

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS  
FAKULTĀTE  
FIZIKAS NODAĻA

**SAULES PANEĻU EFEKTIVITĀTE LATVIJAS KLIMATĀ**

BAKALaura DARBS

Autors: **Viktorija Leimane**

Studenta apliecības Nr.: vl16047

Darba vadītājs: Dr. Phys. Andris Jakovičs

RĪGA 2019

## ANOTĀCIJA

Darba mērķis ir noteikt efektīvāko saules paneļu izvietojuma veidu Latvijai tipiskos meteoroloģiskajos apstākļos. Balstoties uz divu veidu saules paneļiem, kas novietoti piecās dažādās telpiskajās orientācijās Latvijas Universitātes Botāniskā dārza teritorijā, tiks noteikta solāro paneļu efektivitātes atkarība no mainīgiem parametriem: 1) meteoroloģiskie apstākļi 2) telpiskā orientācija 3) gada mēnesis 4) solāro paneļu tips.

Iegūtie monitoringa rezultāti tiks analizēti kontekstā ar šo paneļu efektivitātes fizikālo novērtējumu.

**Atslēgas vārdi:** Saules enerģijas paneļi, atjaunojamo energoresursu enerģija, vides monitorings

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to determine the most efficient way of solar panel arrangement for typical weather conditions in Latvia. Based on two types of solar panels placed in five different spatial orientations in the University of Latvia Botanical Garden area, the dependency of the efficiency of solar panels on following variable parameters will be established: 1) meteorological conditions 2) spatial orientation 3) month of year 4) type of solar panels.

The results of monitoring will be analyzed in the context of a physics based assessment of the effectiveness of these panels.

**Keywords:** Solar panels, renewable energy, environmental monitoring

## SATURS

APZĪMĒJUMU SARAKSTS .....	4
IEVADS .....	5
1 LITERATŪRAS APSKATS .....	6
1.1 Definīcijas .....	6
1.2 Saules apstarojums.....	6
1.3 Klimats Latvijā.....	10
1.4 Saules paneļi .....	10
2 REZULTĀTI UN DISKUSIJA.....	12
2.1 Saules apstarojums.....	12
2.2 Saules paneļi .....	15
SECINĀJUMI.....	20
PATEICĪBAS .....	21
IZMANTOTĀ DARBA LITERATŪRA UN AVOTI .....	22

## APZĪMĒJUMU SARAKSTS

TSI - Kopējais saules apstarojums,  $\text{Wm}^{-2}$

SSI - Saules spektrālais apstarojums,  $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$

$G_{sc}$  - Solārā konstante,  $\text{Wm}^{-2}$

PV - Saules fotoelements

PVOUT – Saules fotoelementa potenciālā jauda,  $\text{kWh/kWp}$

GHI – Globālais horizontālais apstarojums,  $\text{kWh/m}^2$

DIF – Difūzais horizontālais apstarojums  $\text{kWh/m}^2$

GTI – Globālais apstarojums virsmi optimālā slīpumā,  $\text{kWh/m}^2$

OPTA – Optimālais slīpums enerģijas ieguves maksimizēšanai gada griezumā, °

DNI – Direct normal irradiation,  $\text{kWh/m}^2$

### radiometri

ACRIM - Aktīvā Dobuma Radiometrs Apstarojuma Monitoringam (Active Cavity Radiometer for Irradiance Monitoring) ACRIMSAT - Aktīvā Dobuma Radiometra Apstarojuma Monitorin-  
ga Satelīts (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor Satellite) VIRGO - Saules apstarojuma  
variabilitāte un gravitācijas oscilācijas (Variability of solar Irradiance and Gravity Oscillations)  
organizācijas NOAA - Okeanoloģijas un atmosfēras valsts pārvalde (National Oceanic and At-  
mospheric Administration) NASA - Nacionālā aeronautikas un kosmosa administrācija (National  
Aeronautics and Space Administration)

## **IEVADS**

Vispirms tiek aplūkota Saules emitētā starojuma daba un ģeometriskie apsvērumi - virziens, no kura staru kūlis sasniedz virsmu, leņķis uz virsmas un laika gaitā saņemtais starojuma daudzums. Tiek apskatīta atmosfēras ietekme uz virsmas saņemto saules starojumu, un tās praktiskā nozīme, apstrādājot pieejamos Saules starojuma datus, lai aprakstītu radiācijas gadījumus uz virsmas dažādās orientācijās.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

## 1.1. Definīcijas

**Saules plankums** - magnētiskās plūsmas koncentrācija bipolāros klāstros vai grupās, kas novērojama kā tumšs plankums uz Saules fotosfēras.

**Saules plankumu cikls** - aptuveni 11 gadus ilga kvaziperiodiska variācija saules plankuma skaitlī. Magnētiskā lauka polaritātes modelis mainās ar katru ciklu.

**Saules plankuma skaitlis** - Dienas saules plankuma aktivitātes indekss ( $R$ ), definēts kā  $R = k(10 \cdot g + s)$ , kur  $s$  - individuālo plankumu skaits;  $g$  - saules plankumu grupu skaits;  $k$  - observatorijas faktors.

**SSI** - saules spektrālais starojums vai spektra enerģijas blīvums - saules jaudas izkliede uz virsmas laukuma vienību.

**TSI** - Saules starojuma absolūtās intensitātes mērījums integrēts visā saules enerģijas diskā un visā saules enerģijas spektrā.

