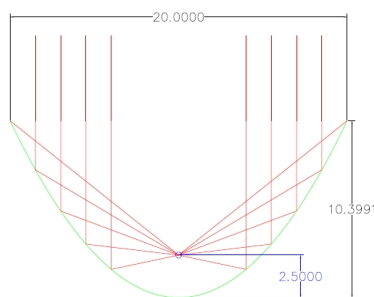
- Projektuojant jungtinį parabolinį koncentratorių buvo naudojami paprasčiausi geometriniai skaičiavimai (parabolės fokusavimo taško nustatymas ir kiti, aprašyti 2 skyriuje);
- naudojantis „AutoCAD“, „AutoDesk 3ds Max 2012“ programomis;
- Frenelio lęšio projektavimui naudojome „Zemax“ programą, kuri, pagal norimą fokusavimo atstumą, iš išgaubtojo lęšio sumodeliuoja Frenelio lęšį.

3.1.1. Jungtinio parabolinio koncentratoriaus kompiuterinis modeliavimas

Koncentratorių gali būti įvairiausių formų, todėl šiame skyriuje modeliuojami keli variantai. Taip pat nuo parabolės formos ir sujungimo būdo priklausys fokuso atstumas: kuo fokusas yra aukščiau, tuo sudėtingesnė tampa koncentratoriaus konstrukcija. Mūsų tikslas – rasti optimaliausią būdą, kuris tenkintų keliamas sąlygas bei pasižymėtų nesudėtinga konstrukcija.

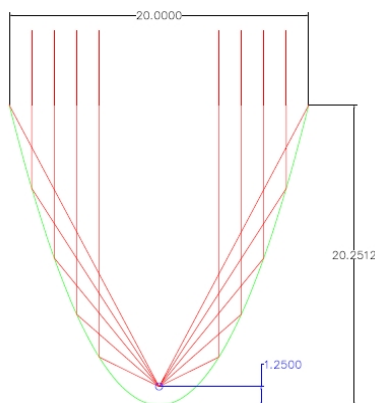


22 pav. Parabolinis koncentratorius, kurio plotis 20 cm, gylis – 5,50 cm ir židinio nuotolis – 5 cm



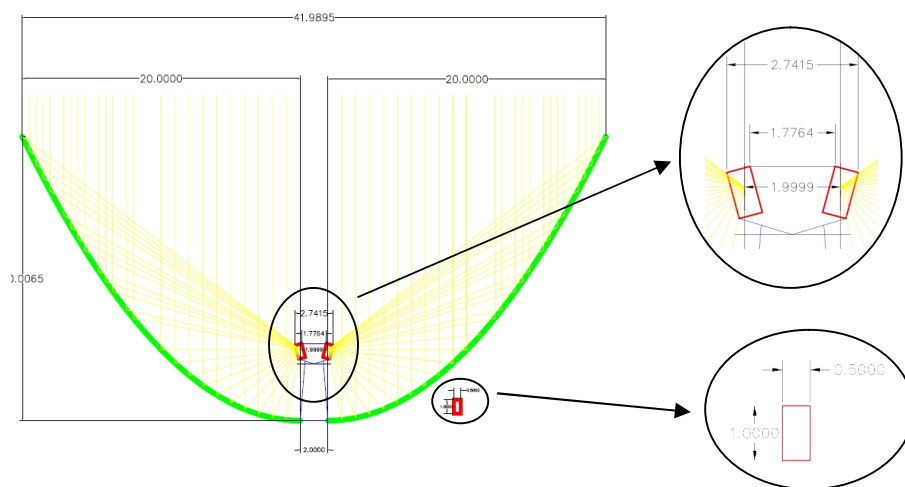
23 pav. Parabolinis koncentratorius, kurio plotis 20 cm, gylis – 10,40 cm ir židinio nuotolis – 2,5 cm

Tokios konstrukcijos, kaip pavaizduota 22 ir 23 paveiksluose, apsunkina elementų tvirtinimą, be to pastačius elementą vertikaliai ar horizontaliai nebūtų pasiekiamas norimas koncentracijos laipsnis, tuo pačiu iškiltų ir aušinimo problema. Optimalaus židinio nuotolis parodytas 24 pav., tačiau jo matmenys yra dideli. Toks koncentratorius pasunkintų koncentratorinę sistemą, o gamybos kaštai padidėtų. Didinant parabolės gylį, gaunamas mažesnis židinio atstumas. Todėl svarbu rasti sprendimą, kuris būtų optimalus tiek dydžio, tiek gamybos sąnaudų požiūriu.



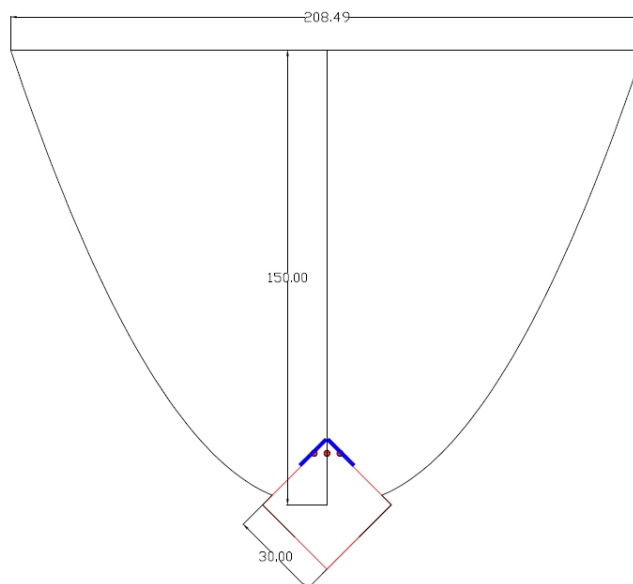
24 pav. Parabolinis koncentratorius, kurio plotis 20 cm, gylis – 20,25 cm ir židinio nuotolis – 1,25 cm

Dar vienas iš galimų koncentratoriaus variantų, pateiktas 25 pav., bet jis taip pat užima gana didelį plotą. Saulės elementus pakreipus kampu sumažėja koncentracijos laipsnis, nors krintantis spindulių intensyvumas būtų didesnis. Šio varianto atsisakyta, nes šis būdas, kaip ir pirmi du, reikalauja sudėtingesnės konstrukcijos ir atsiranda aušinimo problema.



25 pav. Jungtinis parabolinis koncentratorius su dviem elementų juostomis

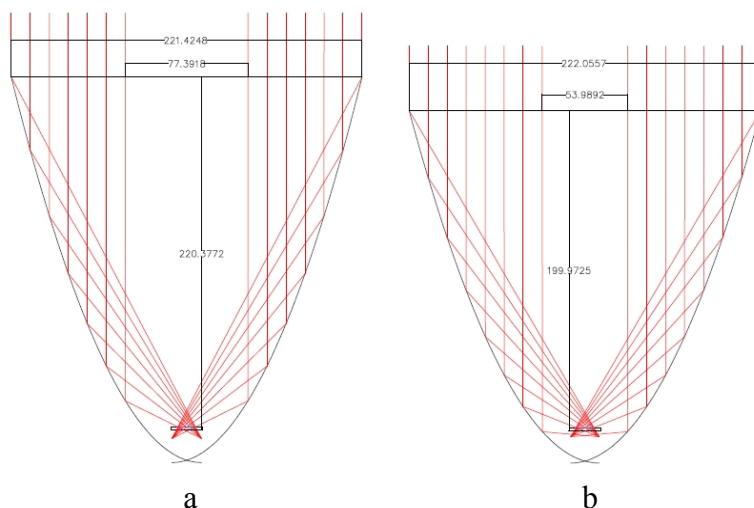
Pirmojo prototipo brėžinys pateikiamas 26 pav. Nors 25 pav. pateiktas labai panašus koncentratoriaus modelis, bet tikimasi, kad naudojant šį prototipą, šviesos intensyvumo padidinimas kompensuos elementų pasvirimo įtaką ir bus pasiektas norimas rezultatas. Šiame koncentratoriuje yra dvi elementų juostelės, pritvirtintos prie kvadratinio aliuminio profilio, kurios pagamintos iš šilumai laidžios medžiagos „*Thermal Clad*“ (plačiau aptariama 3.2.4 skyriuje). Naudojant tokią medžiagą, elementams įkaitus, šiluma perduodama į kvadratinį aliuminio profilį, atliekančio radiatoriaus funkciją. Profilio galai atviri, todėl jis aušinamas oru ir taip gaunamas savaiminis aušinimo procesas, o vidutinio koncentracijos laipsnio sistemose tokio aušinimo būdo pilnai užtenka. Koncentratoriaus geometrinė koncentracija turėtų siekti daugiau nei 10 „saulių“. Tikrąjį koncentracijos laipsnį nustatysime, kai bus pagamintas prototipas. Vėlesniuose skyriuose aprašomas koncentratoriaus gamybos procesas bei pateikiami testavimo rezultatai.



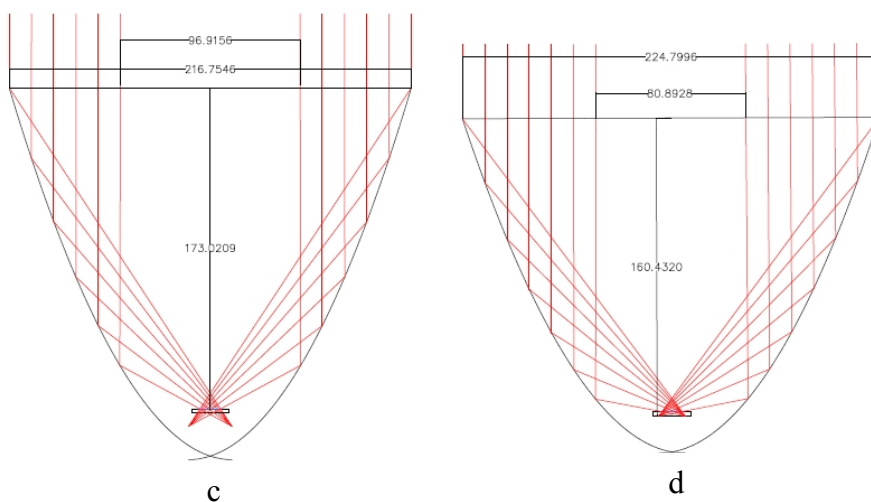
26 pav. Jungtinis parabolinis koncentratorius (I prototipas)

Sekančiame etape projektuojamas kitokio tipo jungtinis parabolinis koncentratorius. Tai koncentratorius, turintis dvi parabolės formos kraštines, kurios sustumiamos viena arčiau kitos, taip gaunami du fokusavimo taškai. Keičiant elementų matricos padėtį, galime gauti norimą elementų apšviestumo charakteristiką. Siekiant, kad elementas veiktų efektyviau, turi būti apšviečiamas kuo didesnis jo plotas.

Kompiuterinis modeliavimas buvo atliekamas „AutoCad“² programa, panaudojant „AutoLISP“³ algoritmą, kuris pateikiamas 1 priede. Šis algoritmas nubrėžia tikslią parabolę, leidžia pasirinkti bet kokį segmentų skaičių (kuo jų daugiau, tuo tikslesnė geometrija gaunama) bei apskaičiuoja parabolės židinio nuotolį. Tai žymiai palengvina modeliavimo darbus bei suteikia galimybę ištirti kuo daugiau jungtinių parabolinių koncentratorių. Įvairių matmenų jungtiniai paraboliniai koncentratoriai pateikti 27 – 30 pav.



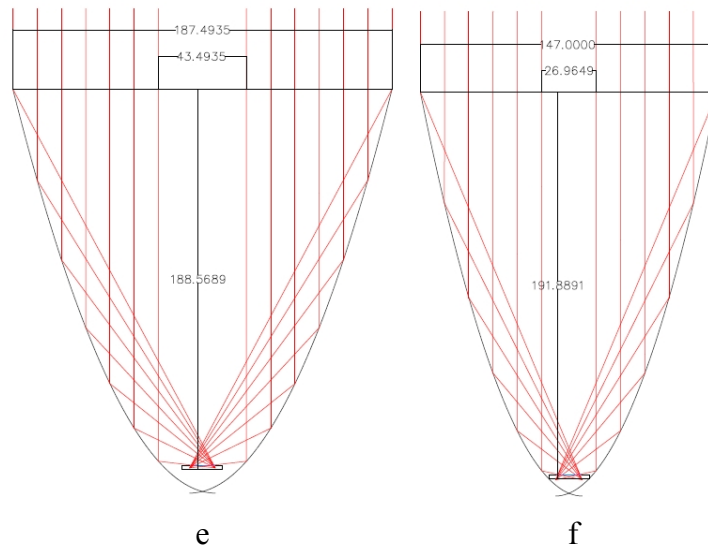
27 pav. Įvairių matmenų jungtiniai paraboliniai koncentratoriai (a – 240 x 240 mm², b – 240 x 220 mm²)



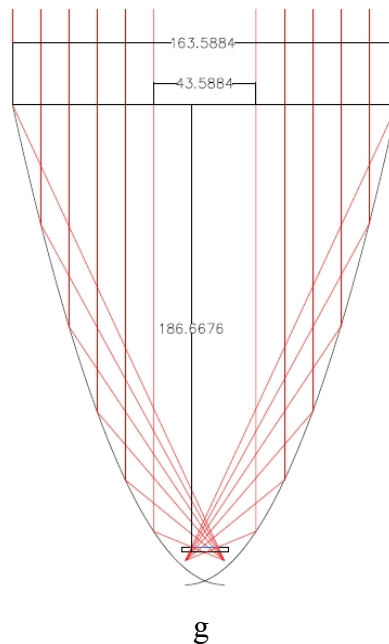
28 pav. Įvairių matmenų jungtiniai paraboliniai koncentratoriai (c – 240 x 200 mm², d – 240 x 180 mm²)

² AutoCAD – Autodesk kompanijos sukurta grafinė automatizuoto projektavimo sistema (CAD – *Computer Aided Design*).

³ AutoLISP – Lisp programavimo kalbos dialektas, sukurtas specialiai automatizuoto projektavimo sistemai AutoCAD.



29 pav. Įvairių matmenų jungtiniai paraboliniai koncentratoriai (e – 200 x 200 mm², f – 160 x 200 mm²)

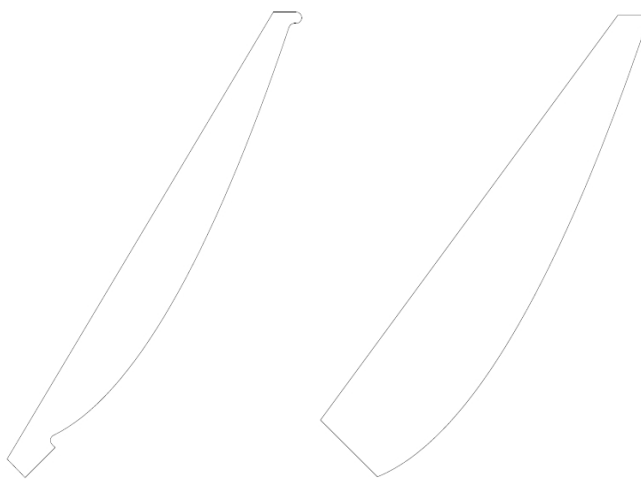


30 pav. Jungtinis parabolinis koncentratorius (II prototipas (g – 180 x 200 mm²))

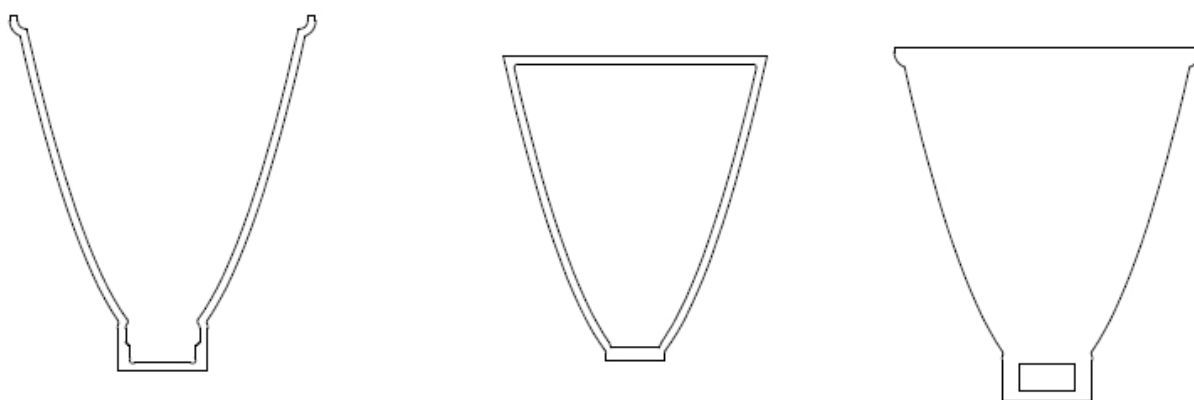
Išnagrinėjus įvairius koncentratorių variantus, buvo nuspręta toliau gaminti jungtinį parabolinį koncentratorių (30 pav.). Šis variantas pasirinktas dėl nedidelių matmenų. Jis pasižymi didžiausiu ir tolygiausiu saulės elementų apšviestumu. Tikimasi, kad jo optinės savybės bus geresnės nei I prototipo ir tuo pačiu bus sunaudojama mažiau silicio saulės elementų gamybos procese, to pasekoje atpiginant visos sistemos kainą.

3.1.2. Jungtinio parabolinio koncentratoriaus laikančiųjų konstrukcijų kompiuterinis modeliavimas

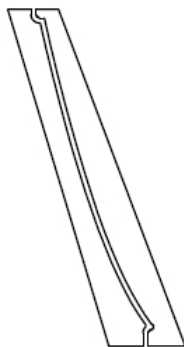
Projektuojant laikančiąsias konstrukcijas reikia išlaikyti geometriją bei standumą. Taip pat šios konstrukcijos turi pasižymėti tvirtumu bei lengvumu. Iš kokių medžiagų gaminamos šios konstrukcijos aptarsime sekančiuose skyriuose. Kompiuterinis modeliavimas atliekamas naudojant „AutoCad“ programą. Brėžinių šablonai pateikiami žemiau esančiuose paveiksluose. Pagal šiuos šablonus išfrezuojamos juostelės, kurios vėliau sujungiamos, glaistomos. Tada ant jų formuojamos prototipų kraštinės sienelės.



31 pav. I jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipo laikančiųjų konstrukcijų brėžiniai
(kairėje – kraštinės šablonas, dešinėje – galo šablonas)



32 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipo galo šablonai frezavimui

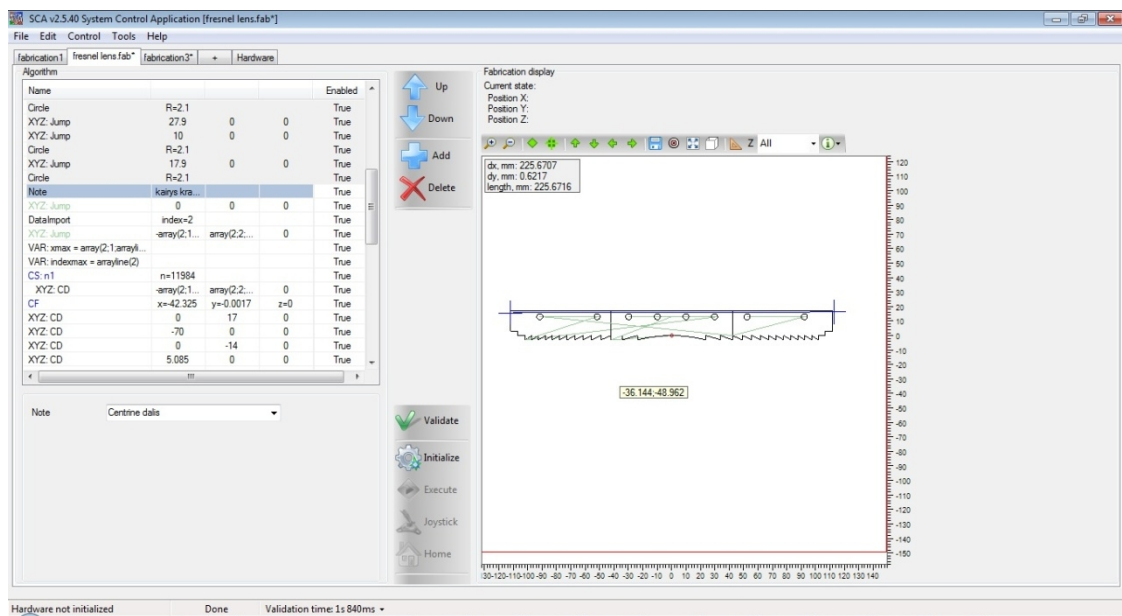


33 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus protipo kraštinių šablonai frezavimui

Du šablonai pavaizduoti 33 pav.: vienas „pozityvas“, kitas – „negatyvas“. Pastarasis naudojamas tam, kad tiksliau išlaikyti parabolės kraštinės geometrinę formą, kas nebuvo padaryta pirmajame prototipe. Tai turėtų ženkliai pagerinti kraštinės kokybę bei, koncentruojant šviesą, išvengti nepageidaujamo šviesos išbarstymo.

3.1.3. Koncentratoriaus su Frenelio lęšių kompiuterinis modeliavimas

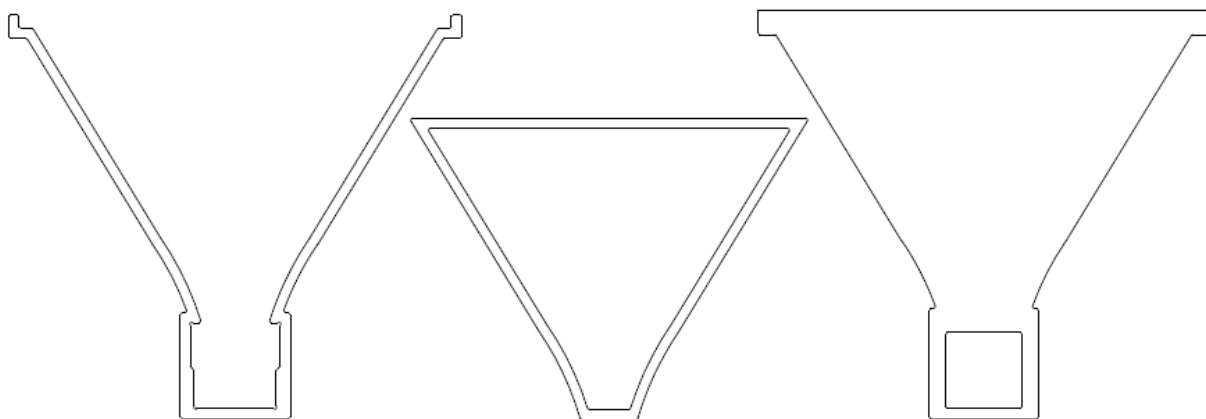
Frenelio lęšio projektavimui naudota programa „ZeMax“⁴, kurios pagalba, norimu židinio nuotoliu, iš išgaubtojo lęšio gaunamas Frenelio lęšis. Modeliavimo pavyzdys pateiktas 34 pav. Iš suprojektuoto lęšio toliau gaminamas peilis, kuriuo bus drožiamas parafinas.



