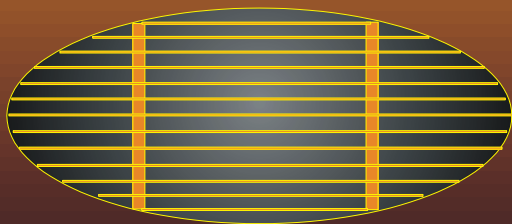


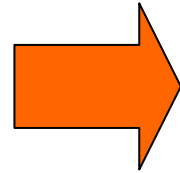
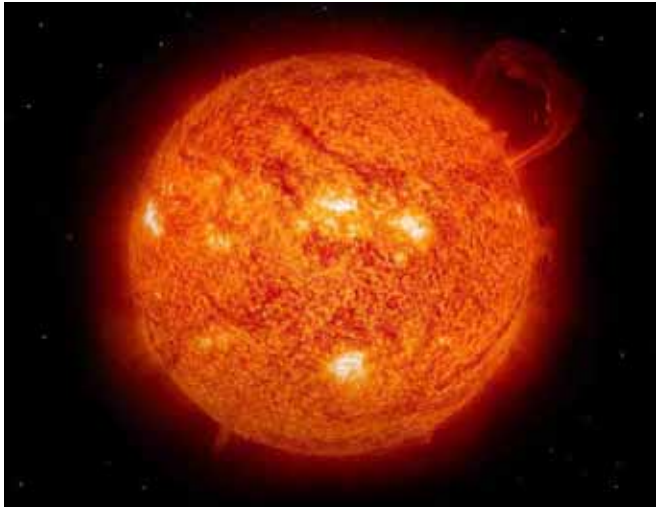


Saulės elementai

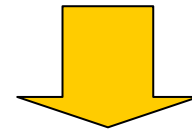
Julius Janušonis

LTC seminaras
2005 04 14

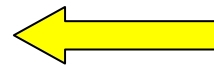




$\sim 1,4\text{kW/m}^2$



$\sim 1\text{kW/m}^2$



150W/m^2



0W

Trumpa istorija

1839 prancūzas Edmund Bacquerel eksperimentuodamas su elektrolitinėmis baterijomis, sudarytomis iš dviejų metalo plokštelių, pastebėjo, kad srovė padidėdavo bateriją apšvietus.

1877 W.G. Adams and R.E. Day stebėjo fotoefektą seleno plokštelėje. 'The action of light on selenium,' in "Proceedings of the Royal Society, A25, 113.

1883 amerikietis išradėjas Charles Fritts aprašė pirmąsias saulės baterijas, kurių pagrindas buvo Se plokštelė. Jų efektyvumas siekė 1-2%.