Beam Radiation - the solar radiation received from the sun without having been scattered by the atmosphere (also known as direct solar radiation) Diffuse Radiation - the solar radiation received from the sun after its direction has been changed by scattering by the atmosphere

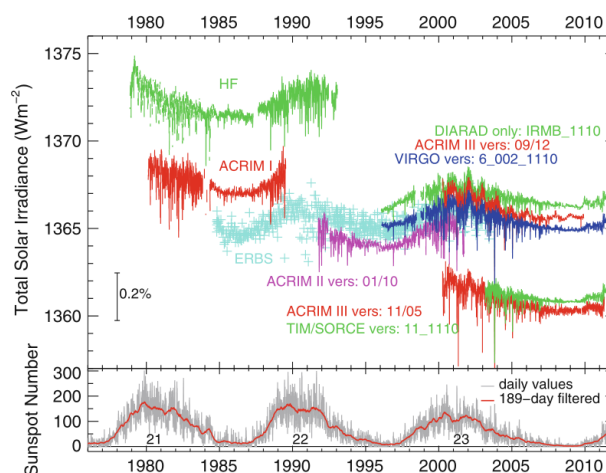
Irradiance - the rate at which radiant energy is incident on a surface per unit area of surface, W/m<sup>2</sup>

ātrums kurā starojuma enerģija ir

## 1.2. Saules apstarojums

Lielākā daļa Saules emitētās enerģijas tiek saražota kodolreakcijās fotosfērā. Kopējais saules apstarojums (TSI) ir saņemtā enerģija laika vienībā uz laukuma vienības perpendikulāri starojuma izplatīšanās virzienam 1 AU attālumā integrēta pa visiem viļņu garumiem.[1] Kopējā saules apstarojuma vērtība mainās laikā, korelē ar Saules plankumu ciklu 1.1 un norāda uz solārās radiācijas izmaiņām, kas ietekmē solārās enerģijas apjomu uz Zemes atmosfēras augšējiem slāņiem. Papildus ir noderīgi zināt saņemtā starojuma spektrālo sadalījumu – 1.2 redzams, ka aptuveni puse starojuma tiek saņemta 380 – 780 nm diapazonā, kas padara iespējumu no tā iegūt enerģiju ar saules paneļu paņēmieni.

TSI novērojumi no kosmosa tiek veikti kopš 1978. gada un instrumentu specifikas dēļ iegūtas dažādas absolūtās vērtības 1.1, tāpēc šī fizikālā lieluma tikai daļēji pārkājušos novērojumu laikrindu apvienošana kompozītā ir gan zinātnisks, gan statistisks izaicinājums un neviens kompozīts (piemēram, PMOD, ACRIM, IRBM) līdz šim nav guvis konsensu solārā apstarojuma pētnieku kopienā. 1.1



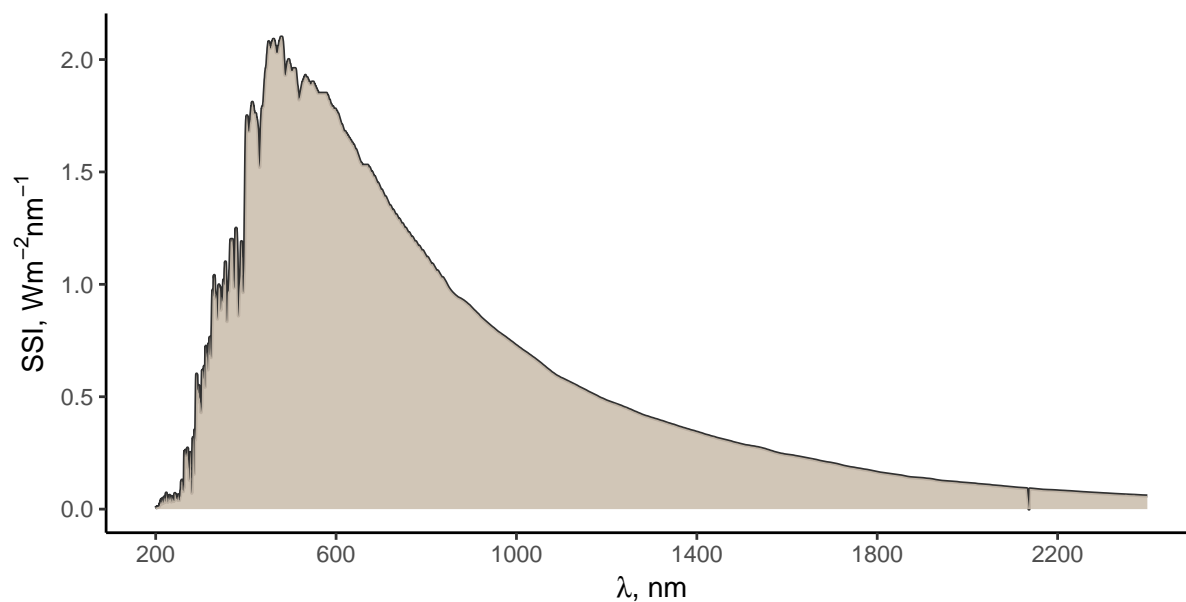
**1.1. att. Salīdzinājums dienā vidējiem saules kopējā apstarojuma datiem no dažādām misijām un Saules plankuma skaitlis, lai ilustrētu solārās aktivitātes variabilitāti trīs ciklos. [2]**

Par labāko saules apstarojuma mērījumu reprezentāciju tiek uzskatīti TIM instrumenta dati mērāparāta uzbūves (atšķirībā no citiem radiometriem TIM precizitātes apertūra atrodas tuvu dobumam un redzeslauku bloķējošā apertūra ir pie instrumenta ieejas) un augstās precizitātes – nenoteiktība tiek novērtēta esam mazāk nekā  $0.014 \text{ Wm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  un precizitāte ar  $0.48 \text{ Wm}^{-2}$  [3] – dēļ, tāpēc šajā darbā grafiki balstās uz šiem mērījumiem, pēc kuriem absolūtā kopējā saules apstarojuma vērtība ir  $1360.8 \pm 0.5 \text{ Wm}^{-2}$ . [2]