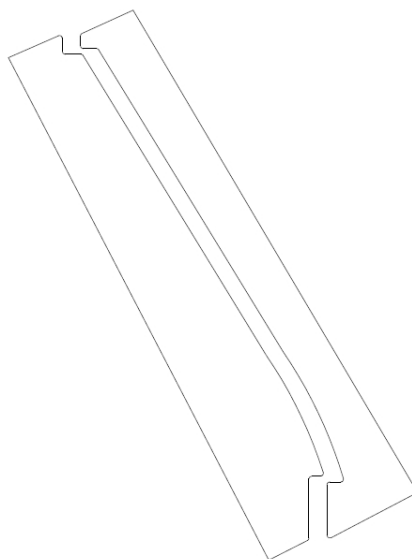
34 pav. Metalinio peilio konstrukcijos modeliavimo programos „ZeMax“ informacinis langas

⁴ ZeMax – programa skirta optinių sistemų modeliavimui.

Sekančiame etape, kaip ir su jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi, modeliuojamos laikančiosios konstrukcijos, kurių modeliavimo pavyzdžiai pateikiami žemiau esančiuose paveiksluose.



35 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) galo šablonai frezavimui



36 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) kraštinės šablonai frezavimui

Atlikus modeliavimus gautas lęšio židinio nuotolis – 160 mm, o plotis – 200 mm. Tai gan nedidelės konstrukcijos koncentratorius, kuris, pagaminus aukštos kokybės lęšį, gali sukonzcentruoti iki 20 „saulių“.

Taip pat buvo projektuojamas ir mažesnių matmenų Frenelio lęšis, kurio tiek fokusavimo atstumas, tiek plotis – 135 mm. Tikėtina, kad mažesnis lęšis turės daug geresnes optines savybes, t.y bus mažiau išbarstomi šviesos spinduliai, sumažės defektų ir kt.

3.1.4. Fotoelementų matricos projektavimas

Tiek parabolinių tiek koncentratoriui su Frenelio lęšiu voltamperinių charakteristikų matavimams bus naudojamos tos pačios fotoelementų juostelės. Žemiau pateikiamos sumodeliuotos fotoelementų matricos.



37 pav. Fotoelementų matrica I paraboliniam koncentratoriui ir koncentratoriui su Frenelio lęšiu (I)



38 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus fotoelementų matrica

Juostelėse prilituoti 9 saulės elementai, kurių bendra išėjimo įtampa lygi 4,5 V. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus elementų matrica susideda iš 32 fotoelementų, kurių išėjime elektrinė įtampa – 16 V.

3.2. MEDŽIAGOS

3.2.1. Poliesterinė derva

Frenelio lęšis pagamintas iš *Polylite 32032-20* bespalvės poliesterinės dervos. Tai optiškai skaidri, netiksotropinė, stabilizuota *UV* spinduliams derva. Taip pat ši derva modifikuota akrilu, pagerinančiu atsparumo savybes išorinės aplinkos poveikiui bei suteikiančiu medžiagai tvirtumo. 3 ir 4 lentelėse pateiktos fizikinės – mechaninės dervos charakteristikos, esant dervai skystame ir kietame būviuose.

3 lentelė. Fizikinės-mechaninės *Polylite 32032-20* dervos skystos būsenos savybės

Savybės	Duomenys	Mat. vnt	Testavimo metodas
Klampos koeficientas	0,4 – 5	Pa·s	ISO 2884-1974
Tankis	1.10±0.02	g/cm ³	ISO 2811-1974
Rūgštingumas (max)	<22	mgKOH/g	ISO 2114-1974
Stireno kiekis	35±2	% nuo svorio	B070
Blyktės temperatūra	32	°C	ASTM D 3278-95
Kietėjimo pradžia: 2 % NORPOL No. 1 (MEKP)	15-25	min.	G024

4 lentelė. Fizikinės-mechaninės dervos kietos būsenos savybės

Savybės	Derva be užpildų	Mat. Vnt	Testavimo metodas
Atsparumas tempimui	55-60	MPa	ISO 527 1/2-1993
Atsparumas smūgiui	6-9	kJ/m ²	ISO 179-1993
Sąlyginis pailgėjimas	1.5-2.0	%	ISO 527 1/2-1993
Atsparumas lenkimui	100	MPa	ISO 178-1993
Lenkimo modulis	4200	MPa	ISO 178-1993
Šiluminė deformacija	65-70	°C	ISO 75 1/2-1993
Kietumas pagal Barcol	40-45	934-1	ASTM D-2583

Kaip matyti 4 lentelėje, derva pasižymi santykinai dideliu atsparumu tempimui ir atsparumu smūgiams.

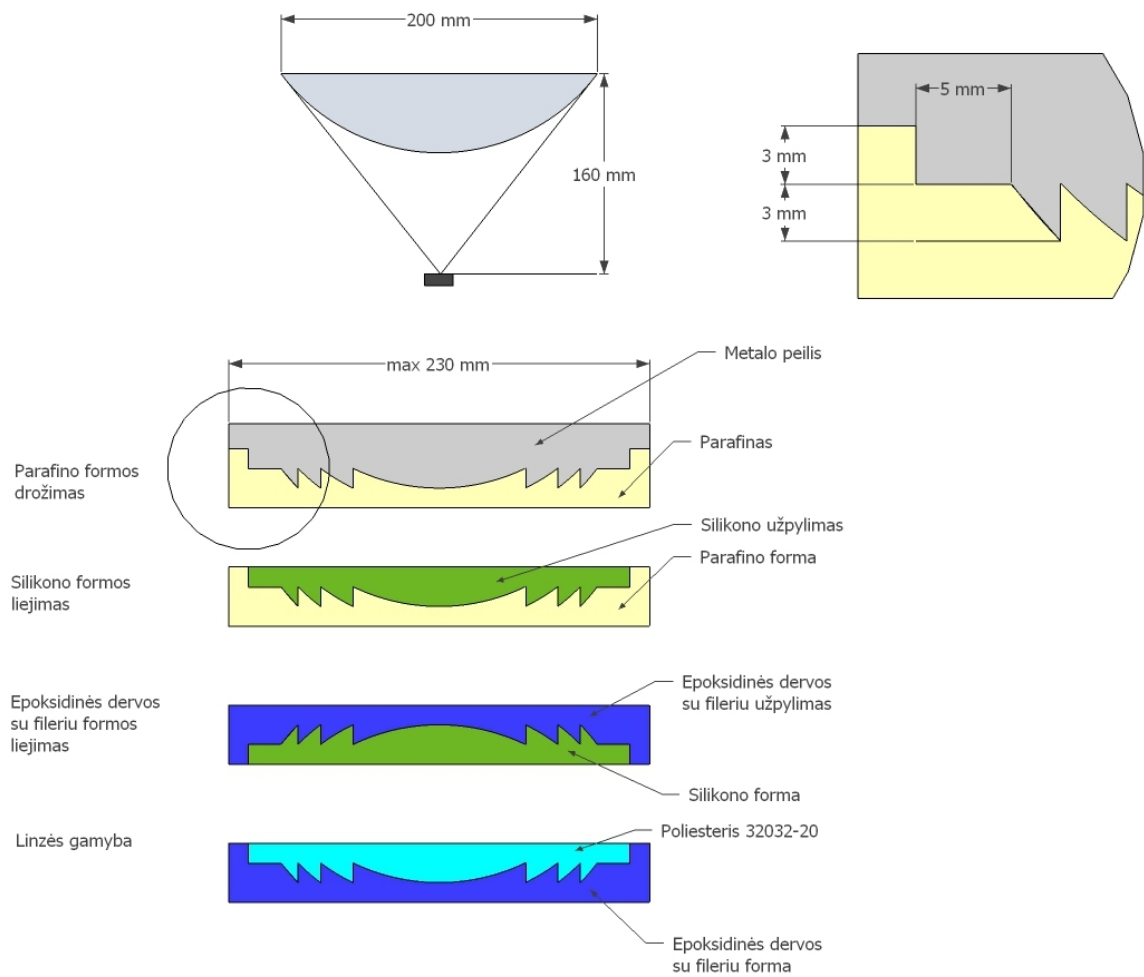
3.2.2. Lęšio gamyboje naudojamos medžiagos

Lęšiui gauti reikia, iš pradžių, pasidaryti formą, ant kurios būtų galima lieti dervą, todėl sudaromas formos gaminimo planas, kuris pateiktas 39 pav.

Formos gamybą, galima suskirstyti etapais:

1. pagaminamas metalinis peilis (34 pav.), idealiai atitinkantis Frenelio lęšį;
2. metaliniu peiliu yra drožiamas parafinas (gaunama parafino forma);
3. ant gautos parafino formos yra užliejamas silikonas (gaunama silikoninė forma);
4. ant silikoninės formos užliejama epoksidinė derva su užpildu (gaunama epoksidė forma);
5. ant epoksidinės formos vakuminiu būdu (naudojant *RTM light* vakuminio formavimo mašiną (44 pav.)) užliejama poliesterinė derva.

Frenelio lęšis gaminamas iš polimerinės medžiagos. Todėl dar viena svarbi charakteristika – polimerinės medžiagos geltonavimo indeksas. Medžiagos geltonavimas pastebimas tik sistemos eksploatacijos eigoje arba koncentratorių eksponuojant ultravioletiniuose spinduliuose (280 – 400 nm) (Miller *et al.* 2010).

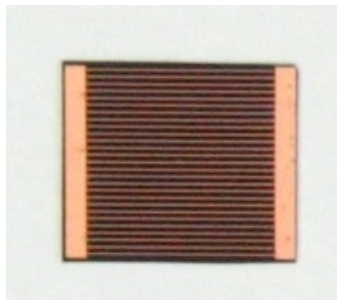


39 pav. Formos gamybos planas

Atlikus visus minėtus procesus, gautas Frenelio lęšis tikrinamas atliekant optinius bei termodinامينius tyrimus.

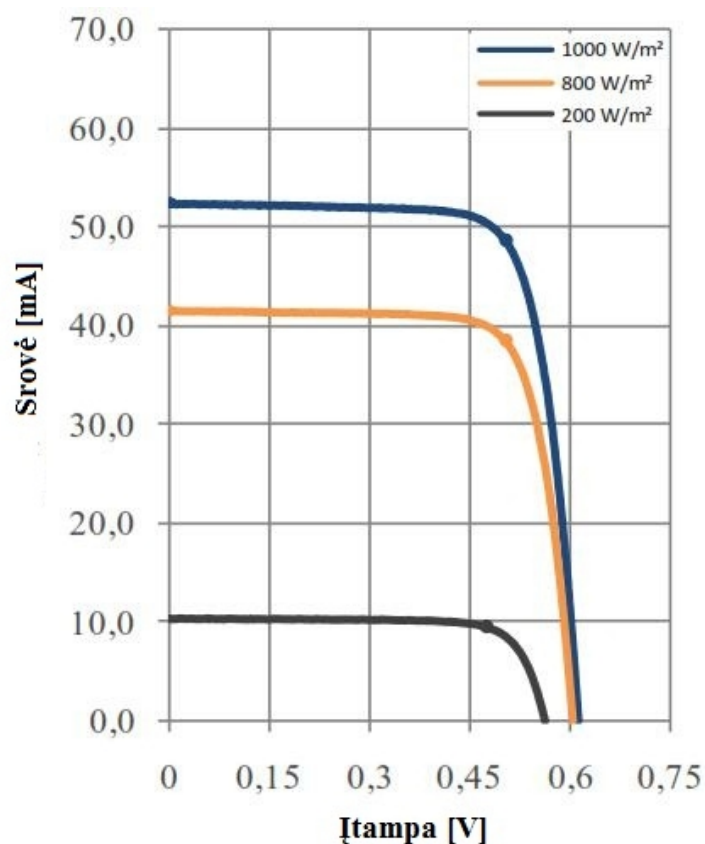
3.2.3. Silicio saulės elementai

Tolimesnėje koncentratoriaus gamyboje panaudoti „Precizika MET SC“ gaminami $12 \times 13 \text{ mm}^2$ ploto saulės elementai (40 pav.).



40 pav. Precizika MET SC saulės elementas

Saulės elementų voltamperinė charakteristika bei voltamperinės charakteristikos parametrai pateikti 41 pav. ir 5 lentelėje.



41 pav. Saulės elemento VACH, esant skirtingai apšvietai

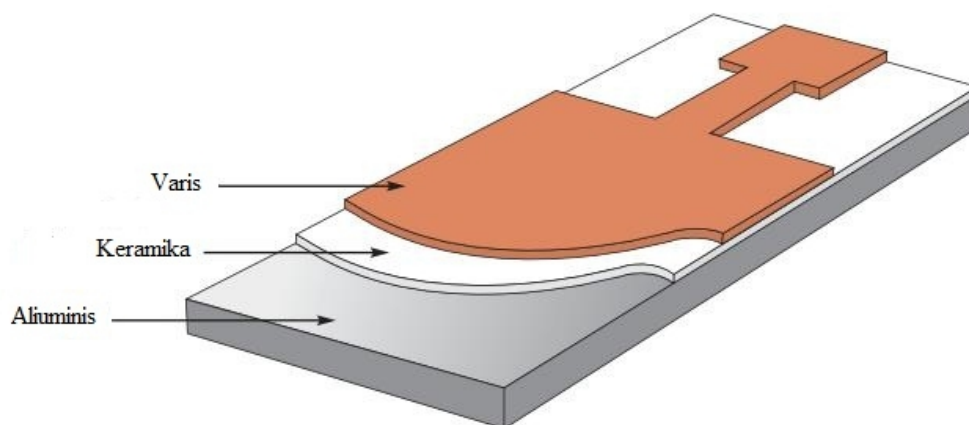
5 lentelė. Elektriniai saulės elemento parametrai

Klasė	P_{mpp} , mW	Efektyvumas, %	V_{mpp} , mV	I_{mpp} , mA	V_{OC} , mV	I_{SC} , mA
15,5	24,1-25,0	15,5-16,0	504	48,2	614	52,2
15	23,4-24,1	15,0-15,5	497	47,8	606	52,1
14,5	22,7-23,4	14,5-15,0	484	47,4	594	51,8
14	21,8-22,7	14,0-14,5	476	46,8	587	51,5
13,5	21,0-21,8	13,5-14,0	471	45,5	584	50,6
13	20,2-21,0	13,0-13,5	468	44,0	593	49,9
12,5	19,5-20,2	12,5-13,0	464	43,1	586	49,3
12	18,7-19,5	12,0-12,5	445	43,0	570	49,6

Kaip matyti 41 pav., tiriamojo saulės elemento voltamperinėse charakteristikose, išmatuotose kambario temperatūroje, įsotinta fotosužadinta elektros srovė pradeda mažėti, elektros įtampai viršijus 0,45 V vertę. Saulės elemento darbo taškas (maksimali galia), įvertinamas maksimalios generuojamos saulės elementu elektrinės įtamos ir maksimalios elektros srovės, tuomet tekančios saulės elementu, stiprio sandauga, priklauso nuo elemento energinės apšvietos.

3.2.4. Fotoelementų matricos pagrindas

Matricos pagrindui naudojama „*ThermalClad*“ firmos, šilumai laidus plokštė (42 pav.), kurios paviršius varinis, viduryje – dielektriko sluoksnis, o apačioje esantis aliuminio sluoksnis – laidus šilumai.



42 pav. Fotoelementų matricos pagrindas

Šis pagrindas reikalingas, tam, kad elementų spinduliuojama šiluma būtų perduodama aušinimo elementui.

3.3. PRIETAISAI

3.3.1 Saulės imitatorius QuickSun 120CA

Tai aukščiausios klasės simulatorius (pagal IEC 904-9 standartą). Pagrindiniai parametrai:

- ksenoninė lempa su AM1.5G filtru;
- +/- 2 % apšvietos vienodumu;
- apšvietos lygis pasirenkamas nuo 200 iki 1200 W/m².



43 pav. Saulės imitatorius *QuickSun 120CA*

Tokiu simulatoriumi galima išmatuoti saulės elemento efektyvumą, šviesai patekus į koncentratorių.

3.3.2. Vakuuminio formavimo mašina RTM light

Vakuuminio formavimo mašina naudojama poliesterinės dervos ant epoksidinės dervos užliejimui, tuo siekiant sumažinti oro burbulų kiekį bei gauti kuo geresnės kokybės Frenelio lęšį.



44 pav. Vakuuminio formavimo mašina *RTM light*

RTM (*Resin Transfer Molding*) – tai žemo slėgio uždaro liejimo procesas, kurio metu derva su katalizatoriumi įšvirkščiamą ant uždaros formos. Atlikus šį procesą, gaunamas galutinis gaminys. RTM procese naudojamą formą galima panaudoti daug kartų.

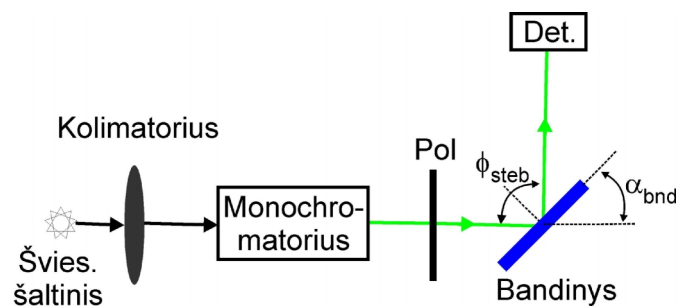
3.4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

3.4.1. Lūžio rodiklio matavimas

Lūžio rodiklis matuojamas dviem būdais. Pirmu atveju matuojamas tiriamo bandinio optinis storis d_{opt} panaudojant optinį mikroskopą ir mikrometrinio postūmio staliuką. Optiniu mikroskopu parenkamas optimalus fokusavimas, kad, žiūrint pro jo okuliarus, matymo laukas būtų ryškiausias. Bandinys dedamas ant staliuko, kurio pagalba bandinio viršutinė arba apatinė plokštumos (paviršius) įvedamos į optinio mikroskopo matymo lauką. Mikrometrinio postūmio staliuko gradacija, padalos vertė $10\ \mu m$, naudojama matuojant bandinio optinį storį. Palyginus bandinio optinį storį su tikruoju, nustatomas lūžio rodiklis:

$$n = \frac{d}{d_{opt}}. \quad (3.1)$$

Bandinio storis d matuojamas su slankmačiu, padalos vertė $10\ \mu m$. Optinis bandinio storis matuojamas naudojant skirtingos spalvos (bangos ilgis λ , nm) apšvietimą: balta šviesa (baltos šviesos diodas), 486 nm, 589 nm, 551 nm, 656 nm. Spalvinis apšvietimas keičiamas juostinių filtrų pagalba, kurių pralaidumo juostos plotis 8 nm.



45 pav. Briusterio kampo matavimo schema

Antrasis būdas – matuojamas Briusterio kampas. Matavimo schema parodyta 45 pav. Į bandinį krenta monochromatinė (skiriamoji geba apie $1,5\ nm$) poliarizuota šviesa, kurios elektrinio

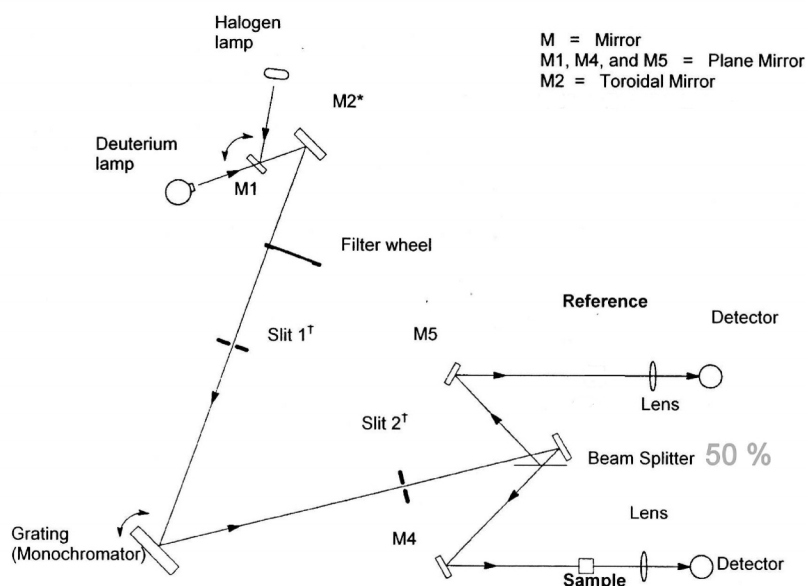
vektoriaus svyravimai statmeni kritimo plokštumai ("p" tipo poliarizacija). Esant fiksuotam kritimo kampui α_{bnd} , išmatuojamas atspindžio kampas $\phi_{steb}/2$. Keičiant α_{bnd} , išmatuojama tiriamojo bandinio atspindžio charakteristika "p" poliarizacijos šviesai. Iš šios kreivės surandamas stebėjimo kampas, ties kuriuo tiramojo bandinio atspindys mažiausias. Lūžio rodiklis skaičiuojamas iš formulės:

$$n = \tan\left(\frac{\phi_{min}^{steb}}{2}\right). \quad (3.2)$$

Lūžio rodiklis matuojamas su ne didesne kaip 3 proc. paklaida. Šią paklaidą pagrindinai lemia bandinio nehomogeniškumas.

3.4.2. Optinio pralaidumo tyrimas

Bandinių optinio pralaidumo matavimai atlikti su spektrometru „*Lambda 35 UV/VIS*“, kurio matavimo schema pavaizduota žemiau (46 pav.).



46 pav. Optinio pralaidumo matavimo schema

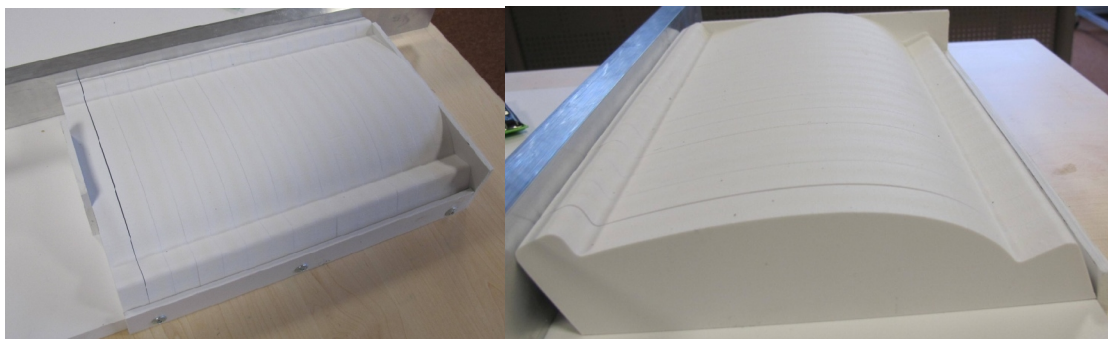
Iš šviesos šaltinio (halogeninė arba deuterio lempos) spindulys nukreipiamas į monochromatorių, sudarytą iš įėjimo (*Slit 1*) ir išėjimo (*Slit 2*) plyšio bei difrakcinės gardelės (*Grating*). Monochromatoriaus paskirtis yra išrinkti vieną bangos ilgį, prie kurio bus matuojamas pralaidumas. Praėjęs monochromatorių spindulys šviesos daliklio (*Beam Splitter*) pagalba padalijamas į du, kurių vienas nukreipiamas į taip vadinamą atraminį kanalą (*Reference*), o kitas – į bandinio kanalą (*Sample*). Abu kanalai yra identiški, juose įmontuoti detektoriai registruoja šviesos intensyvumą. Šviesos pluoštelis bandinio kanale yra maždaug stačiakampio $1,0 \times 7,5 \text{ mm}^2$ ploto

formos. Pirmiausia tyrimas atliekamas be bandinio, išmatuojant kritinę spinduliuotę, o vėliau – su bandiniu, įvertinant optinį pralaidumą (T). Spektrometro paklaida mažesnė nei 1 proc.