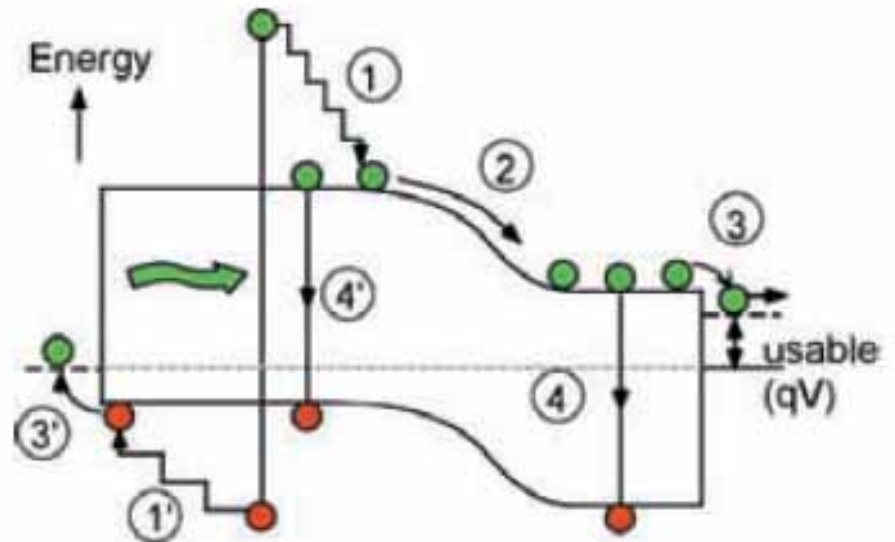
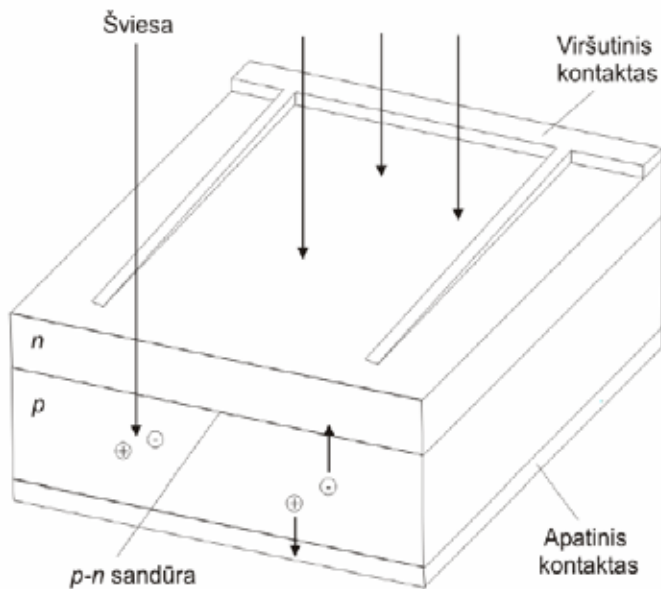
Trumpa istorija 2

Apie 1950m. Czochralski sukūrė kokybiško monokristalinio Si gamybos technologiją.

1954m. Bell Telephone Laboratories Si pagrindu pagamino saulės elementą, kurio efektyvumas siekė 4%. Praėjus neilgam laikui, jie pasiekė 11% efektyvumą

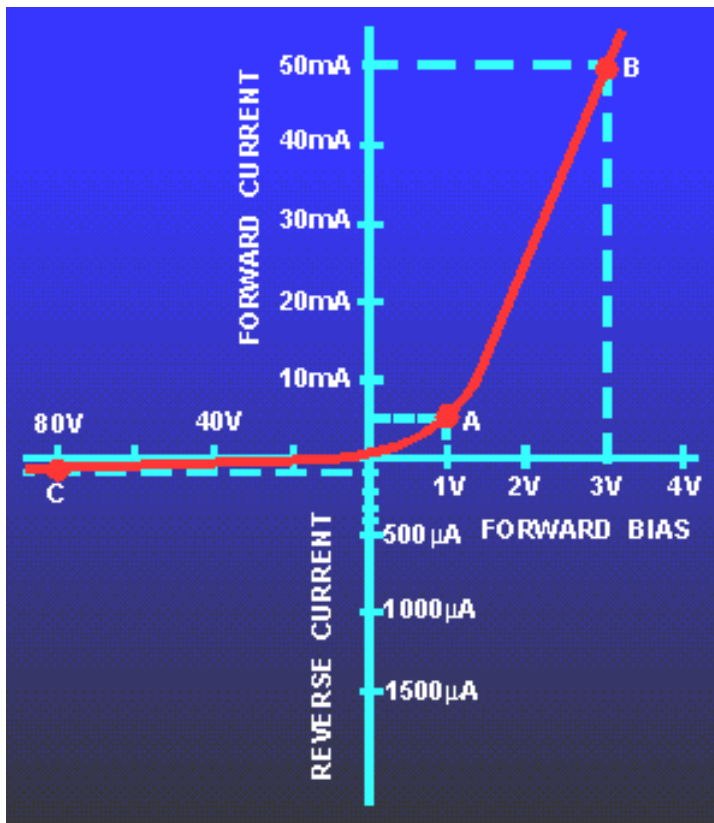
1958 the US Vanguard palydove buvo įrengtos saulės baterijos, kurios maitino palydovo radijo siųstuvą. Kosminės programos vėliau labai pasitarnavo saulės elementų technologijų vystymui.