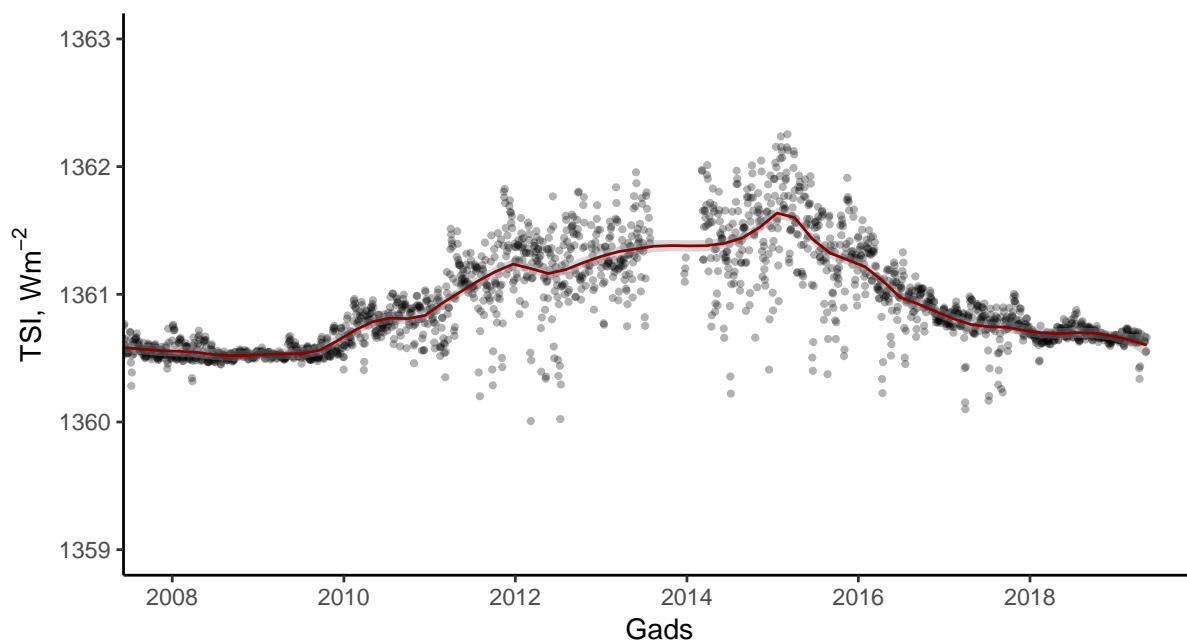
**TSI mērījumu vēsture**

radiometrs	misija	darbības laiks
Hickey-Frieden	NIMBUS-7	1978–1992
ACRIM I	Solārā Maksimuma Misija (SMM)	1980–1989
ACRIM	Zemes Radiācijas Budžeta Satelīts (ERBS)	1984–2003
ACRIM II	Augšējās Atmosfēras Izpētes Satelīts (UARS)	1991–2001
VIRGO	Solārā un Heliosfēras observatorija (SOHO)	1996–pašlaik
ACRIM III	ACRIMSAT	2000–pašlaik
TIM	Saules Radiācijas un Klimata Eksperiments (SORCE)	2003–pašlaik

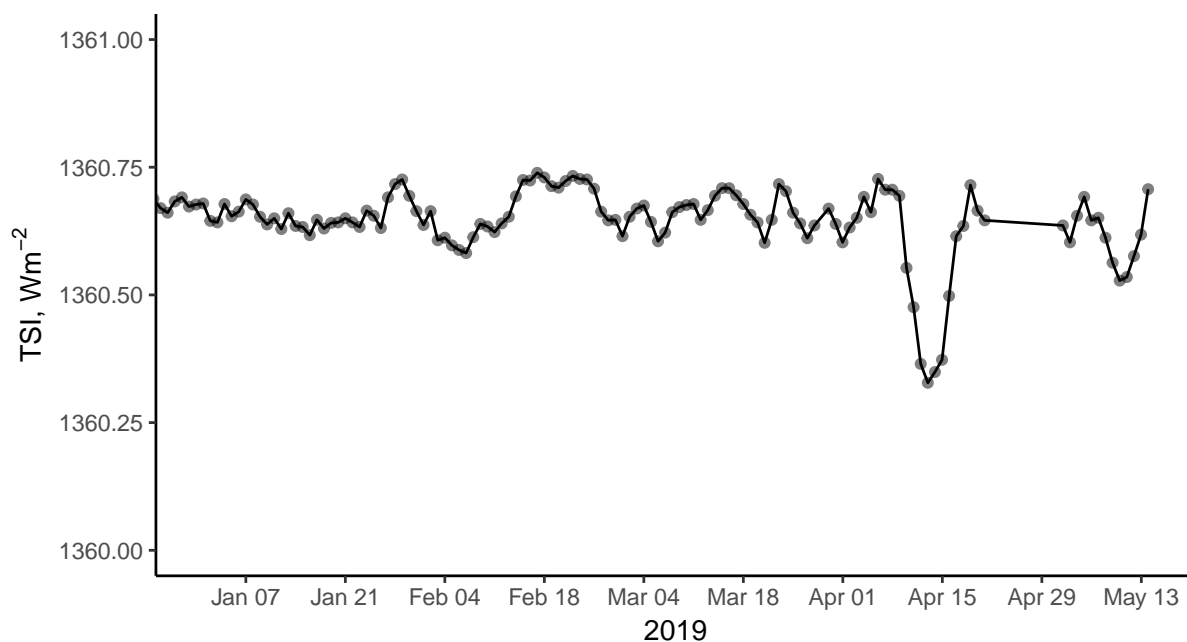


2019-01-13

**1.2. att. SSI 1AU attālumā (24 h vidējā vērtība) [4]**



*1.3. att. TSI 24. saules ciklā 1AU attālumā (24 h vidējā vērtība)[3]*



*1.4. att. TSI izmaiņas solāro paneļu datu ieguves laikā 1AU attālumā (24 h vidējā vērtība)[3]*