4. PROTOTIPŲ GAMYBA

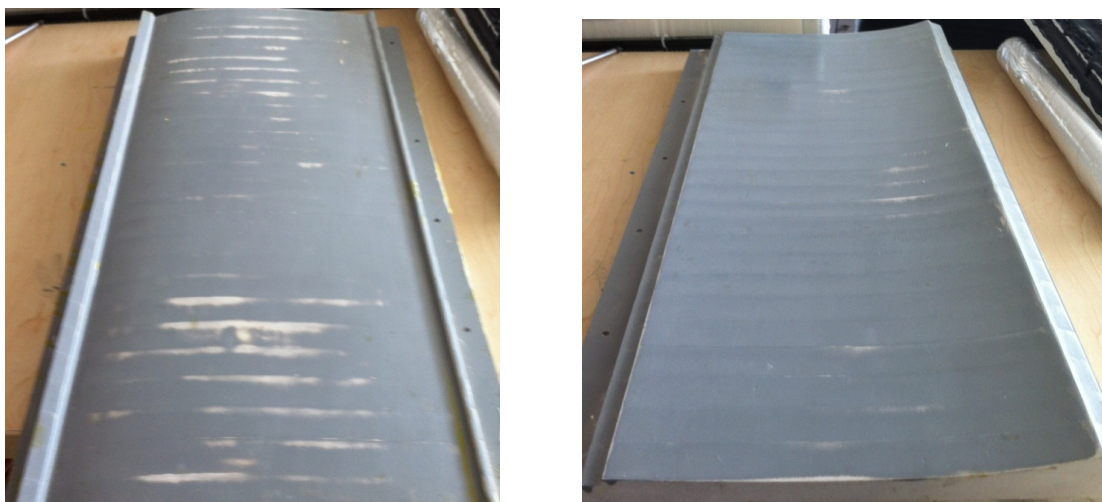
4.1. JUNG TINIO PARABOLINIO KONCENTRATORIAUS GAMYBA

Kaip jau buvo minėta 3.1.2 skyriuje, sumodeliuotos kraštinės ir galai, iš kurių frezuojamos nedidelės formos, suklijuojamos į ilgą formą. Siekiant užlyginti nelygumus formos glaistomos ir šlifuojamos keletą kartų, taip užtikrinant geometrinį tikslumą. Tokios formos pavyzdys pateikiamas 47 pav. Tokia pat technologija naudojama abiejų tipų jungtinių parabolinių koncentratorių šoninėms sienelėms gaminti.



47 pav. Formų ruošimas kraštinės gamybai

48 paveiksle pateikiamos II jungtinio parabolinio koncentratoriaus užglaistytos ir nušlifuotos formos, ant kurių toliau bus formuojamos šoninės konstrukcijos.



48 pav. Jungtinio parabolinio koncentratoriaus II prototipo formos šoninėms sienelėms formuoti

Sekančiame gamybos etape vakuuminiu būdu, naudojant „RTM light“ vakuuminio formavimo mašiną (44 pav.), formuojamos koncentratoriaus kraštinės, naudojant demblį, audinį bei epoksidinę dervą „Araldite LY 3505“.. Ši derva naudojama kartu su kietikliu „XB 3404“. Dervos ir kietiklio techniniai duomenys pateikti 2 priede.

Šoninės kraštinės formuojamos naudojant demblį ir audinį, kurie padengiami epoksidine derva. Dengimas vyksta ant 48 pav. pavaizduotos formos, paklojant audinį, tada 2-3 sluoksnius demblio, gale dedamas dar vienas audinio sluoksnis. Viskas kišama į vakuuminį maišą, įjungiamas vakuumas, kai pasiekiamas reikiamas vakuumo lygis pradedama leisti epoksidinę dervą. Tokiu pat būdu formuojamos kitos sienelės. Po 12 val. formos nuimamos, gaunama koncentratoriaus šoninė sienelė, kuri pavaizduota 49 pav.



49 pav. I jungtinio parabolinio koncentratoriaus kraštinė sienelė

Ant pagamintos sienelės užkljuojamas šviesą atspindintis sluoksnis (50 pav.)



50 pav. Šoninė sienelė su šviesą atspindinčiu sluoksniu



51 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipo šoninė sienelė

Jungtinių parabolinių koncentratorių galai gaminami naudojant dvikomponentę poliuretaninę dervą „*RenCast FC 52 Isocyanate / FC 52 Polyol*“, kurios aprašymas pateiktas 3 priede. Derva gali būti naudojama su užpildu, kuris suteikia jai tvirtumo, be to – sumažinama gaminio kaina.

Gaminant galus, iš frezuotų formų pagaminama forma silikonui lieti. Iš silikonu pagaminta forma toliau naudojama galų gamybai. Žemiau pavaizduotuose paveiksluose pateikiamos silikoninės formos (abiejų prototipų) ir jau išlieti galai, kurie naudojami kaip koncentratoriaus pagrindinės laikančiosios konstrukcijos. Naudojamas „Milar MM 922“ silikonas, kurio techniniai duomenys pateikti 4 priede.

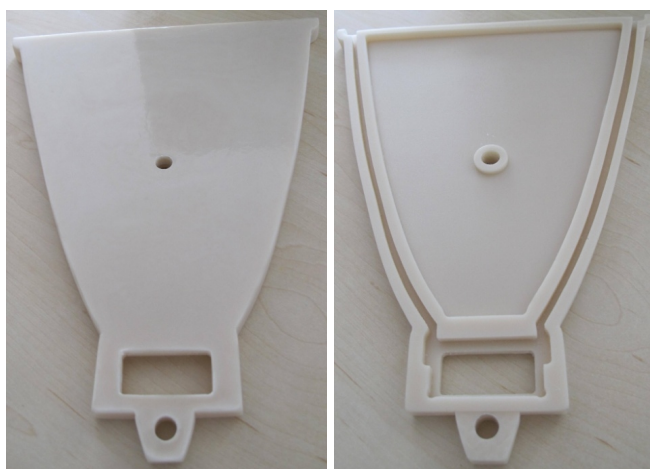


52 pav. Formos (II jungtinio parabolinio koncentratoriaus), ant kurių liejamas silikonas



53 pav. Silikoninės formos (II jungtinio parabolinio koncentratoriaus)

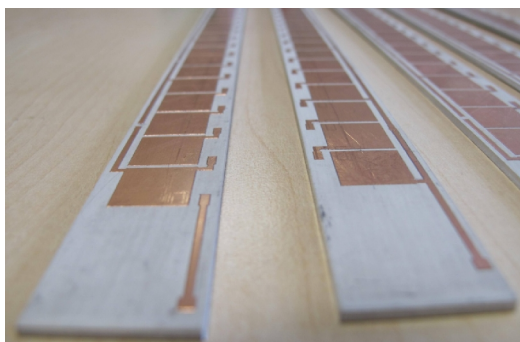
Ant 53 pav. pavaizduotų silikoninių formų liejama poliuretaninė derva. Gauti produktai pavaizduoti 54 pav.



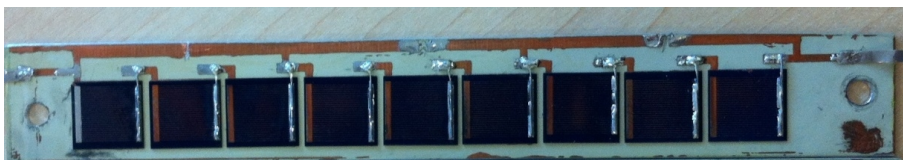
54 pav. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus galinės laikančiosios konstrukcijos

Turint pagamintas šonines kraštines ir galus, toliau gaminama fotoelementų matrica. Šios matricos gamyboje, kaip jau buvo minėta, naudojama „*Thermal Clad*“ medžiaga.

55 pav. pateikta iš „*Thermal Clad*“ medžiagos išfrezuotos juostelės, ant kurios lituojami „*Precizka MET SC*“ gaminami elementai. Šių elementų techninės charakteristikos pateiktos 3.2.3 skyriuje.



55 pav. Išfrezuotos fotoelementų juostelės

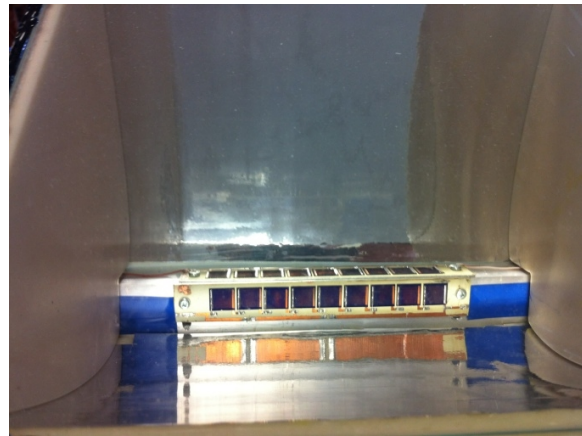
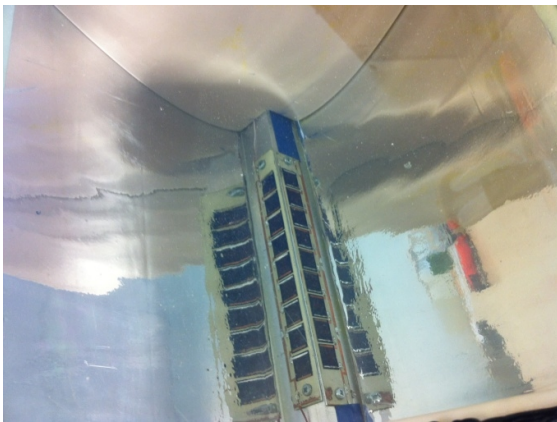


56 pav. Fotoelementų juostelė su prilituotais elementais (I jungtinio parabolinio ir koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) prototipų testavimui)



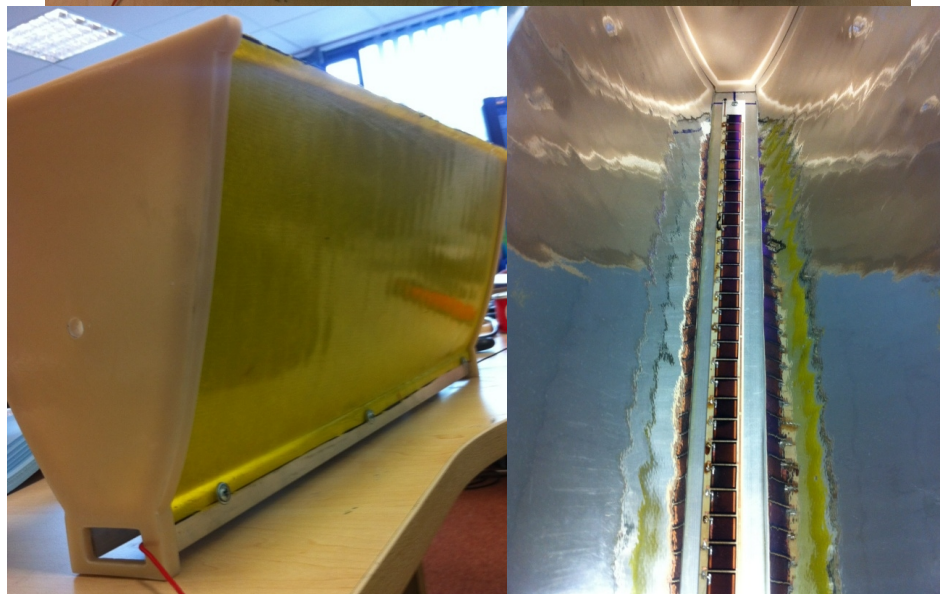
57 pav. Fotoelementų juostelės su prilituotais elementais (II jungtinio parabolinio koncentratoriaus testavimui)

Toliau surenkami koncentratoriaus prototipai, su kuriais bus atliekami voltamperinių ir voltvatinių charakteristikų matavimai bei nustatomas koncentracijos laipsnis. Surinkti prototipai pavaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose.



58 pav. I surinktas jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipas

Pagaminto I jungtinio parabolinio koncentratoriaus matmenys: 243mm x 215mm x 150mm (aukštis). Svoris – 0,945 kg.



59 pav. II surinktas jungtinio parabolinio koncentratoriaus prototipas

Pagaminto II jungtinio parabolinio koncentratoriaus matmenys: 518x188x215 mm³. Svoris – 2,384 kg.

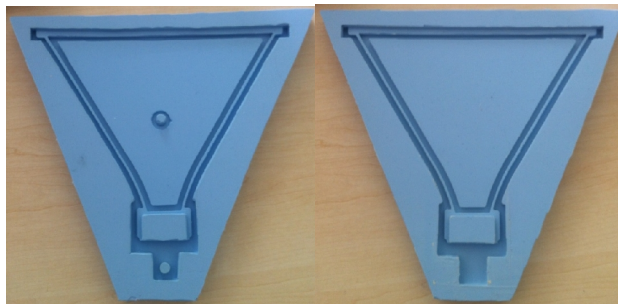
4.2. KONCENTRATORIAUS SU FRENELIO LĘŠIU PROTOTIPO GAMYBA

Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu prototipo kraštinės sienelės ir galai projektuoti ir gaminti tokiu pat principu, kaip ir jungtinio parabolinio koncentratoriaus. Sunkiausias uždavinys – suprojektuoti Frenelio lęšį ir pagaminti jį itin geros kokybės. Šiame skyriuje detalai aprašomas lęšio gamybos procesas.

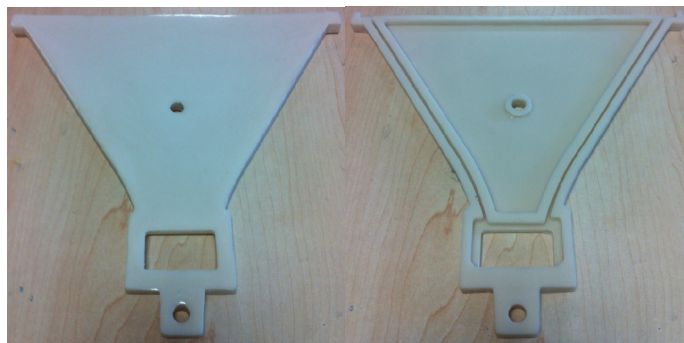
60 pav. pateiktos galų formos, ant kurių liejamas silikonas. Sekančiuose paveiksluose pavaizduotos gautos silikoninės formos (61 pav.) ir koncentratoriaus galinės laikančiosios konstrukcijos (62 pav.).



60 pav. Formos (koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I)), ant kurių liejamas silikonas



61 pav. Silikoninės formos (koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I))

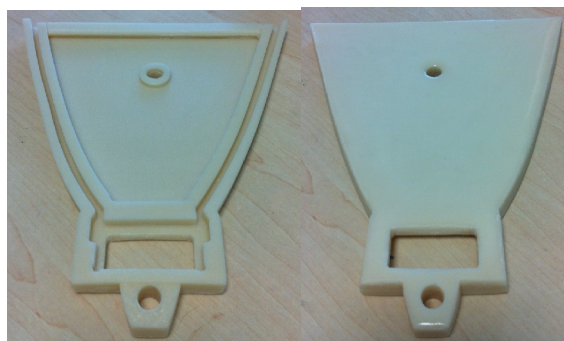


62 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) galinės laikančiosios konstrukcijos

Siauresniojo koncentratoriaus su Frenelio lęšiu galams gaminti panaudotos II jungtinio parabolinio koncentratoriaus laikančiosios konstrukcijos. Kaip jau buvo minėta anksčiau, jei kokybiškai pagamintas Frenelio lęšis, tai šoninės sienelės nebūtinai turi turėti reflektorių. Žemiau pateikiamos formos, naudojamos prototipo galų gamybai.

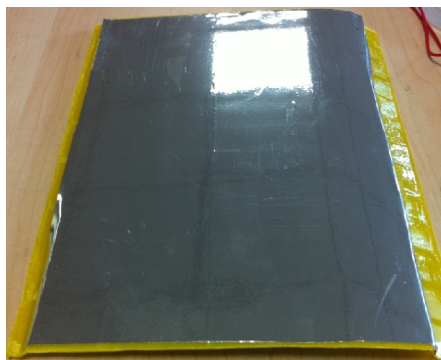


63 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) formos galų gamybai



64 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) prototipo galai

Toliau tokiu pat principu, kaip ir 4.1 skyriuje, gaminamos hiperbolės formos šoninės kraštinės (65 pav.).



65 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) šoninė sienelė

Frenelio lęšio gamybai būtina tinkama, aukštos kokybės forma, ant kurios liejama poliesterinė derva „Polylite 32032-20“, kurios duomenys yra pateikti 5 priede. Formos gamybos planas pateiktas 39 pav.

Metaliniai peiliai pavaizduoti 66 pav. Viršuje – Frenelio lęšį atitinkantis peilis, apačioje – lęšio negatyvas. Padaryti abu tam, kad esant galimiems nesklandumams, gaminant formą, būtų galima atsisakyti kurio nors etapo ar pridėti dar vieną, papildomą.

Parafino drožimui buvo sumontuotos staklės (67 pav.). Staklės leidžia išlaikyti tiesiaieigį judesį bei, drožiant, neleidžia nukrypimų į šonus, kas įgalina gauti itin kokybišką parafino formą (68 pav.).

Sekančiame etape ant parafino formos užliejamas silikonas (69 pav.).



66 pav. Metaliniai peiliai



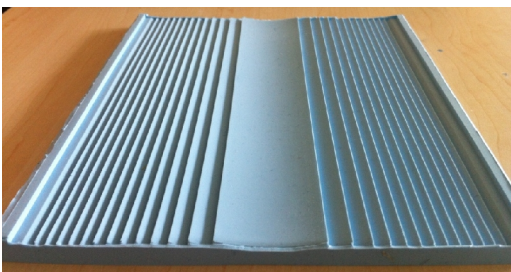
67 pav. Parafino drožimo staklės



68 pav. Parafino forma



69 pav. Silikono užliejimas



70 pav. Frenelio lęšio silikoninė forma



71 pav. Frenelio lęšio epoksidinės dervos forma



72 pav. Išlietas Frenelio lęšis

Gaminant Frenelio lęšį susidurta su tokiomis problemomis:

- poliesterinė derva prilimpa prie epoksidės dervos formos, todėl sudėtinga nuimti nepažeistą lęšį;
- gautas lęšis ne skaidrus;
- dėl didelio lęšio pločio susidarydavo oro tarpų, kurie sklaido krintančią šviesą.

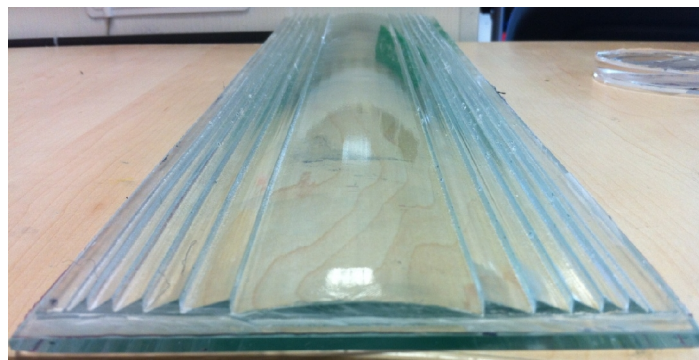
Sprendžiant prilipimo problemą, epoksidinės dervos forma papildomai nupoliruojama ir padengiama specialiomis medžiagomis, pagerinančiomis formos nuėmimą. Šios medžiagos pagerino formos nuėmimą, tačiau negautas norimas rezultatas. Išbandomas kitas variantas – liejant patį lęšį į poliesterinės dervos sudėtį įpilama skysto vaško. Tai žymiai pagerino formos nuėmimą, tačiau lęšis tapo miglotas, kas dar labiau sklaido krintančią šviesą. Šis būdas nepasiteisino, todėl toliau buvo ieškoma kitokių problemos sprendimo būdų.

Atsisakyta vieno formos gamybos etapo, nebenaudojama epoksidinė derva. Naujame lęšio gamybos etape poliesterinė derva liejama tiesiai ant silikono. Kadangi silikonas lankstus, lęšis lengvai nuimamas. Tačiau oro tarpų visiškai panaikinti nepavyko. Todėl gaminamas siauresnis Frenelio lęšis, tuo tikimasi išvengti oro tarpų susidarymo bei sumažėjusios koncentratoriaus konstrukcijos kainos. Didesnio pločio Frenelio lęšio koncentracijos laipsnis – 20 „saulių“, mažo – 10 „saulių“. Atlikus elektrinių savybių tyrimus, galima įvertinti, kurį lęšį gaminti tikslingiau.

Mažesnio pločio Frenelio lęšis ilgesnis, todėl jo sutvirtinimui naudojamas stiklas. Poliesterinė derva užliejama ant stiklo, taip gaunamas tvirtas lęšis. Frenelio lęšis, užlietas ant stiklo, pateiktas 73 pav.

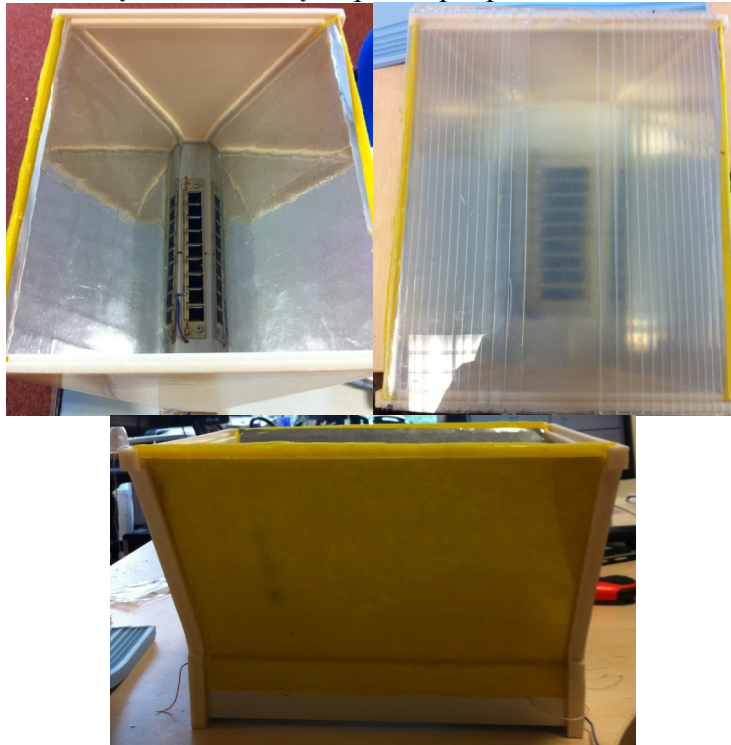
Pagaminto I koncentratoriaus su Frenelio lęšiu matmenys: 264x224x198 mm³ (aukštis). Frenelio lęšio matmenys: 260x210x5 mm³ (storis). Prototipo masė – 1,170 kg.