Saulēs elemento (SE) veikimo princīpas

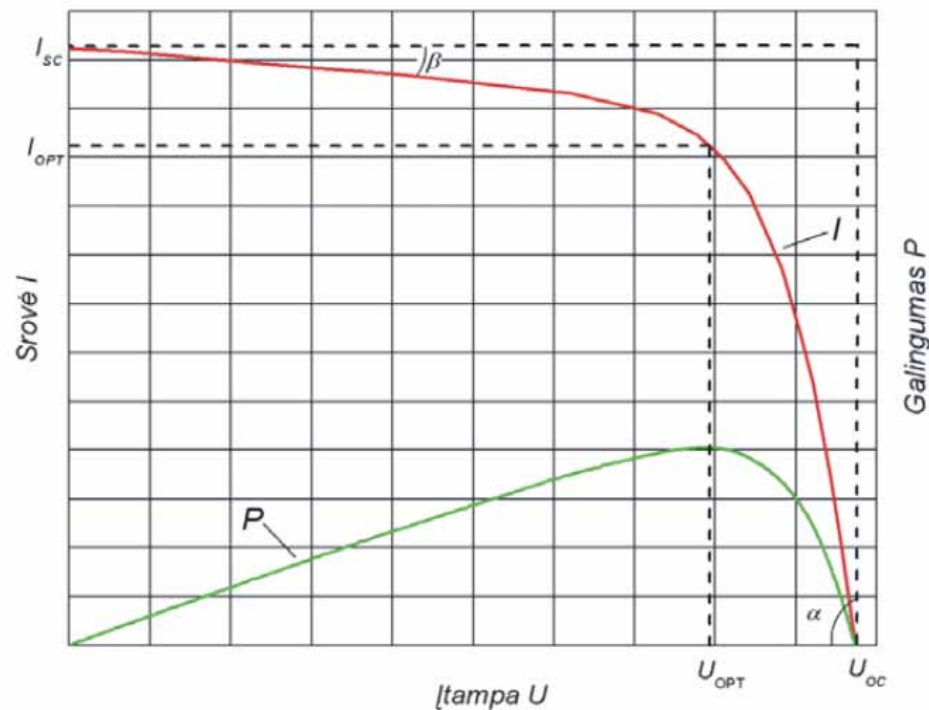


Voltamperinē charakteristika

Diodo voltamperinē
charakteristika



Saulēs elemento voltamperinē
charakteristika



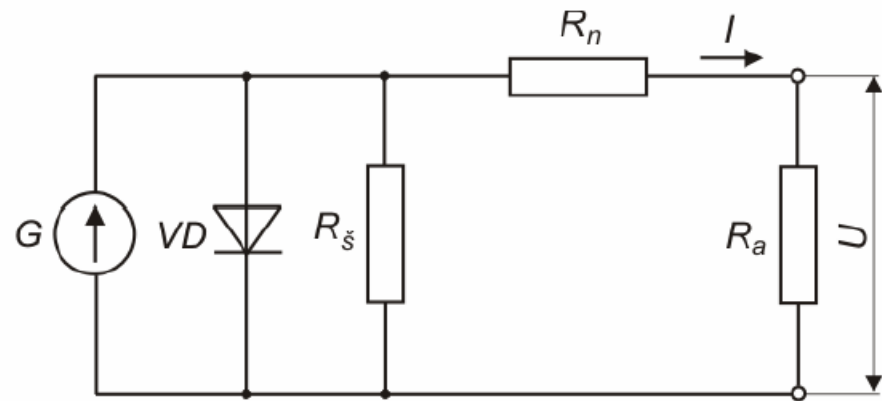
Parametrai, stipriai įtakojančys SC veikimą