### 1.3. Klimats Latvijā

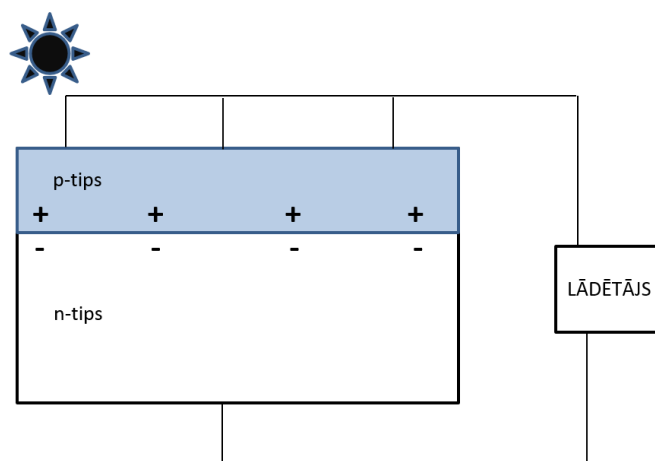
Enter antagonists. Mākoņi. Bloķē daudz saules apstarojuma. Cik LV mākoņainu dienu?

Izanalizēt VTPMML meteo datus no 2013. Pajautāt Stasim kļūdas.

### 1.4. Saules paneļi

Saules paneļi sastāv no fotoelementiem, kas pārveido gaismas enerģiju elektriskajā enerģijā. Fotoelements, kura uzbūves shēma ir parādīta 1.5. attēlā, ir p-n pāreja ar elektriskiem kontaktiem, kas pieslēgti pie lādētāja vai citas enerģijas patērētāja. Fotoelementa apakšējā daļa sastāv no n-tipa pusvadītāja, kurā lādiņa pamatnesēji ir elektroni, bet augšējā daļa — no p-tipa pusvadītāja, kur lādiņa pamatnesēji ir caurumi.

Fotoelementa darbība balstās uz iekšējo fotoelektrisko efektu — parādību, kad elektrons tiek ierosināts ar gaismas kvantu un pāriet no valences zonas uz vadītspējas zonu. Kad tas notiek augšējā slānī (p-tipa pusvadītājā), elektrons atgrūžas no robežas starp slāņiem, kura ir negatīvi lādēta rekombinācijas dēļ. Negatīvi lādēta (no p-tipa pusvadītāja puses) robeža rada potenciālu starpību, kas veicina elektronu kustību pa vadiem uz patērētāju, tādā veidā radot elektrisko strāvu.



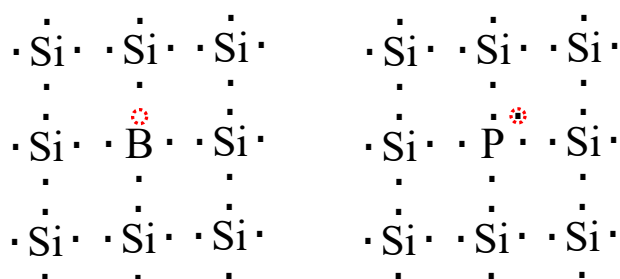
**1.5. att. Saules paneļa shēma. Tas sastāv no fotoelementiem, kuru augšējais slānis veidots no p-tipa pusvadītāja, bet apakšējais — no n-tipa pusvadītāja.**

P-tipa un n-tipa pusvadītāja īpašības var panākt, piemēram, dopējot silīcija kristālu ar attiecīgi III vai V grupas elementiem. Ja silīcija kristālam pievieno bora atomus nelielā koncentrācijā,

izveidojas 1.6. att. pa kreisi redzamā situācija. Katram Si atomam ir četri elektroni ārējā čaulā, ar kuru palīdzību atoms izveido četras kovalentās saites ar četriem citiem atomiem. Savukārt bors, būdams III grupas elements, var izveidot tikai trīs saites. Tādā veidā pie bora atoma parādās "caurums" — nenoslēgta kovalentā saite, kas attēlā apzīmēta ar sarkanu līniju. Uz šo vietu var pārvietoties kāds no blakus esošiem elektroniem, bet tad neaizpildīta vieta parādīsies pie blakus esošā atoma. Tādā veidā var uzskatīt, ka caurums "pārvietojas", un nosaukt to par pozitīvo lādiņa nesēju. Šādus pusvadītājus sauc par p-tipa pusvadītājiem.

Ja silīcija kristālam pievieno fosfora atomus, izveidojas pretēja situācija — pie P atoma parādās elektrons, kas nepiedalās saites veidošanā (sk. att. 1.6., pa labi). Lai pārvietotos, brīvajam elektronam ir nepieciešams mazāk enerģijas nekā elektroniem, kas veido kovalentās saites starp Si atomiem. Tātad, lādiņa pamatnesēji n-tipa pusvadītājos ir elektroni, un šādus pusvadītājus sauc par n-tipa pusvadītājiem.