Pagaminto II koncentratoriaus su Frenelio lęšiu matmenys: 149x514x154mm³ (aukštis). Frenelio lęšio matmenys: 500x137x10 mm³ (storis). Prototipo masė – 1,755 kg.

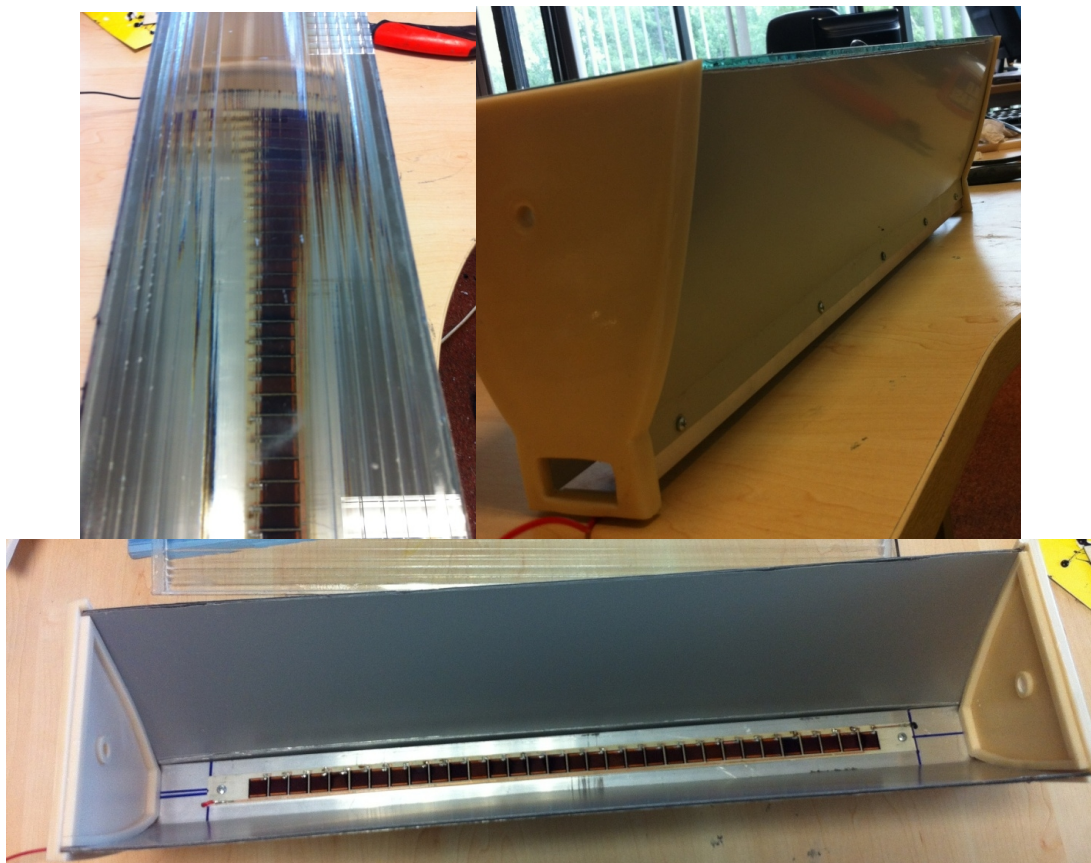


73 pav. Frenelio lęšis, užlietas ant stiklo

Surinktų koncentratorių su Frenelio lęšiu prototipai pateikti žemiau esančiuose paveiksluose.



74 pav. Koncentratoriaus su Frenelio (I) lęšiu prototipas



75 pav. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) prototipas

5. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

5.1. POLIESTERINĖS DERVOS LŪŽIO RODIKLIO MATAVIMAS

Pagal 3.4.1. skyriuje aprašytą metodiką atliekamas poliesterinės dervos lūžio rodiklio matavimas.

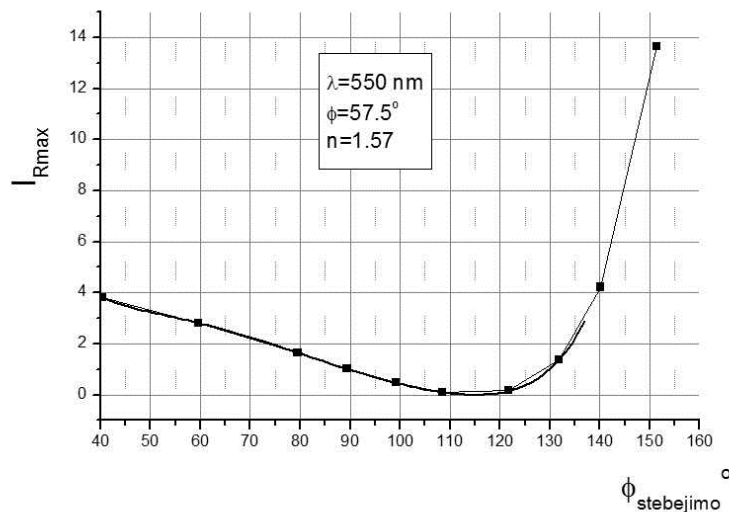
Bandiniai: skaidrūs, storis $d = 3,9$ mm, viršutinis ir apatinis paviršius yra lygūs. 2 pr – bandinys, turintis 2 proc. kietiklio (metiletilketono – MEK), 4 pr – bandinys, turintis 4 proc. kietiklio.

6 lentelėje apibendrintos pirmuoju metodu išmatuotos skirtingų bandinių bei stiklo (matavimų patikimumui patikrinti) lūžio rodiklių vertės panaudojant skirtingos spalvos apšvietimą.

6 Lentelė. Tirtų bandinių lūžio rodikliai

Spalva	2 pr	4 pr	Stiklas
Balta šviesa	1,57	1,63	1,52
$\lambda=486$ nm	1,56	1,59	-
$\lambda=551$ nm	1,55	1,63	-
$\lambda=589$ nm	1,57	1,63	-
$\lambda=656$ nm	1,60	1,60	-

Briusterio kampo matavimo rezultatai parodyti 76 pav. Iš eksperimentinių rezultatų seka, kad tirto bandinio Briusterio kampas yra apie $57,5^\circ$, o lūžio rodiklis 1,57.



76 pav. Atspindžio priklausomybė nuo kritimo kampo, naudojant 550 nm bangos ilgio šviesą

Gautas lūžio rodiklis artimas stiklo lūžio rodikliui. Todėl poliesterinę dervą galima naudoti Frenelio lęšio gamybai.

5.2. POLIESTERINĖS DERVOS OPTINIO PRALAIIDUMO TYRIMAS

Pagal 3.4.2 skyriuje aprašytą metodiką atliekamas poliesterinės dervos optinio pralaidumo tyrimas.

Buvo tiriamas dviejų bandinių – dervų – optinis pralaidumas. Tyrimuose naudotų bandinių geometrinių matmenys $110 \times 110 \text{ mm}^2$. Bandinių pavadinimas buvo sutrumpintas:

2 pr – bandinys pažymėtas kaip 2%.

4 pr – bandinys pažymėtas kaip 4%.

Pradžioje matavimų atliekamas spektrometro kalibravimas nenaudojant bandinio. Tam, išmatuojami signalai visame spektrų intervale abiejuose kanaluose vienu metu ir nustatomas atraminio bei bandinio kanalų nevienodumas. Vėliau, į bandinio kanalą įdedamas bandinys ir matuojamas šviesos intensyvumas atraminiam ir bandinio kanaluose kiekviename spektro taške. Bandinio pralaidumas (*angl.*- Transmittance, T) yra santykis signalų, kurie matuojami bandinio ir atraminiam kanaluose.

Spektrometro nuostačiai, naudoti tiriant bandinių pralaidumą, yra apibendrinti 7 lentelėje.

7 lentelė. Spektrometro nuostačiai

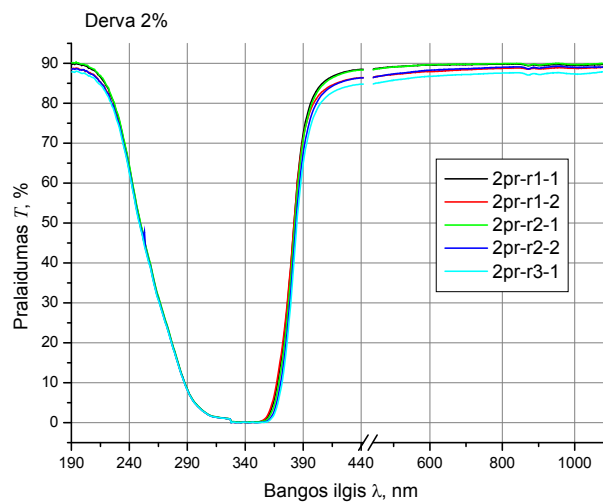
Spektrometro 'Lambda 35 UV/VIS' nustatymai	Dydis	Matavimo vnt.
Didžiausias bangos ilgis	1100	nm
Mažiausias bangos ilgis	190	nm
Matavimo žingsnis	1	nm
Taškų skaičius	911	
Stačiakampio formos šviesos dėmės dydis	1,0 x 7,5	mm ²

Kadangi abu bandiniai daug didesni, lyginant su naudojamu šviesos pluošto matmenimis, buvo nuspręsta atlikti pralaidumo matavimus keliuose to paties bandinio vietose. Vietos pasirinktos atsitiktinai ir apytiksliai pažymėtos ant kiekvienos plokštelės. Visi žymėjimai - sąlyginiai. Jų apibendrinimas pateiktas 8 lentelėje.

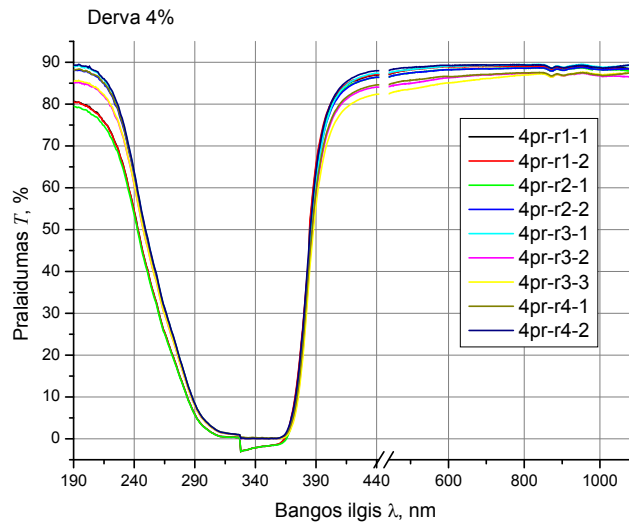
8 lentelė. Bandinių žymenys

Bandinys	Matavimo vietos žymėjimas	Paiškinimas
2 %	2pr-r1-1	Nuo 1-osios briaunos arčiau centro
	2pr-r1-2	Nuo 1-osios briaunos arčiau krašto
	2pr-r2-1	Nuo 2-osios briaunos arčiau centro
	2pr-r2-2	Nuo 2-osios briaunos arčiau krašto
	2pr-r3-1	Nuo 3-osios briaunos arčiau centro
4 %	4pr-r1-1	Nuo 1-osios briaunos arčiau centro
	4pr-r1-2	Nuo 1-osios briaunos arčiau krašto
	4pr-r2-1	Nuo 2-osios briaunos arčiau centro
	4pr-r2-2	Nuo 2-osios briaunos arčiau krašto
	4pr-r3-1	Nuo 3-osios briaunos centre
	4pr-r3-2	Nuo 3-osios briaunos arčiau krašto
	4pr-r3-3	Nuo 3-osios briaunos prie krašto
	4pr-r4-1	Nuo 4-osios briaunos arčiau centro
	4pr-r4-2	Nuo 4-osios briaunos arčiau krašto

Išmatuotas optinis pralaidumas keliuose atsitiktinai pasirinktose bandinio vietose parodytas atskiruose grafikuose (77-78 pav.).

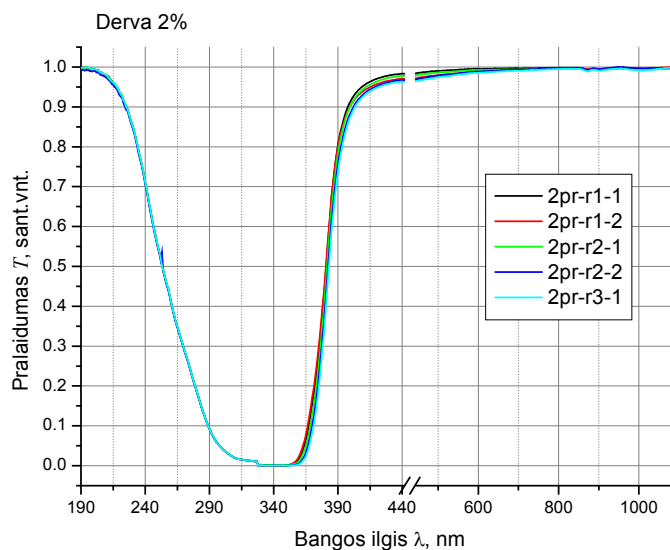


77 pav. Bandinio 2 pr optinis pralaidumas

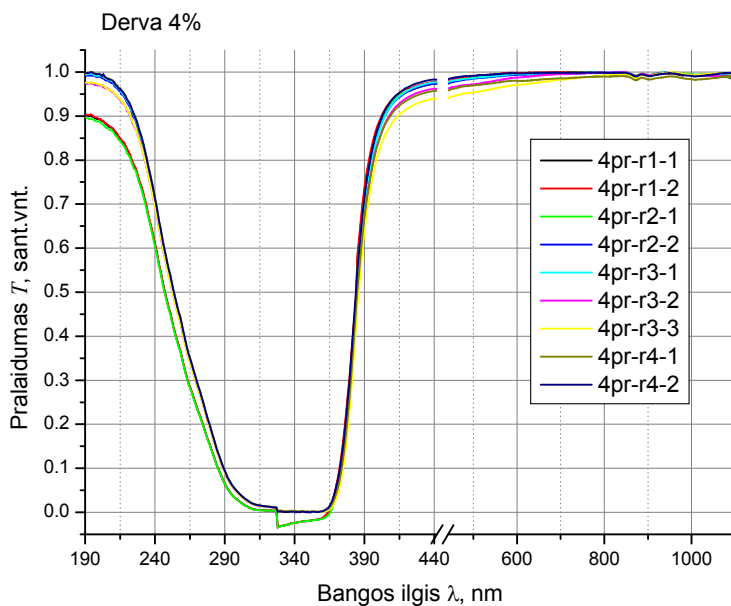


78 pav. Bandinio 4 pr optinis pralaidumas

Bandinio 2 pr minimalus optinis pralaidumas $T < 5$ proc. (t.y. didžiausia optinė sugertis) stebimas ultravioletinių bangų ilgių ruože $298 \text{ nm} < \lambda < 365 \text{ nm}$. Maksimalus optinis pralaidumas (80 – 90 proc.) stebimas bangų ilgių ruože nuo 400 iki 1100 nm, o taip pat ruože $\lambda < 210 \text{ nm}$. Pastebėtina, jog optinis pralaidumas nedaug tesiskiria skirtingose plokštelės vietose. Skirtumus galima būtų susieti su nevienodu dervos skaidrumu įvairiose bandinio vietose, sąlygojančiu nevienodą šviesos sklaidą arba matavimo paklaidomis, atsiradusiomis dėl netikslios bandinio orientacijos, atžvilgiu kritusios šviesos. Didžiausias rezultatų išsibarstymas pastebimas 4 pr bandiniui. Siekiant išryškinti spektrinius ypatumus, atliktas kiekvieno bandinio optinio pralaidumo spektro sunormavimas į didžiausią spektre pralaidumo vertę. Gauti rezultatai parodyti 79 – 80 pav.



79 pav. Bandinio 2 pr optinis sunormuotas pralaidumas



80 pav. Bandinio 4 pr optinis sunormuotas pralaidumas

Matyti, kad spektrų normavimo procedūra sumažino rezultatų išsibarstymą 2 pr bandiniui, visame bangų ilgių ruože. Šiam bandiniui buvusi rezultatų absoliučioje skalėje sklaida nuo maždaug 3 – 4% sumažėjo iki procento dalių. Tačiau, 4pr bandinio spektrų sunormavimas rodo, kad rezultatų

sklaida sumažėja tik raudonojoje spektro srityje (nuo 5 – 6 proc. iki maždaug 3 proc. imant spektro ruožą $\lambda > 600$ nm), o esant $\lambda < 600$ nm spektro ruože rezultatų išsibarstymas praktiškai nepasikeičia. 4 pr bandinys labiau šviesą sklaidantis (nehomogeniškas), lyginant jį su 2 pr bandiniu.

Išmatuotas 2 pr ir 4 pr bandinių optinis pralaidumas atsitiktinai pasirinktose vietose. Gauta, kad abiejų bandinių pralaidumo spektrai panašūs. Didžiausias optinis pralaidumas (iki 80-90 proc.) bandinių stebimas bangų ilgių ruože nuo 400 nm iki 1100 nm (maksimalus tyrinėtas bangos ilgis). Spektro ruože nuo 240 nm iki 390 nm optinis pralaidumas mažas (mažiau nei 65 proc.), o 320-360 nm ruože bandiniai šviesos praktiškai nepraleidžia. Bandinių pralaidumas vėl išauga iki maždaug 90 proc. trumpesnių bangų ruože, t.y. $\lambda < 210$ nm.

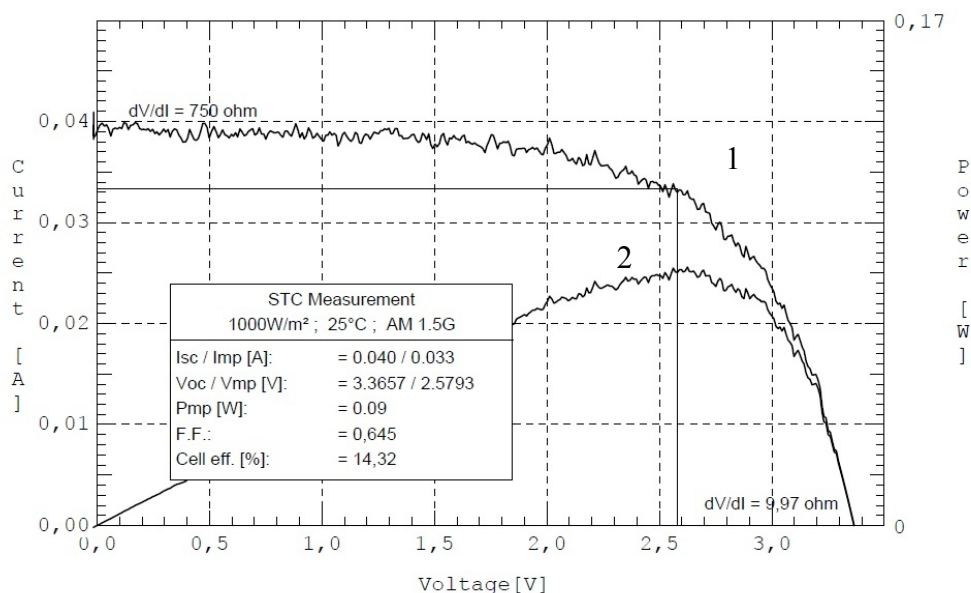
Palyginus vieno ir to paties bandinio skirtingų vietų optinio pralaidumo tyrimo rezultatus nustatyta, kad 2 pr bandinys šviesą sklaido mažiau lyginant su 4 pr bandiniu.

5.3. PROTOTIPŲ ELEKTRINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

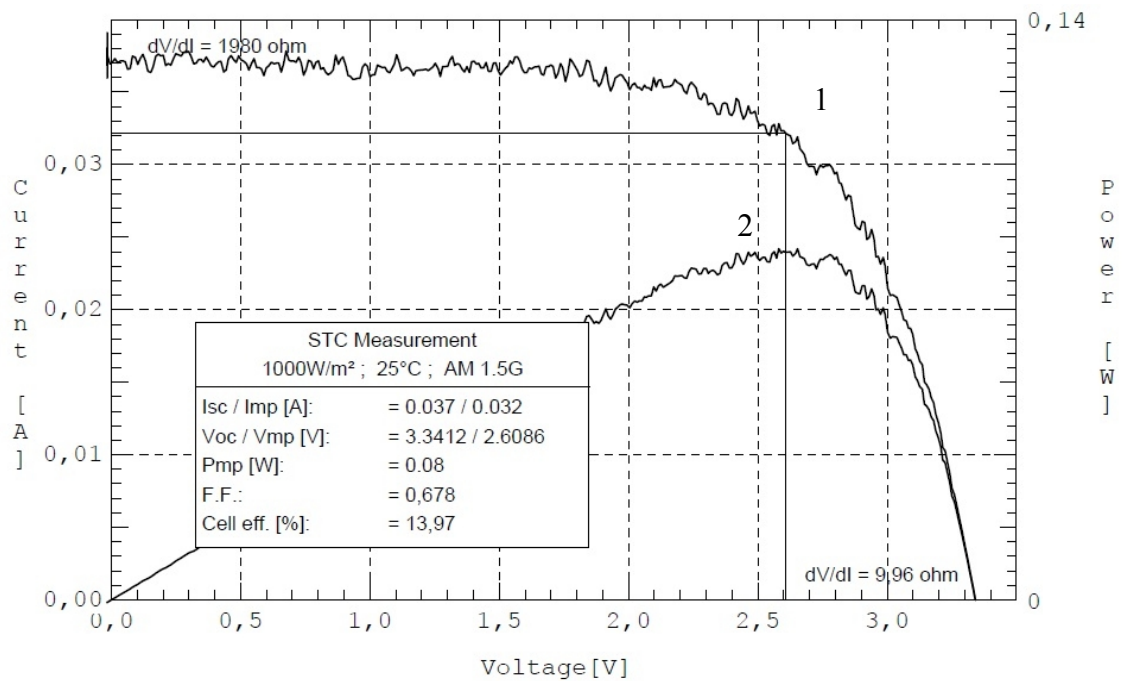
Prototipų elektrinės voltamperinės charakteristikos matuotos saulės imitatoriumi „QuickSun 120CA“ (43 pav.)

5.3.1. Jungtinių parabolinių koncentratorių prototipų elektrinių savybių tyrimas

Iš pradžių matuojamos fotoelementų matricos (37, 56 pav.) be koncentratoriaus voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos, kurios pateikiamos 81-83 pav.