Nepusiausvyrųjų krūvininkų
gyvavimo laikas

Paviršinė rekombinacija

Nuosekli varža (pn sandūros, kontaktų)

Šunto varža – pvz., nuotėkiai per plokštelės kraštus,
metalizacijos netolygumai, inversiniai kanalai



SE tipai

Monokristaliniai puslaidininkiai – Si, GaAs, InP, CdTe

Polikristaliniai puslaidininkiai – poly-Si

Amorfiniai puslaidininkiai – α -Si

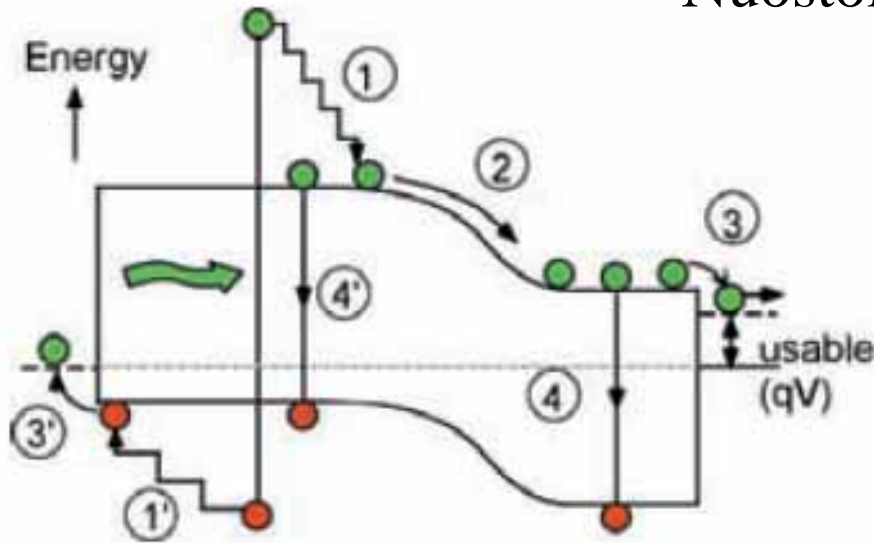
Pirma karta – monokristalinės plokštelės (wafers)

Antra karta – plonasluoksniai polikristaliniai arba amorfiniai SE

Trečia karta – polimeriniai, puslaidininkiai aktyvuoti dažais, keletas p-n sandūrų elementai, karštųjų elektronų elementai, saulės spektrą transformuojantys elementai

Pirmos ir antros kartos SE efektyvumo riba

Nuostolių mechanizmai:



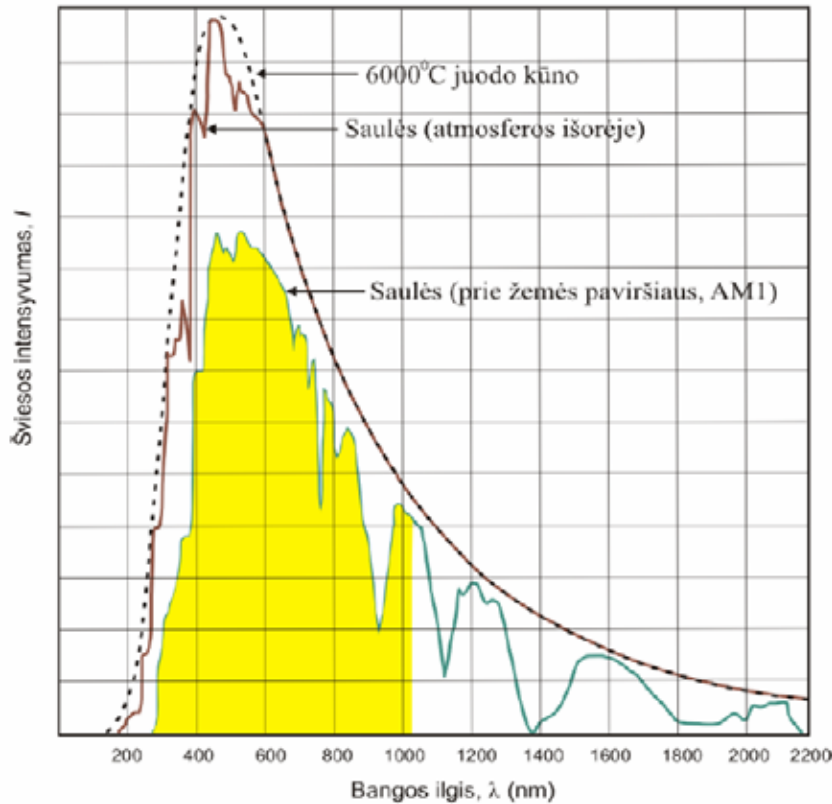
1. Termalizacija su kristaline gardele

2. p-n sandūros kontaktinė įtampa

3. Sandūros puslaidininkis – metalas kontaktinė įtampa

4. Tūriniai ir paviršiniai rekombinacijos procesai

Pirmos ir antros kartos SE efektyvumo riba



Puslaidininkis sugeria tik fotonus, kurių $E > E_g$

Si draudžiamosios juostos plotis – 1,16eV

Todėl tik ~80% saulės spektro energijos panaudojama elektronų – skylių poroms generuoti

Pirmos ir antros kartos SE efektyvumo riba

Monochromatinis pluoštas, kurio galia P_i , generuoja krūvininkų skaičių per sekundę:

$$n(\nu) = \frac{P_i(\nu)}{h\nu}$$

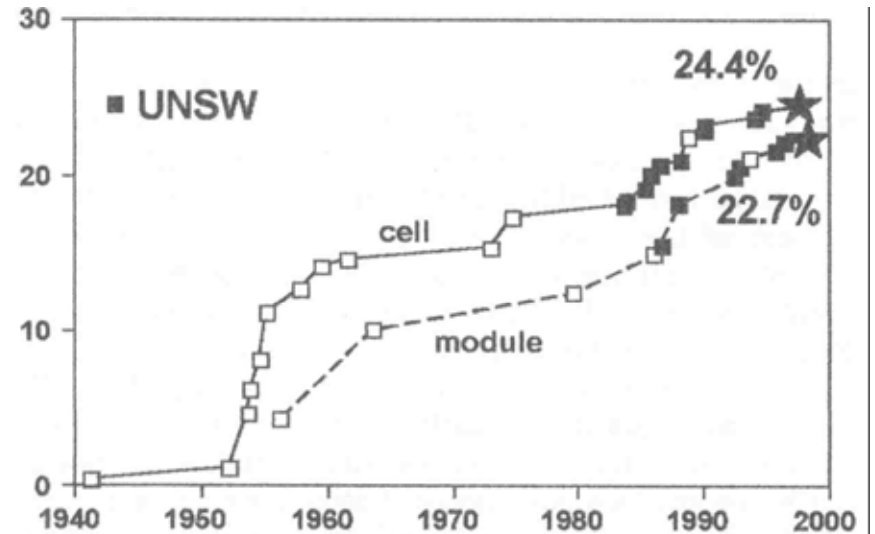
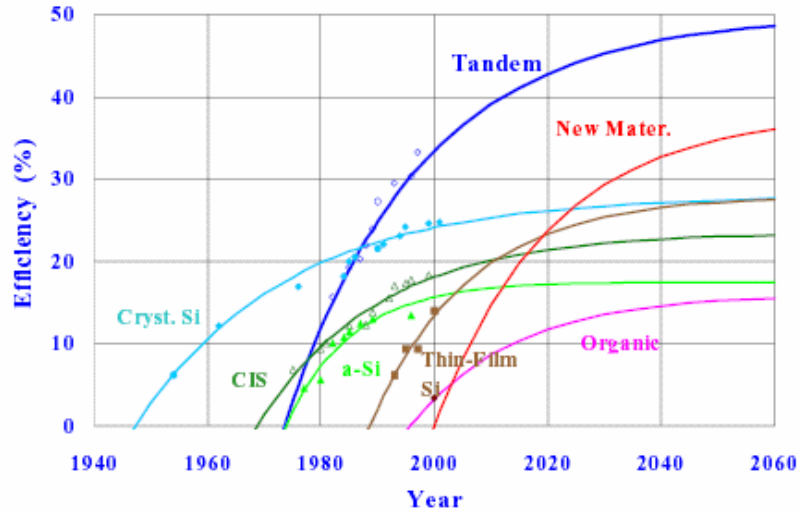
Dėl sąveikos su gardele elektronai ir skylės greitai relaksuoja į laidumo juostos dugną ir valentinės juostos viršų