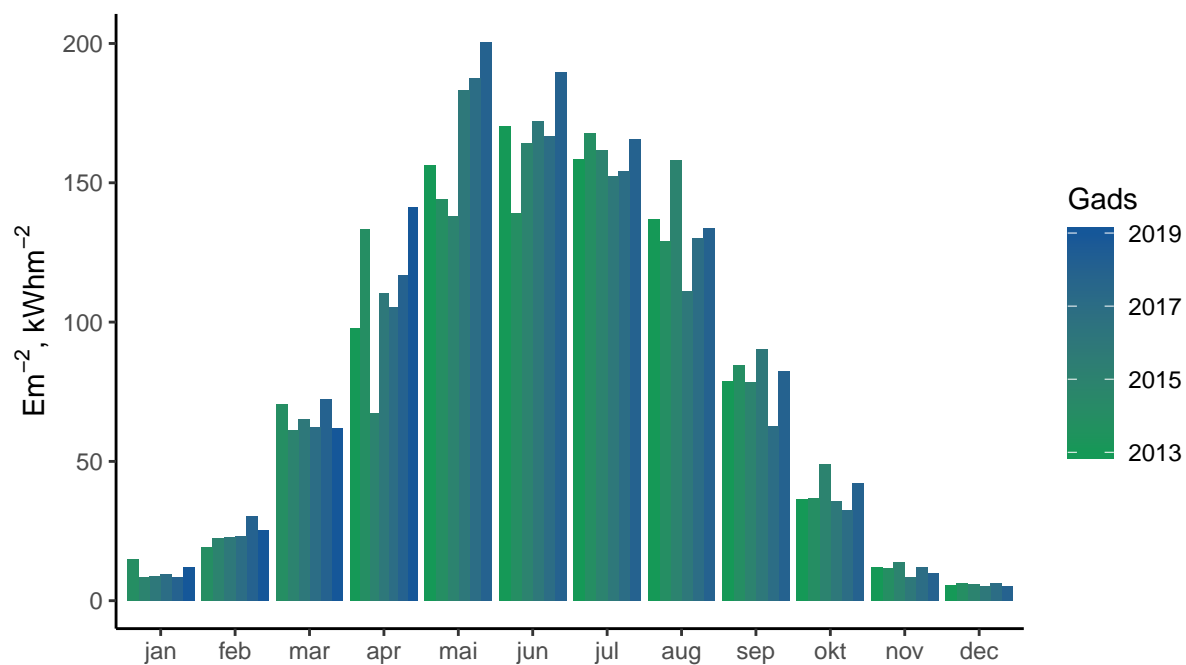
Dopējot divus blakus esošus Si kristāla apgabalus dažādā veidā, iegūst p-n pāreju. Uz robežas starp apgabaliem elektroni no n-tipa apgabala var difūzijas ceļā nokļūt uz p-tipa apgabalu un aizpildīt tos caurumus, kas atrodas pietiekami tuvu. To sauc arī par elektronu-caurumu rekombināciju. Tādā veidā p-tipa pusvadītāja mala uzlādējās negatīvi.



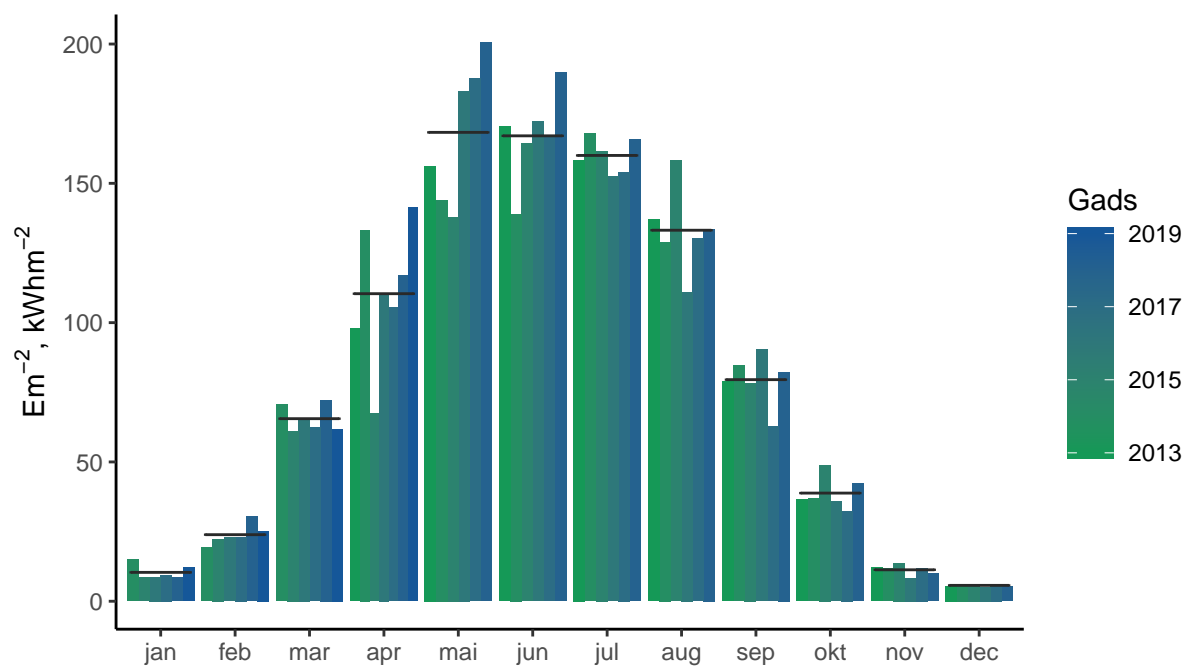
**1.6. att. Silīcija kristāla 2D izklājums, atomu ārējās čaulas elektroni ir apzīmēti ar punktiem. Pievienojot bora atomu, iegūst p-tipa pusvadītāju (pa kreisi), bet fosfora atomu — n-tipa pusvadītāju (pa labi).**