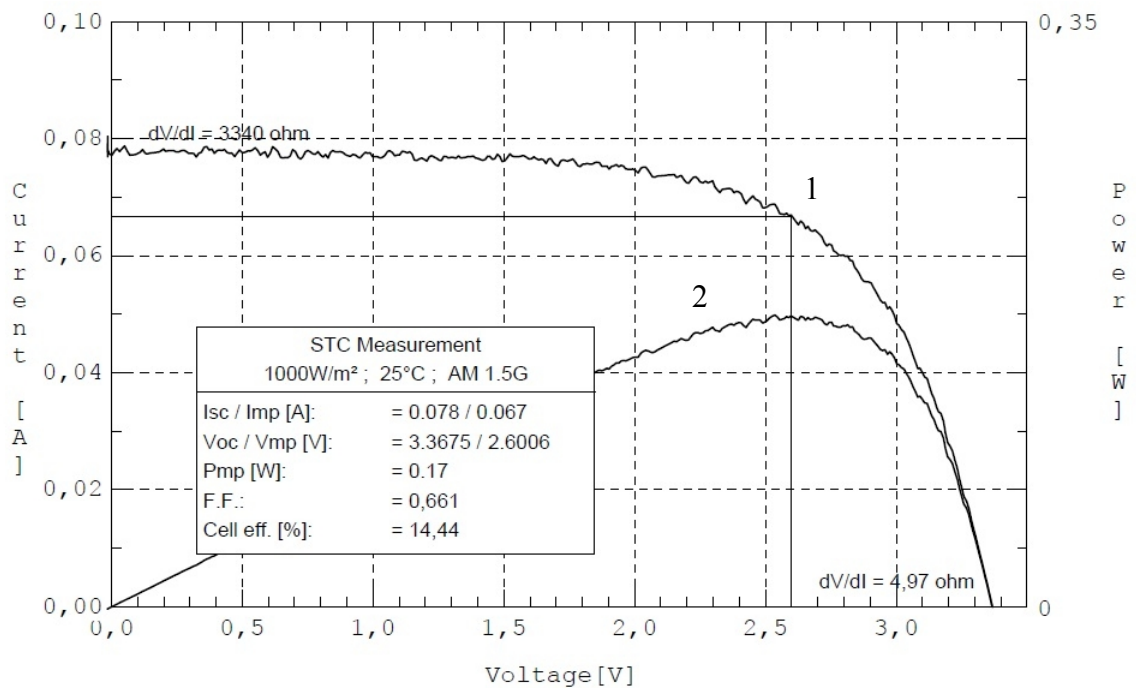


81 pav. 1 – osios fotoelementų matricos (56 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos



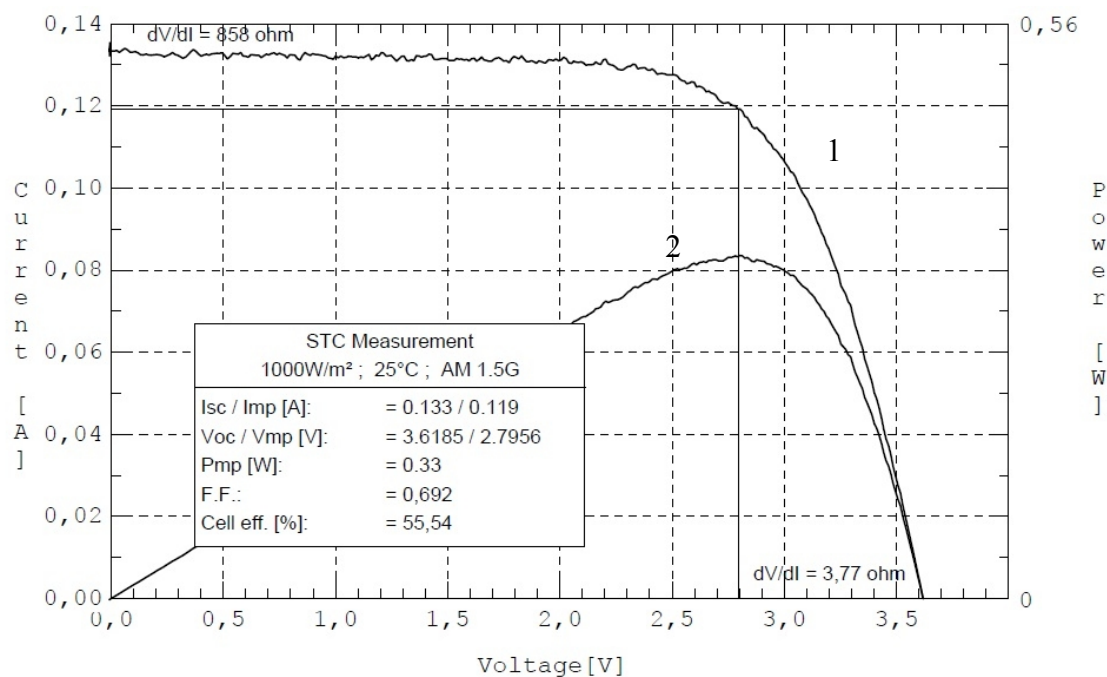
82 pav. 2 – osios fotoelementų matricos voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

83 pav. pateikta lygiagrečiai sujungtų abiejų juostelių (58 pav., nenaudojamas koncentratorius) voltamperinė ir voltvatinė charakteristikos.

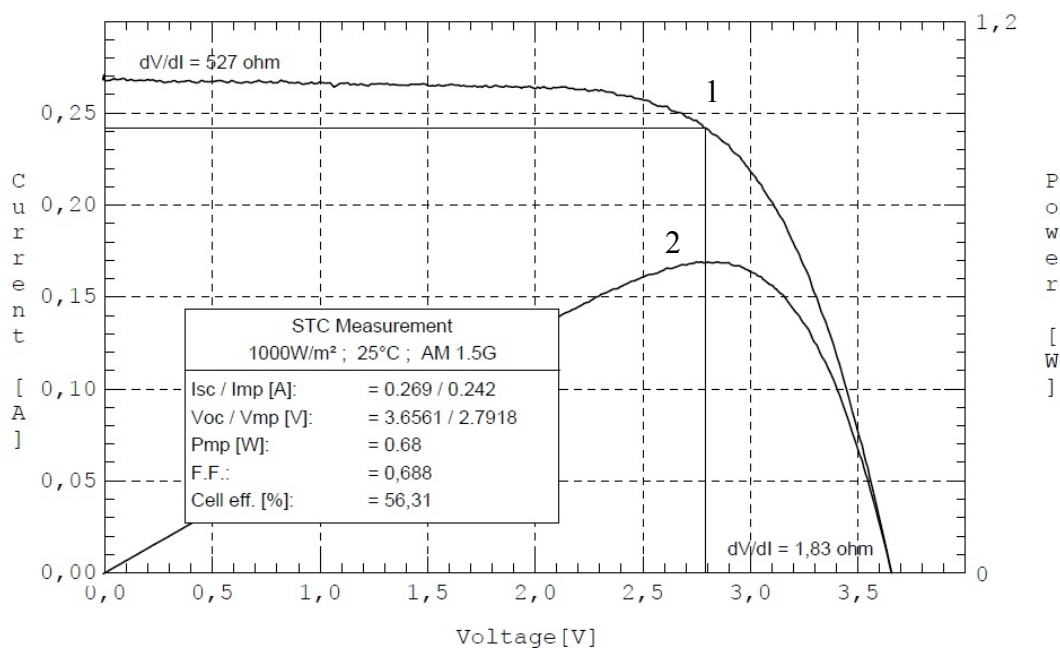


83 pav. Lygiagrečiai sujungtų dviejų fotoelementų matricų (58 apv.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

Tokios pat charakteristikos matuojamos su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi (84-85 pav.).



84 pav. Fotoelementų matricos (56 pav.) su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos



85 pav. Lygiagrečiai sujungtų fotoelementų matricų (58 pav.) su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

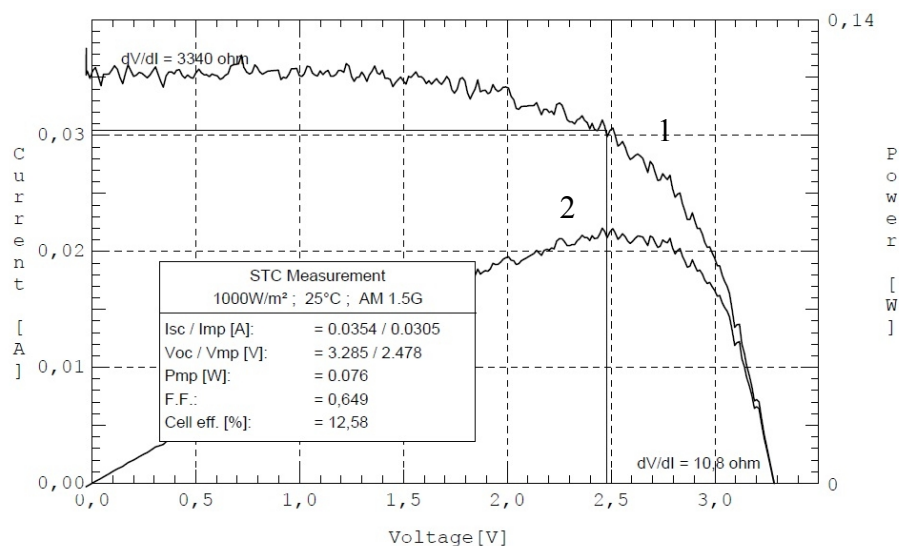
9 lentelė. I jungtinio parabolinio koncentratoriaus elektrinės charakteristikos

	Isc [A]	I _{mp} [A]	Voc [V]	V _{mp} [V]	P _{mp} [W]	F.F. [%]	Cell eff. [%]
1 juostelė	0,0396127	0,033319	3,36567	2,57922	0,0859368	64,4575	14,3228
2 juostelė	0,0369593	0,03213	3,3413	2,60861	0,0838157	67,8713	13,9693
Lygiagrečiai sujungtos juostelės	0,0778035	0,066636	3,36763	2,60072	0,173301	66,142	14,4417
2 juostelė su koncentratoriumi	0,133094	0,119218	3,6186	2,79561	0,333286	69,2018	55,5477
Lygiag.sujungtos juostelės su koncentratoriumi	0,268583	0,242041	3,65611	2,79178	0,675725	68,8133	56,3104

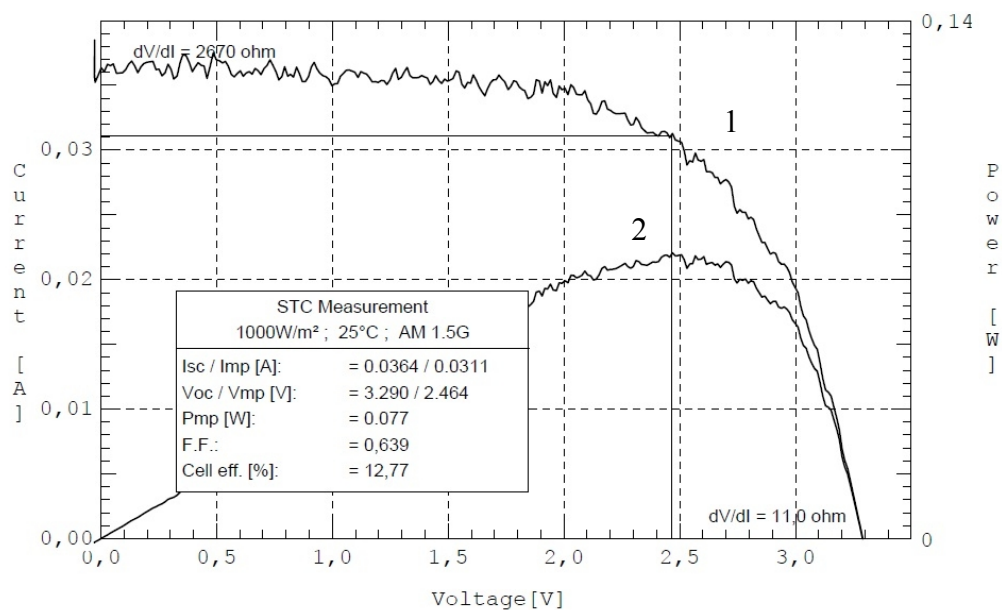
Iš 9 lentelės galima nustatyti koncentracijos laipsnį. Laipsnio nustatymo skaičiavimui naudojami lygiagrečiai sujungtų juostelių su koncentratoriumi ir be jo duomenys. Koncentracijos laipsnis – tai galių santykis:

$$C \approx \frac{P_{mp}(konc)}{P_{mp}} \approx \frac{0,675725}{0,173301} \approx 3,899. \quad (5.1)$$

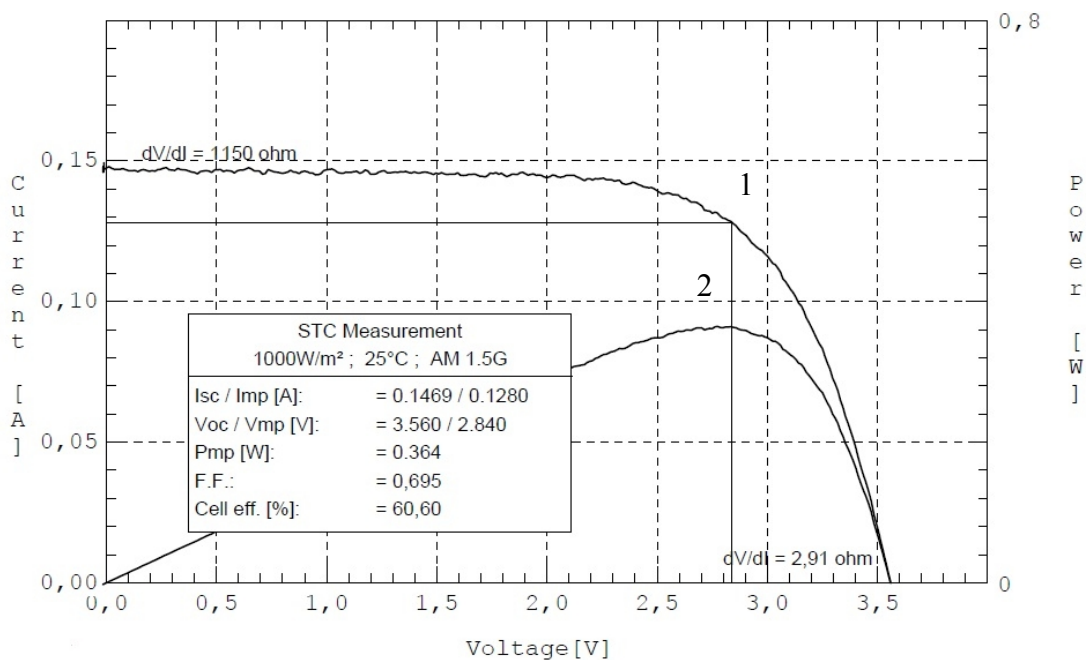
Iš (5.1) matyti, kad koncentracijos laipsnis beveik 4 „saulės“. Toks rezultatas netenkinantis, todėl buvo gaminamos patikslintos geometrijos ir sutvirtintos konstrukcijos jungtinis parabolinis koncentratorius, kuriame naudojamos tokios pačios fotoelementų matricos. Atlikti elektrinių savybių matavimai pateikiami 86 – 89 pav. Taip pat pakartotinai pamatuotos ir pačių elementų juostelių voltamperinės charakteristikos, kad būtų gaunamas kuo didesnis tikslumas ir atskirai matuojamos skirtingos koncentratoriaus pusės (1 ir 2 fotoelementų matricos).



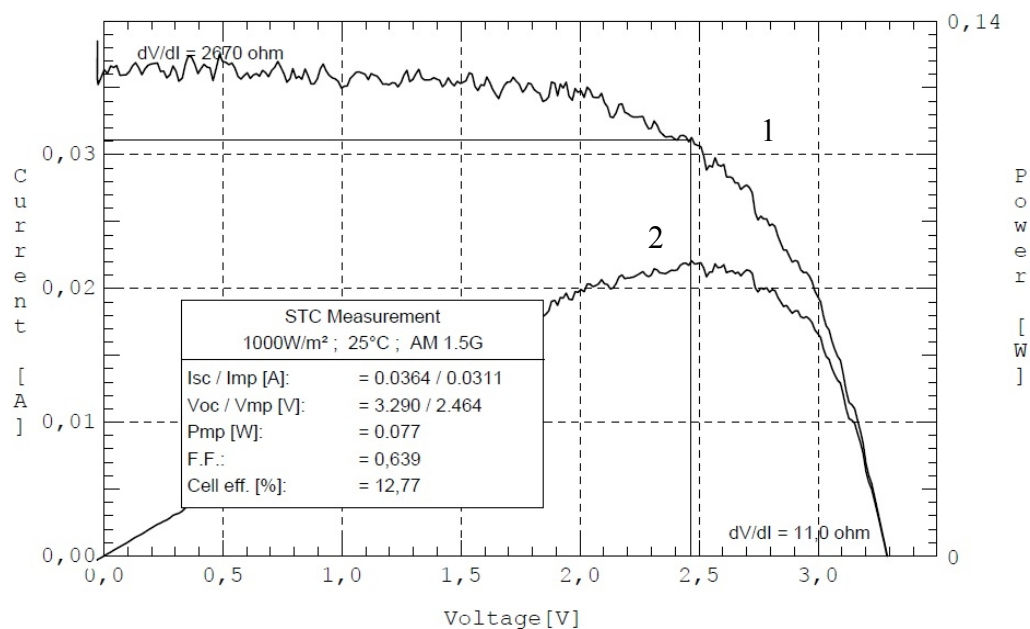
86 pav. 1 – osios fotoelementų matricos (56 pav.) voltamperinė (1) ir voltatinė (2) charakteristikos



87 pav. 2 – osios fotoelementų matricos (matuota pakartotinai) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos



88 pav. 1 – osios fotoelementų matricos (56 pav.) su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos



89 pav. 2 – osios fotoelementų matricos (56 pav.) su I jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi voltamperinė (1) ir voltatinė (2) charakteristikos

10 lentelė. I Jungtinio parabolinio koncentratoriaus elektrinės charakteristikos

	Isc [A]	Imp [A]	Voc [V]	Vmp [V]	Pmp [W]	F.F. [%]	Cell eff. [%]
1 juostelė	0,0354116	0,030465	3,28516	2,47839	0,0755031	64,9026	12,5838
1 juostelė su koncentratoriumi	0,146874	0,128018	3,55952	2,84002	0,363573	69,543	60,5955
2 juostelė	0,0364333	0,03109	3,29001	2,46402	0,0766066	63,9103	12,7678
2 juostelė su koncentratoriumi	0,156005	0,142683	3,52406	2,72524	0,388845	70,7287	64,8076

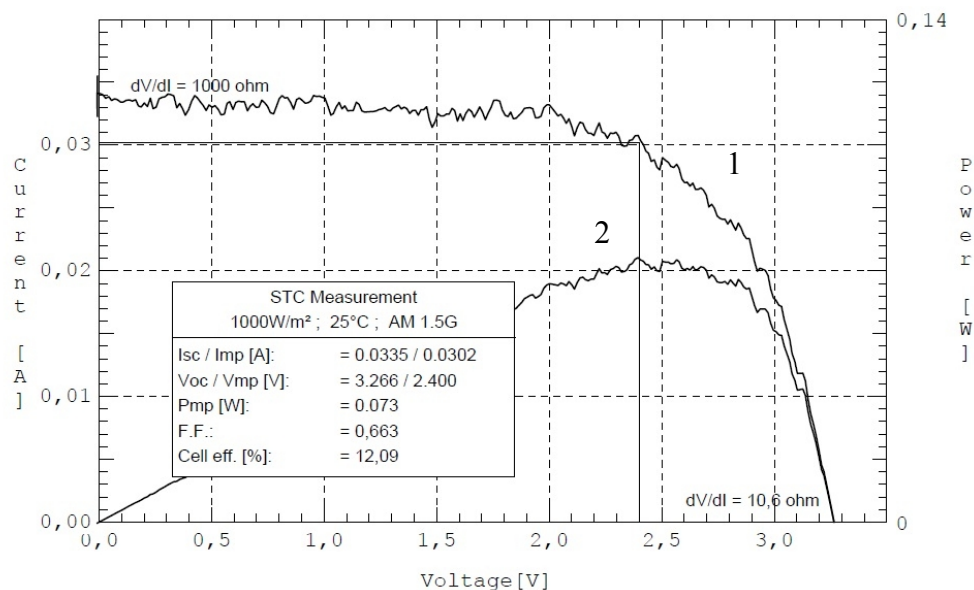
Iš 10 lentelės nustatomi koncentracijos laipsniai skirtingoms juostelėms:

$$C_1 \approx \frac{P_{mp}(konc)}{P_{mp}} \approx \frac{0,363573}{0,0755031} \approx 4,82; \quad (5.2)$$

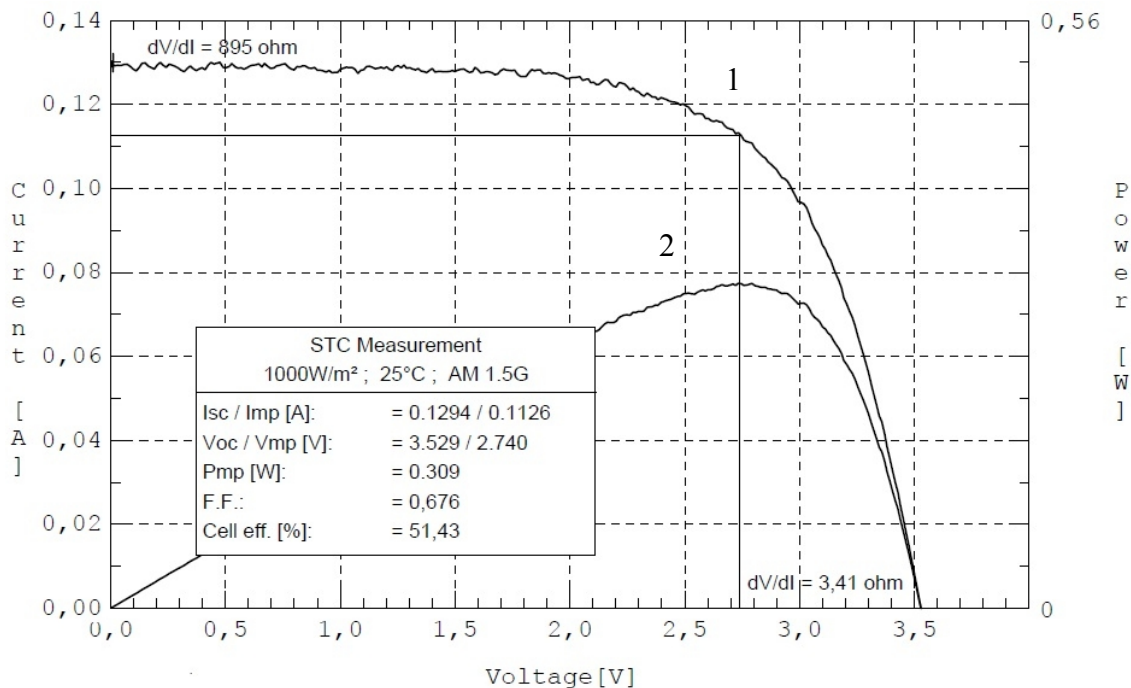
$$C_2 \approx \frac{P_{mp}(konc)}{P_{mp}} \approx \frac{0,388845}{0,0766066} \approx 5,08. \quad (5.3)$$

Iš (5.2) ir (5.3) matyti, kad koncentracijos laipsnis prilygsta 5 „saulėm“. Gautas geresnis rezultatas, nors didžiausia galima geometrinė koncentracija – 6,7 „saulės“. Bet šis koncentratorius

gan didelių matmenų, todėl sukurtas mažesnis jungtinis parabolinis koncentratorius (II), kurio elektrinių savybių tyrimai pateikiami 90-91 pav. ir 11 lentelėje.