$$P = n(\nu)E_g$$

Tai labiausiai “nuostolingas” procesas, kuris sumažina galimą efektyvumą iki ~44%

$$P = P_i \frac{E_g}{h\nu}$$

Trumpa istorija 3



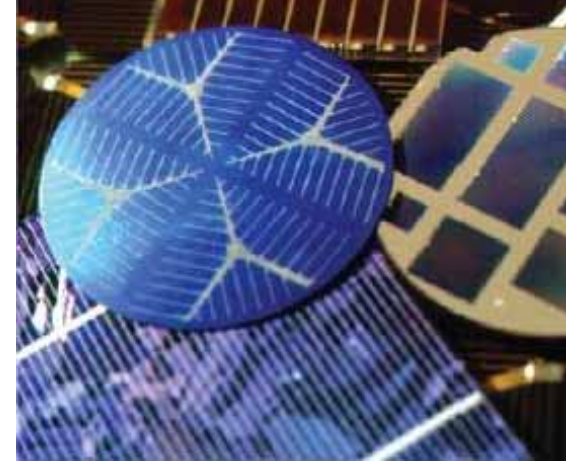
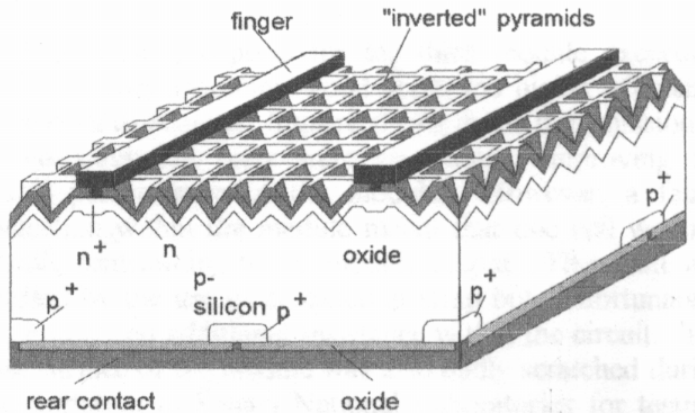
Rekordai