## 2. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

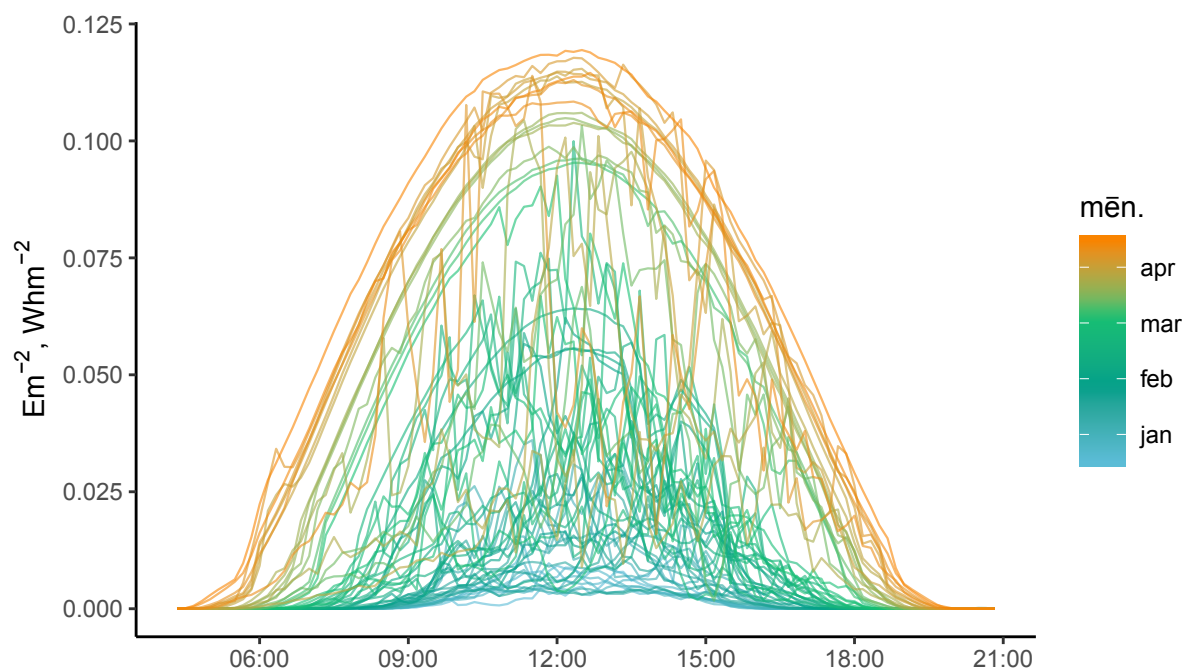
### 2.1. Saules apstarojums



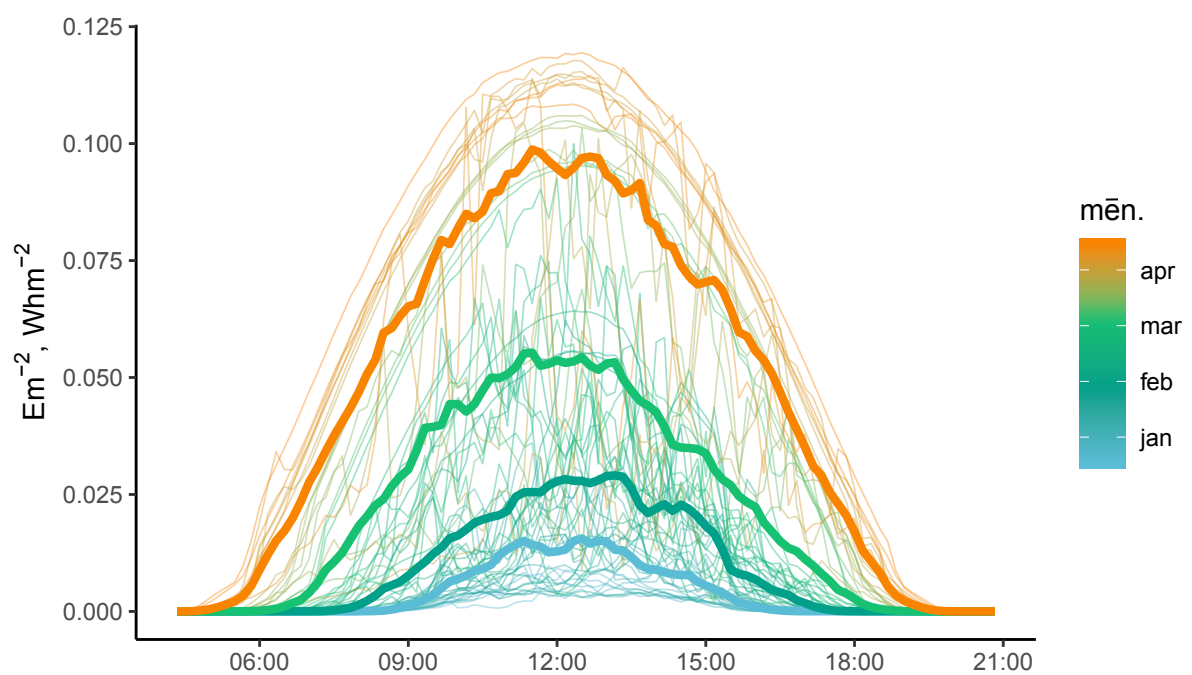
2.1. att. Solārā apstarojuma laika integrāļa atšķirības gada gaitā. LU Meteoroloģiskās stacijas dati 2013 – 2019 periodā.



2.2. att. Solārā apstarojuma laika integrāla atšķirības gada gaitā un to vidējās vērtības. LU Meteoroloģiskās stacijas dati 2013 – 2019 periodā.



2.3. att. Solārā apstarojuma izmaiņas dienas gaitā. LU Meteoroloģiskās stacijas dati 2019-01-01 – 2019-04-31 periodā.



2.4. att. Mēnesī vidējotas solārā apstarojuma izmaiņas dienas gaitā. LU Meteoroloģiskās stacijas dati 2019-01-01 – 2019-04-31 periodā.