90 pav. Fotoelementų matricos (57 pav.) be koncentratoriaus voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos



91 pav. Fotoelementų matricos su II jungtiniu paraboliniu koncentratoriumi (59 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

11 lentelė. II jungtinio parabolinio koncentratoriaus elektrinės charakteristikos

	Isc [A]	Imp [A]	Voc [V]	Vmp [V]	Pmp [W]	F.F. [%]	Cell eff. [%]
Juostelė	0,0335249	0,030234	3,26578	2,39964	0,0725503	66,2652	12,0917
Juostelė su koncentratoriumi	0,129396	0,112603	3,52868	2,74021	0,308555	67,5771	51,4259

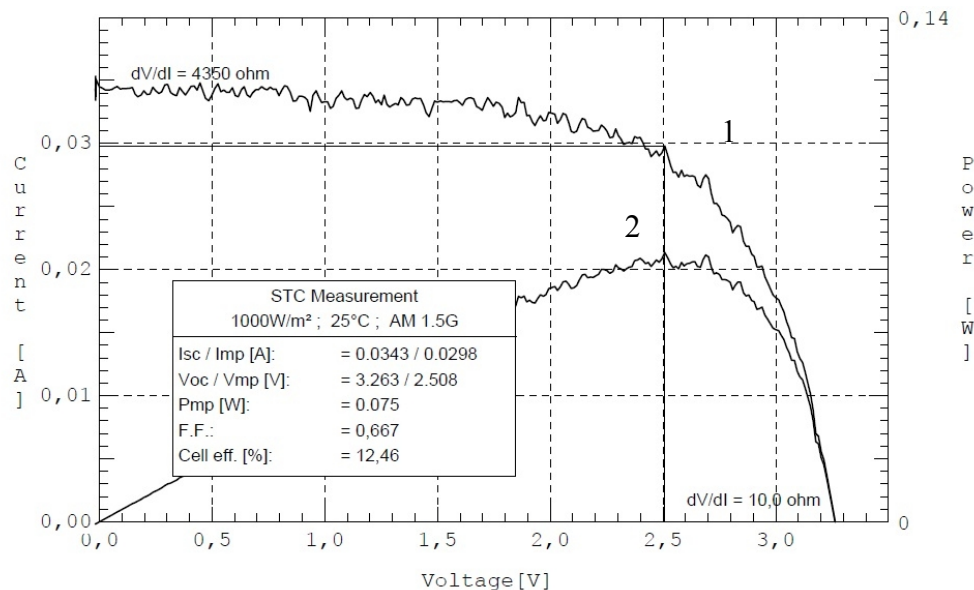
Iš 11 lentelės nustatomas koncentracijos laipsnis:

$$C \approx \frac{P_{mp}(konc)}{P_{mp}} \approx \frac{0,308555}{0,0725503} \approx 4,25. \quad (5.4)$$

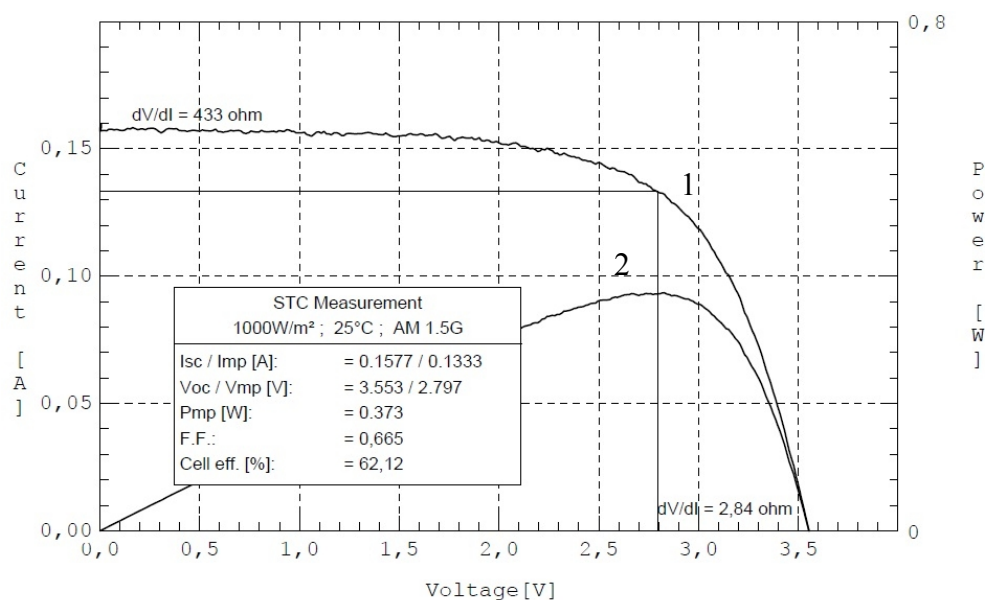
Iš (5.4) matyti, kad koncentracijos koeficientas kiek didesnis nei 4 „saulės“. Gautas rezultatas panašus į prieš tai tirtą koncentratoriaus, nors pastarojo didžiausias geometrinis koncentracijos laipsnis 6,75 „saulės“. Tačiau paskutiniojo gamyba reikalauja mažesnių kaštų, o be to, jo užimamas plotas mažesnis. Todėl jį naudoti koncentratorinėse sistemose naudingiau, nei pirmtakus.

5.3.2. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu elektrinių savybių tyrimai

Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu elektrinių savybių tyrimas atliekamas vadovaujantis tokiais pat principais, kaip aprašyta 5.3.1 skyriuje. Fotoelementų matricos ir matricos su Frenelio lęšiu voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos pateiktos 92 – 93 pav.



92 pav. Fotoelementų matricos (56 pav.) be Frenelio lęšio (I) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos



93 pav. Fotoelementų matricos su Frenelio lęšiu (I) (74 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristika

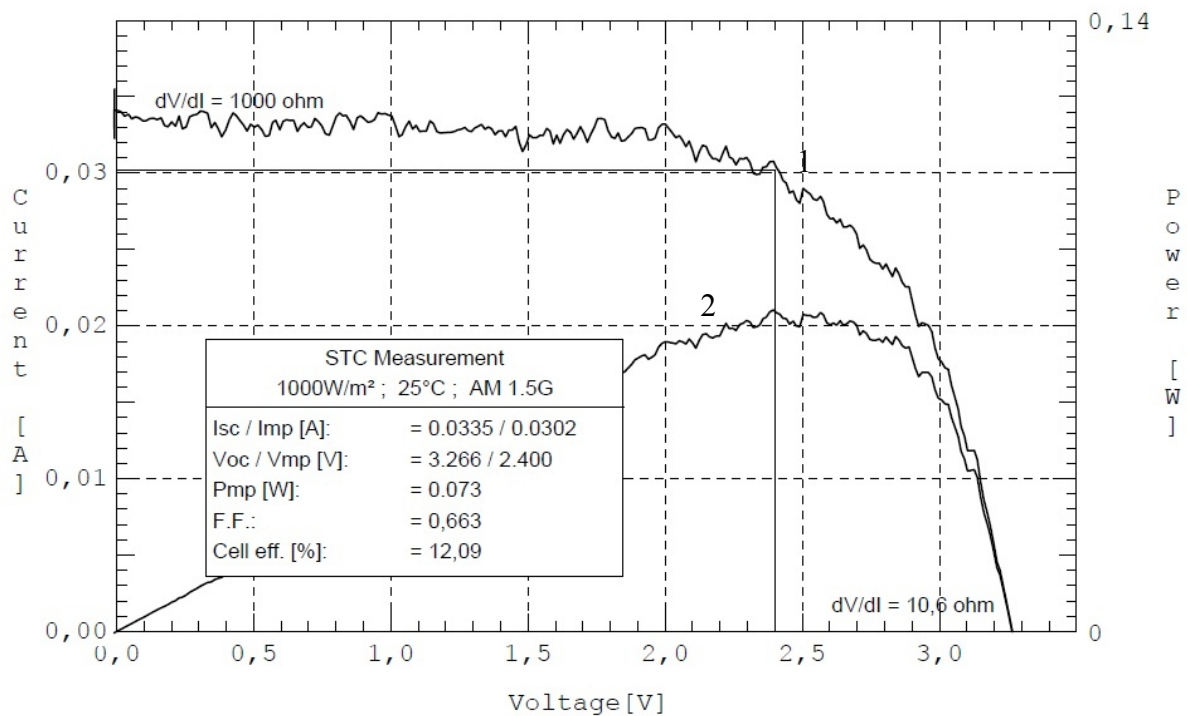
12 lentelė. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) elektrinės charakteristikos

	Isc [A]	Imp [A]	Voc [V]	Vmp [V]	Pmp [W]	F.F. [%]	Cell eff. [%]
Juostelė	0,0343378	0,029807	3,26325	2,50779	0,0747505	66,7101	12,4584
Juostelė su Frenelio lęšiu	0,157696	0,133261	3,55346	2,79684	0,372711	66,512	62,1185

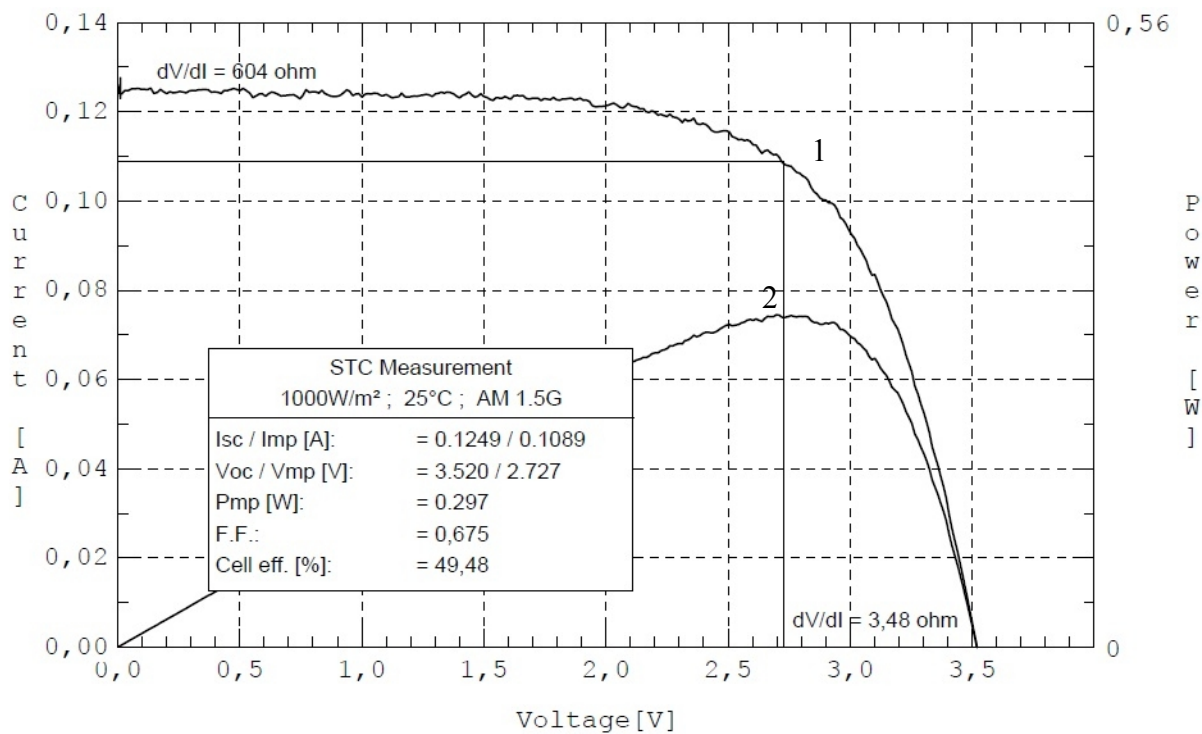
Iš 12 lentelės nustatomas koncentracijos laipsnis:

$$C \approx \frac{P_{mp}(konc)}{P_{mp}} \approx \frac{0,372711}{0,0747505} \approx 4,98. \quad (5.5)$$

Iš (5.5) matyti, kad koncentratoriaus su Frenelio lęšiu koncentracijos koeficientas prilygsta 5 „saulėm“. Gautas rezultatas panašus kaip ir jungtinio parabolinio koncentratoriaus atveju. Šio prototipo didžiausia geometrinė koncentracija siekia 20 „saulių“, bet šis koncentratorius gan didelio ploto, todėl buvo pagamintas mažesnio ploto koncentratorius su Frenelio lęšiu (II), kurio elektrinių savybių tyrimų rezultatai parodyti 94-95 pav. ir 13 lentelėje.



94 pav. Fotoelementų matricos (57 pav.) be Frenelio lęšio (II) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos



95 pav. Fotoelementų matricos su Frenelio lęšiu (II) (75 pav.) voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

13 lentelė. Koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) elektrinės charakteristikos

	Isc [A]	Imp [A]	Voc [V]	Vmp [V]	Pmp [W]	F.F. [%]	Cell eff. [%]
Juostelė	0,0335249	0,030234	3,26578	2,39964	0,0725503	66,2652	12,0917
Juostelė su Frenelio lęšiu	0,124887	0,10885	3,51976	2,72739	0,296877	67,5378	49,4794

Iš 13 lentelės nustatomas koncentracijos laipsnis:

$$C \approx \frac{P_{mp}(konc)}{P_{mp}} \approx \frac{0,296877}{0,0725503} \approx 4,09. \quad (5.6)$$

Iš (5.6) matyti, kad koncentratoriaus su Frenelio lęšiu koncentracijos koeficientas apytiksliai 4 „saulės“. Didžiausia galima geometrinė koncentracija 10 „saulių“, todėl šis koncentratorius daug naudingesnis, nei pirmtakas. Juolab, siauresnis Frenelio lęšis, reikalauja mažesnių gamybos sąnaudų bei yra kompaktiškesnis, dėl savo mažesnių matmenų.

IŠVADOS

1. Atlikta saulės elementų efektyvumo analizė ir išnagrinėtos šviesos koncentratorinių sistemų (ŠKS) rūšys. Šiame darbe suprojektuotos ir pagamintos jungtinė parabolinė ŠKS ir ŠKS su Frenelio lęšiu. Abiejų ŠKS konstrukcijos nesudėtingos. Jų realizavimui nereikia brangių medžiagų, ypatingų finansinių ir laiko sąnaudų.
2. Iš poliesterinės dervos su 2 proc. ir 4 proc. kietiklio pagaminto Frenelio lęšio matavimo rezultatų seka, kad Briusterio kampas yra apie $57,5^\circ \pm 0,1^\circ$, o lūžio rodiklis – $1,57 \pm 0,01$, artimas stiklo, naudojamo ŠKS, lūžio rodikliui ($1,52 \pm 0,1$). Tokios medžiagos gali būti panaudotos Frenelio lęšio gamybai.
3. Frenelio lęšio gamybai panaudotos poliesterinės dervos minimalus optinis pralaidumas ($T < 5$ proc.) stebimas ultravioletinių bangų ilgių ruože $298 \text{ nm} < \lambda < 365 \text{ nm}$. Medžiaga skaidri ($T > 80 - 90$ proc.) bangų ilgių ruože $\lambda < 210 \text{ nm}$ ir $\lambda > 365 \text{ nm}$. Optinis pralaidumas 3 proc. ribose skiriasi skirtingose lęšio vietose. Optinio pralaidumo skirtumai priklauso nuo medžiagos nehomogeniškumo, sąlygojančio nevienodą šviesos sklaidą. Skirtumai taip pat gali būti nulemti netikslios bandinio orientacijos, kritusios šviesos srauto atžvilgiu. Regimoje spektro dalyje poliesterinė derva su 2 proc. ir 4 proc. kietiklio gali būti panaudota ŠKS lęšiams.
4. Nustatyta, jog poliesterinė derva geltonuoja ilgiau nei 300 val. ją eksponuojant ultravioletiniuose ($\lambda = 298 - 365 \text{ nm}$) spinduliuose, todėl lęšių optinis pralaidumas sumažėja daugiau nei 10 proc. Tad Frenelio lęšiai, naudojami mažose fotoelektrinėse jėgainėse su optiniais koncentratoriais, turėtų būti kasmet keičiami, atsižvelgiant į jų eksponavimo trukmę.
5. ŠKS koncentracijos laipsnius galima padidinti beveik 20 %, koncentratoriaus optinę sistemą gaminant aukšto slėgio aplinkoje bei gaminant tikslesnę prototipo formą.
6. Darbe gautų 4 prototipų šviesos koncentravimo laipsniai savo skaitine verte panašūs:
 - I jungtinio parabolinio koncentratoriaus – 3,90;
 - II jungtinio parabolinio koncentratoriaus – 4,25;
 - koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (I) – 4,98;
 - koncentratoriaus su Frenelio lęšiu (II) – 4,09.

Tačiau jų gamybos sąnaudos skiriasi. Naudojant kartu su saulės trajektorijos sekimo įrenginiais, ŠKS tikslinga naudoti pigesnes technologijas, tokias kaip panaudotos kuriant II jungtinį parabolinį ar II koncentratorių su Frenelio lęšiu.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Antonini, A. 2010. Photovoltaic Concentrators – Fundamentals, Applications, Market & Prospective. Chapter 2. „Cpower Srl“, Italy. From book: „Solar Collectors and Panels, Theory and Applications“, 444 p.
- Benitez, P.; Minano, J. C.; Zamora P.; etc. 2010. High performance Fresnel-based photovoltaic concentration. 26 April 2010 / Vol. 18, No. S1 / OPTICS EXPRESS A25, p. 25 – 40.
- Chaves J.C. 2008. „*Introduction to Nonimaging Optics*“, Taylor and Francis Group LLC, p. 12-324.
- Gallagher, S. J.; Norton B.; Eames P. C. 2007. “*Quantum Dot Solar Concentrators: Electrical Conversion Efficiencies and Comparative Concentrating Factors of Fabricated Devices*“, Solar Energy, 81: 813-821.
- Kytra S. 2006. Atsinaujinantys energijos šaltiniai, Kaunas: Technologija. 301 p.
- Kwangsun, Ryu; Jin-Geun, Rhee; Kang-Min, Park; Jeong, Kim. 2006. “*Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system*“, Solar energy, 80 (2006), p. 1580 – 1587.
- Luque, A.; Hegedus, S. 2003. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Willey & Sons Ltd, England, 2003 y., 1117 p.
- Minano, J. C.; Gonzalez, J. C.; Zanesco, I. 1994. “*Flat High Concentration Devices*“. In Proceeding of 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii. 1994.
- Minano, J. C.; Gonzalez, J. C.; Benitez, P. 1995. “*High-gain, Compact, Nonimaging Concentrator: RXP*“, Applied Optics, 34(34):7850-7856, 1995.
- Miller, D. C.; Gedvilas, L. M.; To, B.; Kennedy, Ch. E.; Sarah, R. K. 2010. Durability of Poly(MethylMethacrylate) Lenses Used in Concentrating Photovoltaic Modules, *NREL/CP-520-47604 Conference paper*.
- Muhammad-Sukki, F.; Ramirez-Iniguez, R.; McMeekin, S.G.; etc. 2010. Solar concentrators. International Journal of Applied Sciences (IJAS), Volume (1): Issue (1), 2010 y., 2-15 p.
- Nilson, Johan. 2005. “*Optical Design and Characterization of Solar Concentrators for Photovoltaics*“, Lund University, Lund, Sweden, 2005 y., 221 p.
- Ning, X. R.; Winston, R.; O’Gallagher J. 1987. „*Dielectric Totally Internally Reflecting Concentrators*“, Applied Optics, 26(2): 300–305p., 1987.
- Piszcior, M. F.; Macosko, R.P. 2000. “*A High-Efficiency Refractive Secondary Solar Concentrator for High Temperature Solar Thermal Applications*“, NASA Technical Memorandum, NASA/TM-2000-208401. 2000.

Ramirez-Iniguez, R.; Green, R.J. 2005. “*Optical Antenna Design for Indoor Optical Wireless Communication Systems*”, International Journal of Communication Systems, 18: 229-245, 2005.

Ramirez-Iniguez, R.; Idrus, S.M.; Sun, Z. 2008. “*Optical Wireless Communications: IR for Wireless Connectivity*”, Taylor and Francis Group LLC., p.73-139, 2008.

Sala, G. D.; Pachon, D.; Anton, I. 2000. „*Book 1: Classification of PV Concentrators*”, Test, Rating, and Specification of PV Concentrator Components and Systems, C – Rating Project, (2000).
Prieiga per internetą: <http://www.ies-def.upm.es/ies/CRATING/crating.htm> žiūrėta [2012-01-12].

Shockley, W.; Hans, J. Queisser. 1961. „*Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells*“, *Journal of Applied Physics*, Volume 32 (March 1961), 510-519 p.

Stine, W.B.; Geyer, M. 2010. „Power from the Sun“. Prieiga per internetą: <http://www.powerfromthesun.net/index.html> žiūrėta [2012-01-11].

Terao, A.; Mulligan, W. P.; Daroczi, S. G.; Pujol, O. C.; Verlinden, P. J.; Swanson, R. M. 2000. “*A Mirror- Less Design for Micro-Concentrator Module*”. In Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, Alaska. 2000.

Tiwari, G. N.; Swapnill, Dubey. 2010. „*Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Applications*“, Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology (IIT) Delhi, India, 2010 y. 402 p.

Welford, W.T.; Winston, R. 1989. „*High Collection Nonimaging Optics*”, Academic Press Inc., p. 53-273, 1989.

PRIEDAI

1 priedas

„AutoCad“ *Autolisp* algoritmas parabolėms braižyti ir fokusavimo atstumui skaičiuoti

```
(defun c:pbl (/ f mxx x ip y cp1 cp2 p1 p2 e1 e2 osn)
  (setq osn (getvar "OSMODE"))
  (setvar "cmdecho" 0)
  (if (= ff nil)
    (setq ff 1.0)
  )
  (princ "\n Focus to center point of parabola <distance> < ")
  (princ ff)
  (princ " > ?? : ")
  (initget 2)
  (setq f (getdist))
  (if (= f nil)
    (setq f ff)
  )
  (setq ff f)

  (if (= mxxx nil)
    (setq mxxx 2.0)
  )
  (princ "\n Height < ")
  (princ mxxx)
  (princ " > ?? : ")
  (setq mxx (getdist))
  (if (= mxx nil)
    (setq mxx mxxx)
  )
  (setq mxxx mxx)
  (setq mx (+ mxx f))

  (if (= x1 nil)
    (setq x1 0.1)
  )
  (princ "\n Precision < x distance > < ")
  (princ x1)
  (princ " > ?? : ")
  (setq x (getdist))
  (if (= x nil)
    (setq x x1)
  )
  (setq x1 x)
  (if (> x 1)
    (setq x 1)
  )
)
; -- FIRST SEGMENT ---
(setq ip (getpoint "\n Insert by focus: ")) ; ip = focus point
(setq y (+ f (/ (expt x 2) (* 4 f)))) ; y = distance of point from base
line
(setq cp1 (polar ip (* pi 1.5) (* f 2)))
(setq p1 (polar cp1 (* pi 0.5) f))
(setq cp2 (polar cp1 0 x))
(setq p2 (polar cp2 (* pi 0.5) y))
(setvar "osmode" 0)
(command "pline" p1 "w" 0 0 p2 "")
(setq e1 (entlast))
(setq xx x)
```

```

(while (> mx y)
  (setq xx (+ xx x))
  (setq y (+ f (/ (expt xx 2) (* 4 f))))
  (setq cp2 (polar cp1 0 xx))
  (setq p2 (polar cp2 (* pi 0.5) y))
  (command "line" "" p2 "")
  (setq e2 (entlast))
  (command "pedit" e1 "j" e2 "" ""))
)
(command "mirror" e1 "" ip cp1 "")
(command "circle" ip x)
(setvar "osmode" osn)
(princ)
)
(prompt "\n type  pbl  for parabola")

```

2 priedas

Epoksidinės dervos „Araldite LY 3505“ ir kietiklio „XB 3404“ techniniai duomenys

Advanced Materials

Structural Composites



MATRIX SYSTEMS FOR INDUSTRIAL COMPOSITES

DATA SHEET

Warm-curing epoxy systems based on Araldite® LY 3505* / Hardeners XB 3403* / XB 3404* / XB 3405*			
Araldite LY 3505 is an epoxy resin Hardeners XB 3403, XB 3404 and XB 3405 are based on aliphatic polyamines.			
Applications	Industrial composites, repair of composites.		
Properties	Laminating systems without reactive diluent. The reactivity of the systems may easily be adjusted to demands through the combination of the three hardeners of different reactivity. The long possible pot life facilitates the production of very large industrial parts. The systems are qualified by Germanischer Lloyd.		
Processing	• Wet lay-up • Filament Winding • Resin Transfer Moulding (RTM) • Pressure Moulding		
Key data	Araldite LY 3505		
	Aspect (visual)	clear liquid	
	Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 3	
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	6500 - 8000	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.15 - 1.20	[g/cm³]
	Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]
	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]
	Hardener XB 3403		
	Aspect (visual)	transparent liquid	
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	5 - 20	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	0.95 - 1.0	[g/cm³]
	Flash point (ISO 2719)	124	[°C]
	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]
	Hardener XB 3404		
	Aspect (visual)	clear, blue liquid	
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	20 - 40	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	0.95 - 1.0	[g/cm³]
	Flash point (ISO 2719)	121	[°C]
	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]
Key data	Hardener XB 3405		
	Aspect (visual)	clear, red liquid	
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	70 - 90	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	0.95 - 1.0	[g/cm³]
	Flash point (ISO 2719)	109	[°C]
	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]

Processing data

Mix ratio	Components	Parts by weight	Parts by volume
	Araldite LY 3505	100	100
	Hardener XB 3403	35	42
	Araldite LY 3505	100	100
	Hardener XB 3404	35	42
	Araldite LY 3505	100	100
	Hardener XB 3405	35	42
We recommend that the components are weighed with an accurate balance to prevent mixing inaccuracies which can affect the properties of the matrix system. The components should be mixed thoroughly to ensure homogeneity. It is important that the side and the bottom of the vessel are incorporated into the mixing process. When processing large quantities of mixture the pot life will decrease due to exothermic reaction. It is advisable to divide large mixes into several smaller containers.			
Initial mix viscosity (Hoeppler, ISO 12058-1)		[°C]	[mPa s]
	LY 3505/XB 3403	at 25	300 - 400
	LY 3505/XB 3404	at 25	550 - 800
	LY 3505/XB 3405	at 25	1000 - 1200
Pot life (Tecam, 100 ml, 65 % RH)		[°C]	[min]
	LY 3505/XB 3403	at 23	600 - 720
		at 30	430 - 510
	LY 3505/XB 3404	at 23	80 - 100
	LY 3505/XB 3405	at 23	26 - 36
Gel time (Hot plate)		[°C]	[min]
	LY 3505/XB 3403	at 60	105 - 125
		at 80	36 - 48
		at 100	14 - 18
	LY 3505/XB 3404	at 60	60 - 70
		at 80	11 - 18
		at 100	3 - 7
	LY 3505/XB 3405	at 60	18 - 26
		at 80	5 - 11
		at 100	1 - 6
The values shown are for small amounts of pure resin/hardener mix. In composite structures the gel time can differ significantly from the given values depending on the fibre content and the laminate thickness.			
Gelation at 23 °C (in thin layers: 0.4 - 0.7 mm)			[h]
	LY 3505/XB 3403	Start	14 - 16
		End	19 - 21
	LY 3505/XB 3404	Start	5 - 7
		End	9 - 11
	LY 3505/XB 3405	Start	2 - 3
		End	4 - 5
Typical cure cycles	15 h at 50 °C or 8 - 10 h at 60 °C or 6 - 8 h at 80 °C		

3 priedas

Poliuretaninės dervos „RenCast FC 52 Isocyanate / FC 52 Polyol“ techniniai duomenys



Advanced Materials

RenCast[®] FC 52 Isocyanate / FC 52 Polyol

CASTING RESIN
QUICK SETTING POLYURETHANE SYSTEM

KEY PROPERTIES	• Beige coloured three-part system • Designed for quick accurate castings • Can be cast in layer thickness up to 30 mm • Filler content can be varied to suit application
APPLICATIONS	• Moulds • Holding fixtures • Foundry patterns • Replicas and Prototypes

PRODUCT DATA

Property	Unit	RenCast [®] FC 52 Isocyanate	RenCast [®] FC 52 Polyol
Appearance Colour	visual	Liquid Amber	Liquid Amber
Viscosity at 25°C	mPa s	20 - 30	65 – 75
Density	g/cm ³	1.12	0.98

PROCESSING

Mix ratio	Parts by weight (unfilled system)	Parts by weight (filled)
RenCast [®] FC 52 A	100	100
RenCast [®] FC 52 B	100	100
Filler DT 082		300

Mix the two components thoroughly in the ratio indicated.
Degassed material will improve properties. Post-curing will improve final properties.

PROPERTIES

Resin/Hardener mix:	Volume	Unit	FC 52 Isocyanate FC 52 Polyol Unfilled	FC 52 Isocyanate FC 52 Polyol Filler DT 082
Appearance		visual	Beige unfilled	Beige filled
Viscosity at 25°C		mPa s	70	paste
Pot life at 25°C	(1000 ml)	min	6 - 8	10
Max. Layer thickness		mm	30	100
Demoulding time		min	60 - 90	180

After cure: 7 days at RT or 14 hours at 80 °C

Density	ISO 1183	g/cm ³	1	1.6
Hardness	ISO 868	Shore D	70 - 75	80 - 85
Deflection temperature	ISO 75	°C	80	85
Compressive strength	ISO 604	MPa	35	38
Compressive modulus	ISO 604	MPa	1000	2100
Flexural strength	ISO 178	MPa	25	26
Linear shrinkage @ 5 mm		mm/m	5	0
Linear shrinkage @ 10 mm		mm/m	5.5	0.1
Linear shrinkage @ 20 mm		mm/m	-	0.6

STORAGE

The resin and hardeners described in this instruction sheet have the shelf lives shown provided they are stored at 6 - 28°C in a dry place and sealed containers, preferably those in which they are supplied.

WORKING CONDITIONS

The product should be used when within the temperature range 18-25°C. Shake the unfilled and stir the filled system.

PACKAGING

System	RenCast [®] FC 52 Isocyanate	RenCast [®] FC 52 Polyol
Quantity and Weight	1 x 20 kg	1 x 20 kg
Quantity and Weight	1 x 5 kg	1 x 5 kg
Quantity and Weight	4 x 1 kg	4 x 1 kg
Filler DT 082 Multipacks of 6 x 1.5 kg and 15 kg containers		

4 priedas

Silikono „Milar MM 922“ techniniai duomenys

Technical Data Sheet



MM922 (old RTV922) 2-Part Moulding Rubber

Introduction

MM922 is a two component room temperature condensation curing silicone compound.

The cured product is a flexible rubber with good tear strength and mechanical properties. It is an excellent rubber for Mouldmaking of intricate patterns involving deep undercuts and an excellent all round rubber for many difficult moulding jobs.

Key Features

- No inhibition
- Easy degassing
- Very high tear strength
- Good dimensional stability
- Good chemical resistance to resins (PE-PU-Epoxy)

Use and Cure Information

The curing process starts as soon as the catalyst is added. Under normal conditions of temperature and humidity, typical curing characteristics are described below. If the product is to be used in contact with aggressive chemicals, such as high styrene polyester resins or epoxies, it is recommended that the rubber be allowed to cure for 48 hours before use.

The normal catalyst for use with the MM900 series of rubbers is MM CAT B5. Relatively fast cure and demoulding is possible using MM CAT R5.

How to Use

Charge 95-100 parts by weight of MM922 and 5 parts by weight of MM CAT B5 into a suitable plastic or metal container. The volume of the mixing vessel should be sufficient to allow for rapid expansion which takes place during the initial degassing of the catalysed rubber.

Mix thoroughly avoiding excessive air entrapment but using the colour contrast to achieve homogeneity. Stop the mixer and scrape the vessel walls a few times. To prevent imperfections due to bubbles in the cured rubber, it is advisable to de-aerate the liquid rubber by using intermittent evacuation for a few minutes. Normally after releasing the vacuum 2 or 3 times, the mass collapses naturally after which degassing should continue for only a few minutes.

Vertical Application

MM922 can be used to make mouldings on vertical surfaces by employing Thixotroping Agent TA2. A typical formulation for good thixotropy and approximately the same working life of the normal rubber is shown below:-

- MM922 95 - 100 parts by weight
- MM CAT B5 5 parts by weight (or MM CAT R5)
- TA2 2 - 3 parts by weight

Mix the components in the above order. When using the fast cure catalyst, if degassing is required it must be done quickly after catalysation and before the addition of the Thixotroping Agent TA2. Pot life and rate of cure is slightly shorter in the presence of TA2.

Property

Test Method

Value

Uncured Product

Colour:		Pale blue
Appearance:		Viscous liquid
Viscosity:	Brookfield	25000 mPa.s
Catalysed viscosity		19000 mPa.s
Pot Life:		73 minutes *
De-mould time		4.5 hours *

* measured at 23+/-2°C and 65% relative humidity.

Cured Elastomer

(after 7 days cure at 23+/-2°C and 65% relative humidity)

Tensile Strength:	BS903 Part A2	3.60 MPa
Elongation at Break:	BS903 Part A2	514 %
Youngs Modulus:		1.50 MPa
Modulus at 100% Strain:	BS903 Part A2	0.93 MPa
Tear Strength:	BS903 Part A3	24 kN/m
Hardness:	ASTM D 2240-95	19° Shore A
Specific Gravity:	BS 903 Part A1	1.26
Linear Shrinkage:		0.40%
Coefficient of Thermal Expansion:		
Volumetric		738ppm / °C
Linear		246ppm / °C
Min. Service Temperature:		-50 °C
Max. Service Temperature:	AFS 1540B	200 °C

Electrical Properties

Volume Resistivity:	ASTM D-257	1x10 ¹³ Ω.cm
---------------------	------------	-------------------------

All values are typical and should not be accepted as a specification.

Health and Safety - Material Safety Data Sheets available on request.

Packages – MM913 is supplied in 5 kg and 20 kg bulk containers.

MM CAT B5 is supplied in 250 g and 1 kg containers.

MM TA2 is supplied in 50g, 100 g, 500 g and 1 kg containers.

Arrangements can be made to supply in other pack sizes.

Storage and Shelf Life – Expected to be 12 months in original, unopened containers below 40°C.

Revision Date: 28.09.04

5 priedas

Poliesterinės dervos „Polylite 32032-20“ techniniai duomenys

REICHHOLD

1-2

Polylite® 32032-20

APRAŠYMAS

Polylite 32032-20 yra švari, bespalvė poliesterinė derva, sukūrta dekoratyviniam, liejiminiam panaudojimui, kai yra reikalingas produkto skaidrumas, kai gaminyje turi būti įlietos įvairios įdėtinės detalės: akmenukai, kriauklelės, augalai, LED ir t.t.

Polylite 32032-20 yra netiksotropinė, pagreitinta (su greitikliu), o taip pat stabilizuota UV spinduliams.

Polylite 32032-20 modifikuota akrilu – kad pagerinti atsparumo savybes išorinės aplinkos poveikiui.

FIZIKINĖS-MECHANINĖS SAVYBĖS SKYSTAME PAVIDALE PRIE 23 °C

Savybės	Duomenys	Mat. vnt	Testavimo metodas
Klampumas: Cone & Plate	400-5000	mPa (cP)	ISO 2884-1974
Santykinis svoris	1.10±0.02	g/cm ³	ISO 2811-1974
Rūgštingumas (max)	<22	mgKOH/g	ISO 2114-1974
Stireno kiekis	35±2	% svorio	B070
Blykstės temperatūra	32	°C	ASTM D 3278-95
Kietėjimo pradžia: 2% NORPOL No.1 (MEKP)	15-25	min	G024
Garantinis laikotarpis	10	mėn	-

FIZIKINĖS-MECHANINĖS CHARAKTERISTIKOS KIETAME PAVIDALE BE UŽPILDŲ

(pilnai sukietėjusi)

Savybės	Derva be užpildų	Mat.vnt.	Testavimo metodas
Atsparumas tempimui	55-60	MPa	ISO 527 1/2-1993
Atsparumas smūgiui	6-9	kJ/m ²	ISO 179-1993
Sąlyginis pailgėjimas	1.5-2.0	%	ISO 527 1/2-1993
Atsparumas lenkimui	100	MPa	ISO 178-1993
Lenkimo modulis	4200	Mpa	ISO 178-1993
Šiluminė deformacija	65-70	°C	ISO 75 1/2-1993
Kietumas pagal Barcol	40-45	934-1	ASTM D-2583

Topplastas, poliesterinė derva POLYLITE 32032-20



FRESNELIO LĘŠIO ŠVIESOS KONCENTRATORINĖSE SISTEMOSE TYRIMAS

Paulius Gailiūnas¹, Gintautas Jakimavičius², Artūras Jukna³
VGTU FMF fizikos katedra

El. p. ¹paulius@met.lt, ²gintautas@met.lt, ³arturas.jukna@vgtu.lt

Anotacija. Tiriama optinė koncentratorinė sistema su Fresnelio lęšiu, fokusuojančiu ir nukreipiančiu šviesos pluoštą į saulės elementą, konvertuojantį saulės šviesos energiją į elektros energiją. Piginant gamybos technologiją, Fresnelio lęšiai gaminami iš skaidrių plastikų (pvz., polimetilmetakrilato, polimetilakrilato ar kt.) karšto presavimo būdu arba naudojant kompiuteriu valdomą frezavimo įrangą. Šiame darbe ištirtas Fresnelio lęšis, pagamintas naudojant vakuuminio formavimo būdą (RTM – *Resin Transfer Molding*). Iš optinio pralaidumo ir lūžio rodiklio, matomos šviesos bangų ilgių ruože, tyrimų bei saulės elementų, esančių šviesos koncentratorinėje sistemoje, voltamperinių ir voltvatinių charakteristikų tyrimų rezultatų nustatytas šviesos koncentravimo lęšiu laipsnis. Darbe diskutuojama apie pigių optinių koncentratorinių sistemų, su Fresnelio lęšiais, galimą pritaikymą ir jo tobulinimo būdus.

Reikšminiai žodžiai: Fresnelio lęšis, optinė koncentratorinė sistema, optinis pralaidumas, lūžio rodiklis, šviesos koncentravimo laipsnis, vakuuminis plastiko formavimas.

1. Įvadas

Fotoelektrai veržiantis į energetikos sritį, didžiausia problema išlieka fotoelektros energijos kaina. Šiandien ji dar kelis kartus viršija įprastiniu būdu išgaunamos elektros energijos kainą, tad vis dar pernelyg brangi vartotojui. Aukštą fotoelektros kainą sąlygoja brangi saulės elementų (t.y. elementas, kuriuo šviesos energija konvertuojama į elektros energiją) žaliava – silicis ir saulės elementų bei saulės modulių (modulis turi didelį skaičių saulės elementų, sujungtų tarpusavyje nuosekliai ir (ar) lygiagrečiai, atsižvelgiant į konkretų elektrinės įtampos poreikį) gamybos technologija. Vienas iš kainos mažinimo būdų – saulės modulių konstrukcijų tobulinimas, kuriant efektyvias šviesos koncentratorines sistemas ir taip mažinant silicio poreikį. Šviesos koncentratorius – tai įrenginys, kuriuo šviesa surenkama iš didelio ploto ir nukreipiama į mažo ploto saulės elementą ar kito tipo išėjimą (pvz. antrinį optinį elementą (*Secondary Optical Element*)) (Benitez 2010).

Optinių koncentratorinių sistemų (CPV – *Concentrated Photovoltaic*) sukurta įvairių rūšių (Gallagher 2007): parabolinių, hiperbolinių, dielektrinių visiško vidaus atspindžio, kvantinių taškų ir kt. Medžiagos, iš kurių gaminamas koncentratorius, parenkamos atsižvelgiant į koncentratoriaus paskirtį. Saulės kolektorių kaitinimui skirti optiniai koncentratoriai – veidrodiniais paviršiais, o į pastatų konstrukcijas integruotose saulės fotoelektros energijos jėgainėse naudojamas stiklas ar permatomas plastikas (akrilas). Tačiau seniausios ir labiausiai paplitusios optinės koncentratorinės sistemos, kuriose naudojami Fresnelio lęšiai (Kwangsun 2006). Šis lęšis fokusuoja ir nukreipia šviesos pluoštą panašiai, kaip įprastas išgaubtasis stiklo ar kvarco medžiagos lęšis. Fresnelio

lęšio fokusavimo ir spindulių nukreipimo kokybė tiriama spindulių sekimo (*ray – tracing*) būdu, o analizuojama, naudojant *Snellio* dėsnį arba, atskirais atvejais, remiantis *Fermato* principais (Luque 2003).

Piginant technologiją, Fresnelio lęšiai gaminami iš skaidrių plastikų, tokių kaip polimetilmetakrilato (PMMA), polimetilakrilato (PMA) ar kt., karšto presavimo būdu arba juos formuojant kompiuteriu valdoma frezavimo įranga. Šiame darbe tiriamas Fresnelio lęšis buvo pagamintas iš poliesterinės (skaidri, stabilizuota ultravioletiniais spinduliais ir modifikuota akrilu) dervos, vakuuminio formavimo būdu (RTM – *Resin Transfer Molding*) (Ornaghi 2010).

Optinių koncentratorių technologija pastaruosius 30 metų buvo labai intensyviai plėtojama. Per tuos metus sukurta daug inovacijų, įdiegta patobulinimų bei išrasti originalūs šviesą koncentruojantys elementai. Šios rūšies sistemos tobulinamos dviem būdais: 1) tobulinama atskirų koncentratoriaus dalių geometrija bei dizainas ir 2) kruopščiai parenkamos daugiafunkcės ar išmaniosios medžiagos bei modernios koncentratorių gamybos technologijos (Antonini 2010). Tobulinant atskirų koncentratoriaus dalių geometriją bei dizainą siekiama išgauti maksimalų šviesos koncentracijos koeficientą bei orientacijos į šviesos srautą optimalų kampą. Daugiafunkčių ar išmaniųjų medžiagų paieška stengiamasi rasti maksimalaus šviesos pralaidumo, minimalaus šviesos atspindžio bei sugerties medžiagas, kuriose minimali rūpimo bangų ilgio intervalo šviesos dispersija bei minimalus medžiagos geltonavimo indeksas (YI – *yellowing index*) (Miller 2010).

Svarbiausias ir aktualiausias optinių koncentratorių sistemų parametras – šviesos koncentracijos koeficientas. Jis apibūdinamas pirminio lęšio paviršiaus ploto su aktyviu saulės elemento plotu

santykiu ir vadinamas „*geometric concentration ratio*“ (Antonini 2010). Koncentracija taip pat gali būti matuojama „saulėmis“. Standartinis, pikinis saulės šviesos intensyvumas $0,1 \text{ W/cm}^2$ (1000 W/m^2). „Saulių“ koncentracija apibūdinama saulės elemento aktyviajame paviršiaus plote sufokusuotos šviesos intensyvumo su pikiniu saulės šviesos intensyvumu santykiu. Jei energinę apšvietą saulės elemento paviršiuje pažymėtume E_{Rs} , tai apšviesto saulės elemento trumpojo jungimo grandinės elektros srovę galime įvertinti iš sąryšio:

$$I_{SC}^{Xsuns} = E_{Rs} I_{SC}^{1sun}. \quad (1)$$

Optinis koncentratoriaus efektyvumas tuomet lygus:

$$\eta_{opt} = \frac{E_{Rs}}{E_{Es}}, \quad (2)$$

čia E_{Es} – energinė apšvietą koncentratoriaus įėjime (paviršiuje).

Fresnelio lęšis gaminamas iš polimerinės medžiagos. Todėl dar vienas svarbi charakteristika – polimerinės medžiagos geltonavimo indeksas. Medžiagos geltonavimas pastebimas tik sistemos eksploatacijos metu arba koncentratorių eksploatuojant ultravioletiniuose spinduliuose ($280 - 400 \text{ nm}$) (Miller 2010). Iš polimetilakrilato (PMMA) pagaminto Fresnelio lęšio, išlaikyto 6 mėnesius apšviestą ultravioletiniais spinduliais (17 W/m^2), optinis pralaidumas sumažėjo net 16 proc. (Miller 2010).

Šiame darbe tiriamasis lęšis pagamintas iš poliesterinės dervos, modifikuotos akrilu ir stabilizuotos ultravioletiniais spinduliais ($280 - 400 \text{ nm}$). Atlikti lęšio optinio pralaidumo ir lūžio rodiklio, matomos šviesos bangų ilgių ruože, tyrimai bei saulės elementų, įmontuotų optinėje koncentratorinėje sistemoje, voltamperinių ir voltatinių charakteristikų tyrimai, iš kurių rezultatų nustatytas šviesos koncentravimo pagamintu lęšiu laipsnis.

2. Optinės koncentratorinės sistemos su Fresnelio lęšiu gamybos procesas

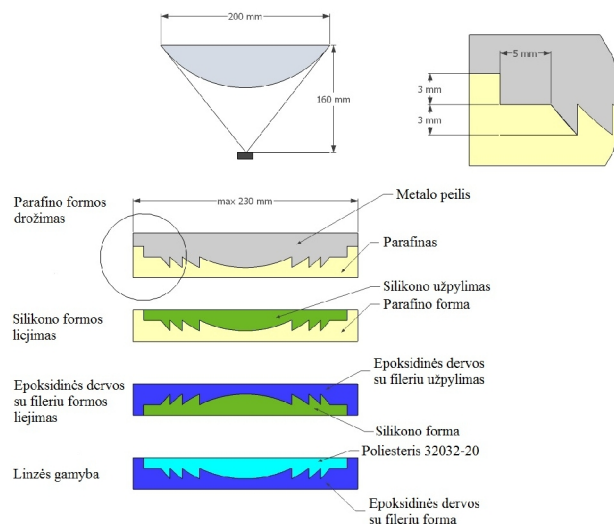
Fresnelio lęšis yra pagamintas iš *PolyLite 32032-20* bespalvės poliesterinės dervos. Tai optiškai skaidri derva, stabilizuota ultravioletiniais spinduliais bei modifikuota akrilu, gerinančiu medžiagos atsparumą išoriniams poveikiams ir jos tvirtumą.

Lęšio gamybos pradžioje pasigaminama speciali forma, ant kurios vakuuminiu būdu išliejama poliesterinė derva. Tad sudaromas formos gaminimo planas (1 pav.), gamybos procesą suskirstant etapais:

- 1) pagaminamas metalinis peilis, idealiai atitinkantis Fresnelio lęšį;
- 2) metaliniu peiliu formuojamas parafinas (gaunama lęšio iš parafino paviršiaus forma);
- 3) ant gautos parafino formos užliejamas silikonas (gaunama lęšio paviršiaus silikoninė forma);

- 4) ant silikoninės formos užliejama epoksidinė derva su užpildu (gaunama lęšio paviršiaus epoksidinė forma);
- 5) ant epoksidinės formos vakuuminiu būdu (naudojant *RTM light* vakuuminio formavimo mašiną) užliejama poliesterinė derva.