## 2.2. Saules paneļi

2.1. tabula

**JA tipa paneļu saražotā enerģija uz kvadrātmetru**

E, Whm <sup>-2</sup>	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90	meteo
jan	346.66	227.28	716.37	2461.00	2802.04	12138.68
feb	3198.12	2742.33	4266.63	6448.71	5989.95	25142.93
mar	8222.23	7397.80	9472.24	11938.03	8717.90	61764.12
apr	19886.40	19230.18	23268.02	25425.75	18249.96	141410.71

2.2. tabula

**JA tipa paneļu efektivitāte**

E	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90
jan	0.03	0.02	0.06	0.20	0.23
feb	0.13	0.11	0.17	0.26	0.24
mar	0.13	0.12	0.15	0.19	0.14
apr	0.14	0.14	0.16	0.18	0.13
vid	0.11	0.10	0.14	0.21	0.18



2.3. tabula

**JA tipa paneļu efektivitāte procentos**

E, %	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90
jan	2.86	1.87	5.90	20.27	23.08
feb	12.72	10.91	16.97	25.65	23.82
mar	13.31	11.98	15.34	19.33	14.11
apr	14.06	13.60	16.45	17.98	12.91
vid	10.74	9.59	13.67	20.81	18.48

2.4. tabula

**LG tipa paneļu saražotā enerģija uz kvadrātmetru**

E, Whm <sup>-2</sup>	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90	meteo
jan	495.5	347.83	950.75	2816.81	3215.06	12138.68
feb	4431.55	3625.5	5046.58	8253.64	7413.21	25142.93
mar	10916.97	9267.88	11271.89	15694.83	11337.26	61764.12
apr	27632.28	25460.2	29136.2	34213.52	23176.05	141410.71

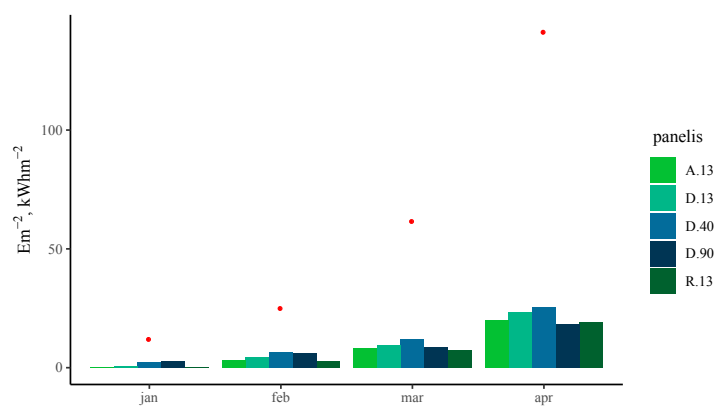
2.5. tabula

**LG tipa paneļu efektivitāte**

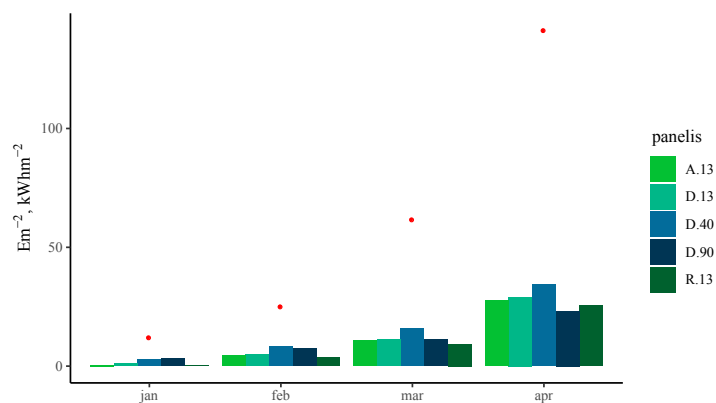
E	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90
jan	0.04	0.03	0.08	0.23	0.26
feb	0.18	0.14	0.20	0.33	0.29
mar	0.18	0.15	0.18	0.25	0.18
apr	0.20	0.18	0.21	0.24	0.16
vid	0.15	0.13	0.17	0.26	0.23

**LG tipa paneļu efektivitāte procentos**

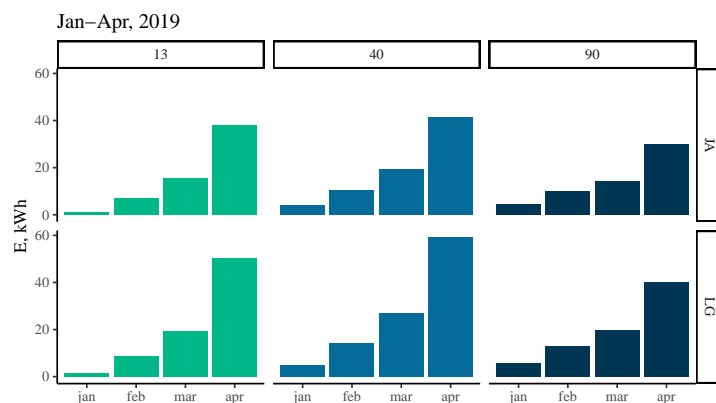
E, %	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90
jan	4.1	2.9	7.8	23.2	26.5
feb	17.6	14.4	20.1	32.8	29.5
mar	17.7	15.0	18.2	25.4	18.4
apr	19.5	18.0	20.6	24.2	16.4
vid	14.7	12.6	16.7	26.4	22.7