Atlikus visus minėtus procesus, gautas Fresnelio lęšis, kurio savybių tyrimų rezultatai parodyti žemiau.



1 pav. Fresnelio lęšio formavimo procedūros ir jų eiliškumas

Fig. 1. Fresnel's lens building procedures and their sequence

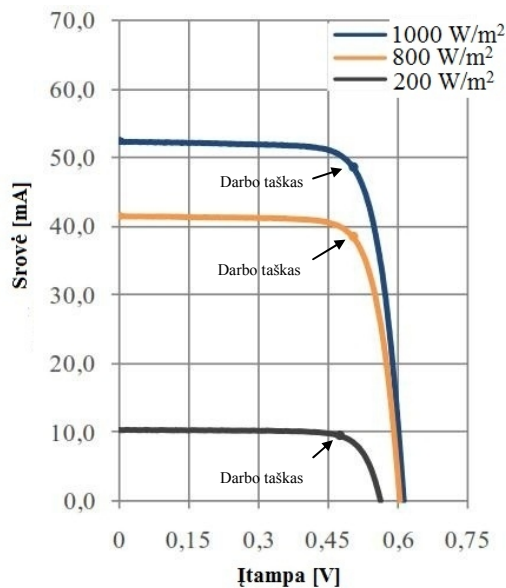
Fresnelio lęšio projektavimui naudota kompiuterinė programa „*ZeMax*“, kuria norimu židinio nuotoliu iš išgaubtojo lęšio sumodeliuojamas Fresnelio lęšis. Lęšio modelis naudojamas metalinio peilio, kuriuo drožiamas parafinas, formavimui ir gamybai.

Optinėje koncentratorinėje sistemoje naudoti „*Precizika MET SC*“ gaminami $12 \times 13 \text{ mm}^2$ ploto saulės elementai (2 pav.). Saulės elementų voltamperinė charakteristika, esant skirtingai energinei apšvietai, bei voltamperinių charakteristikų parametrai pateikti 3 pav.



2 pav. Eksperimentams naudotas silicio saulės elementas ($12 \times 13 \text{ mm}^2$): apatinis jo paviršius padengtas $3 \mu\text{m}$ storio aliuminio sluoksniu, o viršutinis paviršius su $20 \mu\text{m}$ storio variniais elektrodais

Fig. 2. A silicon solar cell used in our experiments: bottom surface, covered by $3 \mu\text{m}$ thick aluminum and top surface with $20 \mu\text{m}$ thick electrodes, manufactured by means of cooper deposition



3 pav. Tiriamojo saulės elemento voltamperinė charakteristika, išmatuota kambario temperatūroje, elementą apšvietus balta šviesa, esant įvairiai energinei apšvietai

Fig. 3. The current-voltage dependence of this solar cell measured at room temperature and illuminated by means of white light at various intensities

Kaip matyti iš 3 pav., tiriamojo saulės elemento voltamperinėse charakteristikose, išmatuotose kambario temperatūroje, įsotinta fotosužadinta elektros srovė pradeda mažėti, elektros įtampai viršijus 0,45 V vertę. Saulės elemento darbo taškas (maksimali galia) (3 pav.), įvertinamas maksimalios generuojamos saulės elementu elektrinės įtamos ir maksimalios elektros srovės, tuomet tekančios saulės elementu, stiprio sandauga, priklauso nuo elemento energinės apšvietos.

Šviesos koncentracinėms sistemoms gaminama saulės elementų matrica, kurios pagrindu (4 pav.) naudojama „ThermalClad“ firmos šilumai laidži dielektrinė plokštelė. Viršutinis plokštelės paviršius padengtas vario sluoksniu, o apatinis – aliuminio laidžiu šilumai sluoksniu, efektyviai perduodančiu saulės elemento sukauptą šilumos perteklinį kiekį aušintuvui.



4 pav. Saulės elementų matrica, naudojama optinėse koncentracinėse sistemose

Fig. 4. Array of solar cells used in optical concentrators

Toliau gamybos procese gaminamos šoninės koncentracinės sistemos kraštinės taip pat vakuuminio formavimo būdu. Hiperbolės formos kraštinės atspindi praėjusią Fresnelio lęšių išsklaidytą šviesą. Tuo tikslu vidinė kraštinės sienelės pusė padengiama šviesą atspindinčia plėvele, kurios atspindžio koeficientas matomos optinio spektro dalies ruože – 0,95. Sumontuotas šviesos koncentracinės sistemos prototipas parodytas 5 pav., o pagamintas Fresnelio lęšis – 6 pav.



5 pav. Optinis koncentраторius

Fig. 5. A view of an optical concentrator



6 pav. Fresnelio lęšis

Fig. 6. Fresnel lens

Galutiniai sumontuotos $264 \times 224 \times 198 \text{ mm}^3$ matmenų optinės koncentracinės sistemos (5 pav.) su sumontuotu $260 \times 210 \times 5 \text{ mm}^3$ matmenų Fresnelio lęšiu (6 pav.) svoris 1,17 kg. Toks lęšio storis (5 mm) pasirenkamas dėl mechaninio atsparumo. Pagamintos koncentracinės sistemos maksimali šviesos koncentracija („geometric concentration ratio“) „saulėmis“ siekia 13 „saulių“.

Toliau atliekami optinio pralaidumo ir lūžio rodiklio tyrimai bei matuojamos sistemos voltamperinės charakteristikos, siekiant įvertinti tikrąjį Fresnelio lęšio šviesos koncentracijos koeficientą.

3. Poliesterinės dervos optinio pralaidumo tyrimo rezultatai

Poliesterinės dervos $110 \times 110 \text{ mm}^2$ bandinių (7 pav.) optinio pralaidumo matavimai atlikti dviejų kanalų spektrometru „Lambda 35 UV/VIS“.

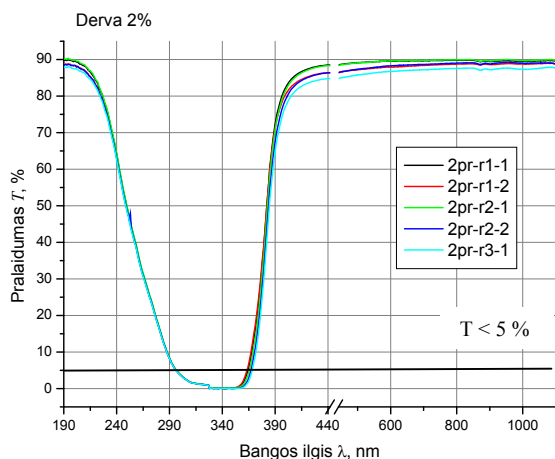


7 pav. Poliesterinės dervos 4,9 mm storio bandinys 2 pr

Fig. 7. Polyester resin 4,9 mm thick sample 2pr

Tirti bandiniai buvo dviejų rūšių: Nr. 2 pr – bandinys, turintis 2 proc. kietiklio (metiletilketono – MEK) (7 pav.) ir Nr. 4 pr – bandinys, turintis 4 proc. kietiklio. Eksperimentiškai nustatyta, kad naudojant didesnį kietiklio kiekį, Fresnelio lęšis deformuojasi. Pagrindinė priežastis – didesnis kietiklio kiekis sąlygoja spartesnę dervos kietėjimą, sukuriantį deformaciją. Todėl optinio pralaidumo ir lūžio rodiklio matavimai buvo atlikti tik su bandiniais Nr. 2pr ir Nr. 4 pr.

Į sukalibruoto spektrometro bandiniams skirtą kanalą įdedamas tiriamasis bandinys ir matuojamas šviesos intensyvumas atraminiame ir bandinio kanaluose įvairiuose bangų ilgiuose, intervale $190 \text{ nm} < \lambda < 1100 \text{ nm}$. Šviesos pralaidumas apskaičiuotas imant santykį signalų, išmatuotų fotojutikliais, įmontuotais bandinio ir atraminiame spektrometro kanaluose. Abu bandiniai didesni nei spektrometro šviesos dėmė, tad šviesos pralaidumo matavimus buvo galima atlikti keliose bandinio vietose, taip įvertinant galimą eksperimento paklaidą. Bandinio Nr. 2 pr., kurio storis 4,9 mm (artimas Fresnelio lęšio storiui), tyrimo rezultatai parodyti 8 pav.



8 pav. Poliesterinės dervos su 2 proc. kietiklio optinio pralaidumo spektras, išmatuotas kambario temperatūroje

Fig. 8. The optical transmittance spectrum of polyester resin with a 2% hardener measured at room temperature

Bandinio minimalus optinis pralaidumas $T < 5$ proc. (t.y. didžiausia optinė sugertis) stebimas ultravioletinių bangų ilgių ruože $298 \text{ nm} < \lambda < 365 \text{ nm}$. Maksimalus optinis pralaidumas (80 – 90 proc.) stebimas bangų ilgių ruože nuo 400 iki 1100 nm, taip pat ruože $\lambda < 210 \text{ nm}$. Pastebėtina, jog optinis pralaidumas nedaug tesiskiria skirtingose plokštelės vietose. Skirtumus galima būtų susieti su nevienodu dervos skaidrumu įvairiose bandinio vietose, sąlygojančiu nevienodą šviesos sklaidą arba matavimo paklaidomis, atsiradusiomis dėl netikslios bandinio orientacijos, kritusios šviesos atžvilgiu.

Už stiprios sugerties (t.y. mažo optinio pralaidumo) savybę ultravioletinių bangų ilgių ruože atsakinga organinė Fresnelio lęšio medžiagos dalis, kurios atomuose vyksta valentinių elektronų $\pi \rightarrow \pi^*$ šuoliai (Norman 1981). Čia π užpildytas elektroninis lygmuo, o

π^* – neužpildytas. Tokios rūšies elektronų šuolių vyksmas pasireiškia stipria šviesos sugertimi 300 nm bangų ilgių diapazone (Norman 1981) ir eksperimentiškai buvo stebėtas daugelyje karbonilinių junginių, kurių atstovas – poliesterinė derva, naudojama šiame darbe Fresnel lęšio gamybai.

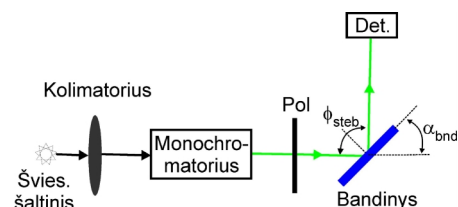
4. Poliesterinės dervos lūžio rodiklio tyrimo rezultatai

Lūžio rodiklis buvo matuotas dviem būdais. Pirmuoju būdu matuojamas tiriamojo bandinio optinis storis d_{opt} , panaudojant optinį mikroskopą ir mikrometrų dydžio poslinkius (minimalaus postūmio padalos vertė 10 μm) matuojantį staliuką. Bandinys dedamas ant minėto staliuko mikroskopu stebint ryškų bandinio viršutinį (arba apatinį) paviršius. Poslinkius matuojantį staliuką suregulavus taip, kad mikroskopo okuliare ryškiai matytųsi antrasis (t.y. apatinis (arba viršutinis)) bandinio paviršius, išmatuojamas bandinio optinis storis d_{opt} . Palyginus bandinio optinį storį su tikroju storiu, išmatuotu slankmačiu (ar mikrometru), apskaičiuojamas medžiagos lūžio rodiklis iš sąryšio:

$$n = \frac{d}{d_{opt}}. \quad (3)$$

Poliesterinės dervos parametras d_{opt} buvo matuotas, esant skirtingos spalvos apšvietai: baltai šviesai (baltos spalvos šviesos diodas) bei 486 nm, 589 nm ir 656 nm bangos ilgio šviesai, išgaunamai juostiniais filtrais, kurių optinio pralaidumo juostos plotis neviršija 8 nm.

Antrasis medžiagos lūžio rodiklio matavimo būdas parodytas 9 pav.



9 pav. Medžiagos lūžio rodiklio matavimo optinė schema

Fig. 9. The measurement scheme of material's refractive index

Į bandinį krenta monochromatinė poliarizuota šviesa, kurios elektrinio vektoriaus svyravimai orientuoti statmenai spindulio kritimo ar atspindžio plokštumai. Esant Briusterio kampui α_{bnd} (9 pav.), išmatuojamas atspindžio kampas $\phi_{steb}/2$. Lūžio rodiklis skaičiuojamas iš formulės:

$$n = \tan\left(\frac{\phi_{min}^{steb}}{2}\right). \quad (4)$$

Pirmuoju metodu išmatuotos skirtingų bandinių bei stiklo (matavimo patikimumui patikrinti) lūžio rodiklių

vertės, panaudojant skirtingos spalvos apšvietą, pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. Poliesterinės dervos medžiagos bandinių Nr. 2 pr. ir 4 pr. lūžio rodikliai

Spalva	2pr	4pr	Stiklas
Balta šviesa	1,57	1,63	1,52
$\lambda=486 \text{ nm}$	1,56	1,59	-
$\lambda=551 \text{ nm}$	1,55	1,63	-
$\lambda=589 \text{ nm}$	1,57	1,63	-
$\lambda=656 \text{ nm}$	1,60	1,60	-

Iš Briusterio kampo matavimų taip pat gautas medžiagos lūžio rodiklis $n = 1,57$, artimas stiklo lūžio rodikliui. Todėl buvo manyta, jog paruošta poliesterinė derva gali būti naudojama Fresnelio lęšio gamybai.

5. Saulės elemento elektrinių savybių tyrimai

Voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos matuotos elektrinių matavimų įranga, įmontuota saulės šviesos simulatoriuje „QuickSun 120CA“ (10 pav.).

Simulatoriaus parametrai:

- ksenoninė lempa su AM1.5G filtru;
- +/- 2 % apšvietos vienodumu;
- apšvietos lygis pasirenkamas nuo 200 iki 1200 W/m².



10 pav. Saulės simulatorius „QuickSun 120CA“

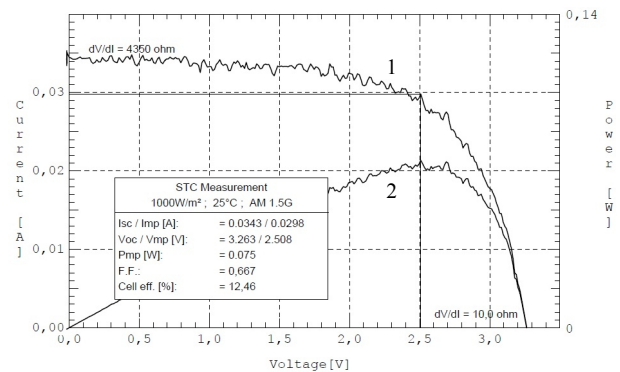
Fig. 10. Solar simulator „QuickSun 120CA“.

Iš pradžių matuojamos fotoelementų matricos (4 pav.) be šviesos koncentratoriaus voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos (11 pav.), paskui – visos šviesos koncentratorinės sistemos (12 pav.). Matavimų rezultatai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Matavimų rezultatai

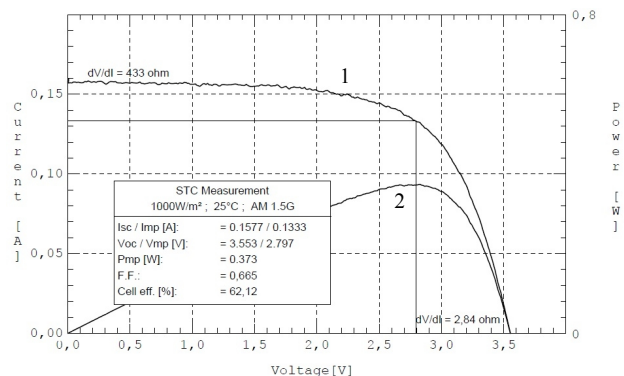
	I_{SC} , A	I_{mp} , A	V_{OC} , V	V_{mp} , V	P_{mp} , W	FF, %	E, %
Fotoelementų matrica	0,03	0,03	3,26	2,51	0,07	66,7	12,5
Šv. konc. sistema	0,16	0,13	3,55	2,80	0,37	66,5	62,1

Čia I_{SC} – trumpojo jungimo srovė, I_{mp} – maksimali srovė, V_{OC} – atvirosios grandinės įtampa, V_{mp} – maksimali įtampa, P_{mp} – maksimali galia, FF – užpildymo faktorius, E – efektyvumas.



11 pav. Fotoelementų matricos voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

Fig. 11. The electrical characteristics (1 – VA, 2 – VW) of photovoltaic array



12 pav. Šviesos koncentratorinės sistemos su Fresnelio lęšiu voltamperinė (1) ir voltvatinė (2) charakteristikos

Fig. 12. The electrical characteristics (1 – VA, 2 – VW) of concentrated photovoltaic system with Fresnel lens

Iš 11 ir 12 paveiksluose ir 2 lentelėje pateiktų duomenų galima įvertinti pagamintos optinės koncentratorinės sistemos su Fresnelio lęšiu šviesos koncentravimo laipsnį:

$$C \approx \frac{P_{mp}(konc)}{P_{mp}} \approx \frac{0,37}{0,07} \approx 5,29, \quad (5)$$

kuris didesnis nei 5 „saulės“. Tačiau tokios sistemos maksimalus koncentravimo laipsnis, kaip mūsų jau buvo minėta anksčiau, gali būti net 13 „saulių“.

Pagrindinė priežastis, dėl kurios pagamintu Fresnel lęšiu nebuvo pasiektas maksimalus šviesos koncentravimo laipsnis – tai lęšio prototipo matmenų ir geometrinės formos paklaida, lyginat jį su kompiuteriu sumodeliuotu lęšiu, o taip pat ir oro burbuliukai ir tarpeliai, susidarę poliesterinėje dervoje lęšio formavimo metu, kurie sklaido į lęšį krintančią šviesą. Tad siekiant padidinti šviesos koncentracijos lęšiu laipsnį, reikėtų dar tobulinti

gamybos procesą, t.y. naudoti geresnės kokybės formas, tinkamiau jas apdirbti (poliruoti, šlifuoti) ar lieti. Geresni rezultatai pasiekiami lęšio gamybos procese naudojant karšto presavimo ir kompiuteriu valdoma frezavimo įrangą. Tačiau tokios įrangos panaudojimas reikalauja didesnių gamybos sąnaudų.

Tolimesniuose darbuose galima būtų eksperimentuoti ieškant tobulesnių Fresnelio lęšio formų, t.y. juos gaminant storesnius, ilgesnius ir platesnius iš tobulesnių nei šiame darbe panaudotų medžiagų. Kol kas neegzistuoja tokia poliesterinė derva, pasižyminti maža optine sugertimi ultravioletinių spindulių ruože ir tuo pačiu negeltonuojanti, lęšį eksponuojant saulės šviesoje. Tačiau akivaizdu, kad tokias optines koncentratorinės sistemas galima pritaikyti kuriant modernias mažas fotoelektrinės energijos jėgaines, kartu įdiegiant ir saulės sekimo sistemą, kuri galėtų padidinti sistemos našumą. Atsižvelgiant į lęšio darbo režimą ir senėjimo spartą (t.y. saulėtų dienų skaičių), lęšius jėgainėje reiktų reguliariai keisti.

6. Išvados

Regimoje spektro dalyje skaidri poliesterinė derva su 2 proc. ir 4 proc. kietiklio gali būti naudojama Fresnelio lęšiui optinėse koncentratorinėse sistemose. Eksperimentiškai išmatuota sukurtos optinės koncentratorinės sistemos su Fresnelio lęšiu, pagamintu iš minėtos poliesterinės dervos, viršija 5 „saulės“, tačiau gali būti padidinta iki 13 „saulių“, jei būtų galima išvengti dervos stingimo metu susidarančių oro burbuliukų ir tarpelių, sklaidančių krintančią į lęšį šviesą bei išgauti tikslesnę lęšio prototipo formą, geriau atitinkančią kompiuteriu sumodeliuotą jos analogą.

Taip pat šiame darbe eksperimentiškai nustatyta, jog poliesterinė derva geltonuoja, ilgesnį laiką ją eksponuojant ultravioletiniuose spinduliuose. Todėl Fresnelio lęšiai, naudojami mažose fotoelektrinėse jėgainėse su optiniais koncentratoriais, turėtų būti reguliariai keičiami, atsižvelgiant į jų eksponavimo trukmę.

Literatūra

Antonini, A. 2010. Photovoltaic Concentrators – Fundamentals, Applications, Market & Prospective. Chapter 2. „Cpower Srl“, Italy. From book: „Solar collectors and Panels, Theory and Applications“, 444 p.

Benitez, P.; Juan, C.; Minano Juan, C.; Zamora, P. 2010. High performance Fresnel-based photovoltaic concentration. Optics Express, 18 (S1) A25: 25-40.

Gallagher, S. J.; Norton, B.; Eames, P. C. 2007. „Quantum Dot Solar Concentrators: Electrical Conversion Efficiencies and Comparative Concentrating Factors of Fabricated Devices“. Solar Energy, 81:813-821.

Kwangsun, Ryu; Jin-Geun, Rhee; Kang-Min, Park; Jeon, Kim. 2006. „Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system“. Solar Energy, 80: 1580-1587.

Luque, A.; Hedegus, S. 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd. England. 1117 p.

Miller, David C.; Gedvilas, Lynn M.; To, Bobby; Kennedy, Cheryl E.; Sarah, R. Kurtz. 2010. Durability of Poly(Methyl Methacrylate) Lenses Used in Concentrating Photovoltaic Modules, NREL/CP-520-47604 Conference Paper.

Norman S. A. 1981. A study of the light absorption properties of polymer films using UV-visible derivative spectroscopy. Polymer Photochemistry, 1(1): 43-55.

Ornaghi Jr., H. L.; Bolner, A. S.; Fiorio, R.; Zattera, A. J.; Amico, S. C. 2010. „Mechanical and dynamic mechanical analysis of hybrid composites molded by resin transfer molding“. Journal of Applied Polymer Science, 118 (2): 887-896.

RESEARCH OF FRESNEL LENS FOR CONCENTRATION SOLAR PV SYSTEMS

P. Gailiūnas, G. Jakimavicius, A. Jukna

Summary

Concentrated PV system with Fresnel lens has been designed and investigated. Fresnel lens in this system used for focusing and directing a sunlight onto surface of solar cell which converts optical energy into electric energy. Searching for minimal cost of technology the Fresnel lenses are usually made of transparent plastics (e.g. polymethylmethacrylate, polymethylacrylate etc.) by means of hot pressing or using a computer-controlled milling equipment. This work presents the Fresnel lens has been made by means of vacuum forming method (RTM – Resin Transfer Molding). Based on results of optical transmittance and refractive index measured in the range of visible light wavelengths for Fresnel lens and results of measurements of current-voltage and voltage-power characteristics for solar cells used in the concentrated PV system, the degree of light concentration by Fresnel lens has been determined. Some discussions regarding possible applications of concentrated PV systems containing the Fresnel lens as well as possible ways of improvements of concentrated PV systems are given in current work.

Keywords: Fresnel lens, concentrated PV system, optical transmittance, refraction index, light concentration, resin transfer molding.