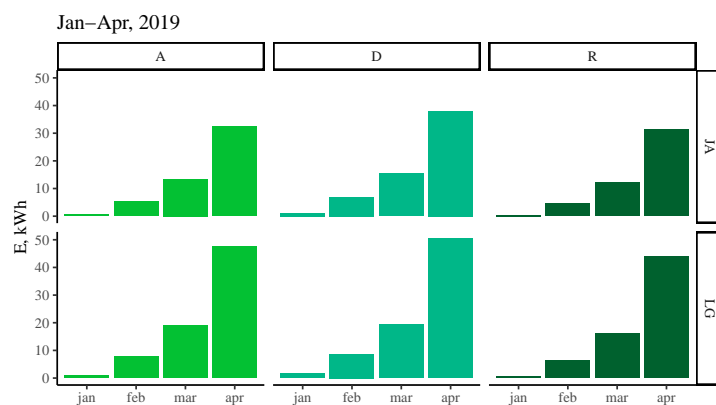
2.5. att. JA



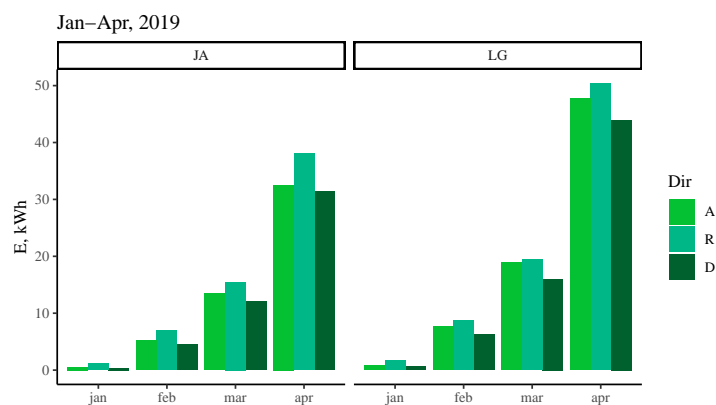
2.6. att. LG



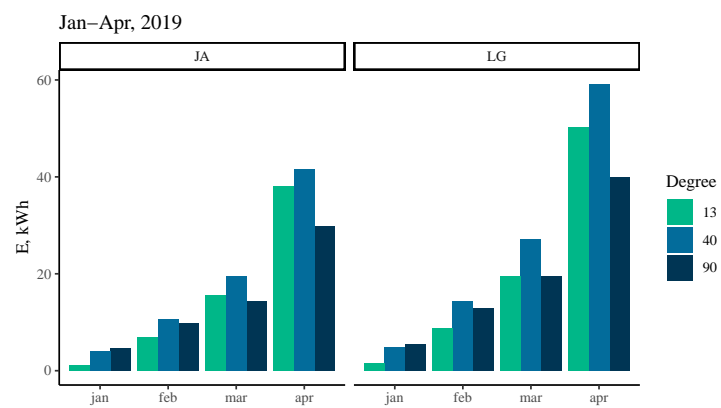
2.7. att. D virziena paneļu atkarība no lēnķa



2.8. att. Paneļu ražīguma atkarība no virziena



2.9. att. JA un LG atkarība no virziena



2.10. att. JA un LG atkarība no lēnķa

## **SECINĀJUMI**

## **PATEICĪBAS**

Pateicos paroksetīnam, xanax, GNU/Linux, Pētera Draguna dzejas krājumam 'Tumšās stundas', Tarvi Verro for teaching me git, Valtam Krūmiņam un Annai Bulei par emocionālo atbalstu, Paulīnai Lodbrukai un Pēterim Ratniekam par ticību maniem spēkiem, Žeņam par kucēnu video, Solvitai par maģiju un Cilvēkam par pacietību. Paldies Aleksandrai Elbakjanai par sci-hub. Paldies "Puratos Latvia" un Asjas un Berndta Everts piemiņas fondam par stipendiju studiju laikā.

Darbs veikts ar Eiropas Reģionālās attīstības fonda projekta "Viedo risinājumu gandrīz nulles enerģijas ēkām izstrāde, optimizācija un ilgtspējas izpēte reāla klimata apstākļos" Nr ESS2017/209 1.1.1.1/16/A/192 finansiālo atbalstu.

## IZMANTOTĀ DARBA LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] John A. Duffie; William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. izdev. Wiley, 2013. ISBN: 9780470873663. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=84481e599cbcd1e3c70f82b3c1379d1c>.
- [2] Claus Fröhlich. „Total Solar Irradiance Observations”. *Surveys in Geophysics* 33.3 (2012), lpp. 453—473. ISSN: 1573-0956. DOI: 10.1007/s10712-011-9168-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9168-5>.
- [3] Greg Kopp. *SORCE Level 3 Total Solar Irradiance Daily Means, version 018*. Tehn. ziņ. Skatīts: 2019-05-22. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Earth Science Data un Information Services Center (GES DISC), 2019. DOI: doi : 10.5067/D959YZ53XQ4C. URL: [http://lasp.colorado.edu/data/sorce/tsi\\_data/daily/sorce\\_tsi\\_L3\\_c24h\\_latest.txt](http://lasp.colorado.edu/data/sorce/tsi_data/daily/sorce_tsi_L3_c24h_latest.txt).
- [4] Erik Richard. *SORCE Level 3 Solar Spectral Irradiance Daily Means V001*. Tehn. ziņ. Skatīts: 2019-05-23. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Earth Science Data un Information Services Center (GES DISC), 2018. DOI: doi : 10.5067/TSIS/SIM/DATA302. URL: [http://lasp.colorado.edu/home/tsis/data/ssi-data/?doing\\_wp\\_cron=1558640803.1350839138031005859375](http://lasp.colorado.edu/home/tsis/data/ssi-data/?doing_wp_cron=1558640803.1350839138031005859375).

Bakalaura darbs „**Saules paneļu efektivitāte Latvijas klimatā**” izstrādāts Latvijas Universitātes **Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē**.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: \_\_\_\_\_ /author/

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr. Phys. Andris Jakovičs \_\_\_\_\_ .

Recenzents: Dr. Phys. Aivars Vembris

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā \_\_\_\_\_ .

Dekāna pilnvarotā persona: \_\_\_\_\_

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

\_\_\_\_\_.2019. prot. Nr. \_\_\_\_\_, vērtējums \_\_\_\_\_

Komisijas sekretārs: \_\_\_\_\_