Classification ^a	Effic. ^b (%)	Area ^c (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF ^d (%)	Test centre ^e (and date)	Description
<i>Silicon cells</i>							
Si (crystalline)	24.7 ± 0.5	4.00 (da)	0.706	42.2	82.8	Sandia (3/99)	UNSW PERL ⁷
Si (multicrystalline)	19.8 ± 0.5	1.09 (ap)	0.654	38.1	79.5	Sandia (2/98)	UNSW/Eurosolare ⁷
Si (thin film transfer)	16.6 ± 0.4	4.017 (ap)	0.645	32.8	78.2	FhG-ISE (7/01)	University of Stuttgart (45 μm thick) ⁸
<i>III-V cells</i>							
GaAs (crystalline)	25.1 ± 0.8	3.91 (t)	1.022	28.2	87.1	NREL (3/90)	Kopin, AlGaAs window
GaAs (thin film)	23.3 ± 0.7	4.00 (ap)	1.011	27.6	83.8	NREL (4/90)	Kopin, 5 mm CLEFT ⁹
GaAs (multicrystalline)	18.2 ± 0.5	4.011 (t)	0.994	23.0	79.7	NREL (11/95)	RTI, Ge substrate ¹⁰
InP (crystalline)	21.9 ± 0.7	4.02 (t)	0.878	29.3	85.4	NREL (4/90)	Spire, epitaxial ¹¹
<i>Polycrystalline thin film</i>							
CIGS (cell)	18.4 ± 0.5 ^f	1.04 (ap)	0.669	35.7	77.0	NREL (2/01)	NREL, CIGS on glass ¹²
CIGS (submodule)	16.6 ± 0.4	16.0 (ap)	2.643	8.35	75.1	FhG-ISE (3/00)	University of Uppsala, 4 serial cells ¹³
CdTe (cell)	16.5 ± 0.5 ^f	1.032 (ap)	0.845	25.9	75.5	NREL (9/01)	NREL, mesa on glass ¹⁴
<i>Amorphous/nanocrystalline Si</i>							
Si (nanocrystalline)	10.1 ± 0.2	1.199 (ap)	0.539	24.4	76.6	JQA (12/97)	Kaneka (2 μm on glass) ¹⁵
<i>Photochemical</i>							
Nanocrystalline dye	8.2 ± 0.3	2.36 (ap)	0.726	15.8	71.2	FhG-ISE (7/01)	ECN ¹⁶
Nanocrystalline dye (submodule)	4.7 ± 0.2	141.4 (ap)	0.795	11.3	59.2	FhG-ISE (2/98)	INAP
<i>Multijunction cells</i>							
GaInP/GaAs	30.3	4.0 (t)	2.488	14.22	85.6	JQA (4/96)	Japan Energy (monolithic) ¹⁷
GaInP/GaAs/Ge	32.0 ± 1.5	3.989 (t)	2.622	14.37	85.0	NREL (1/03)	Spectrolab (monolithic)⁴
GaAs/CIS (thin film)	25.8 ± 1.3	4.00 (t)				NREL (11/89)	Kopin/Boeing (4 terminal)
a-Si/CIGS (thin film) ^g	14.6 ± 0.7	2.40 (ap)				NREL (6/88)	ARCO (4 terminal) ¹⁸

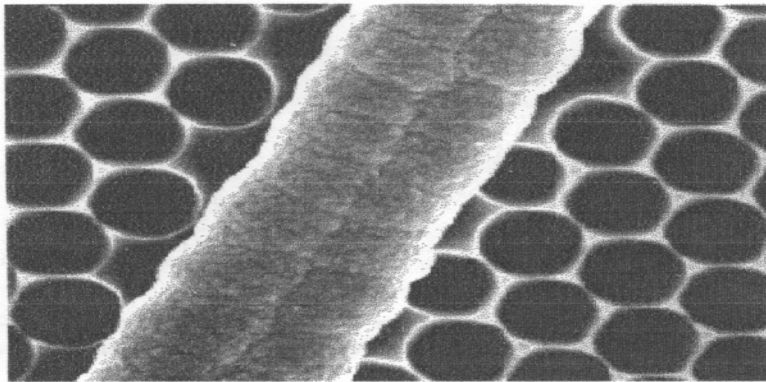
BCSC $\eta = 18\%$, BP Solar – geriausias rezultatas gamyboje

PERL

1997 m., New South Wales University,
Austalija



PERL $\eta = 22,3\%$
float-zone Si, p-tipo, $0,2\Omega\text{cm}$
tekstūruotas invertuotomis
piramidėmis
metalizacija Ti/Pd



PERL $\eta = 24\%$
tekstūruotas šešiakampiais
float-zone Si, p-tipo, $0,2\Omega\text{cm}$
metalizacija Ti/Pd

OEEO/Back OEEO

•2000 m., ISFH, Vokietija

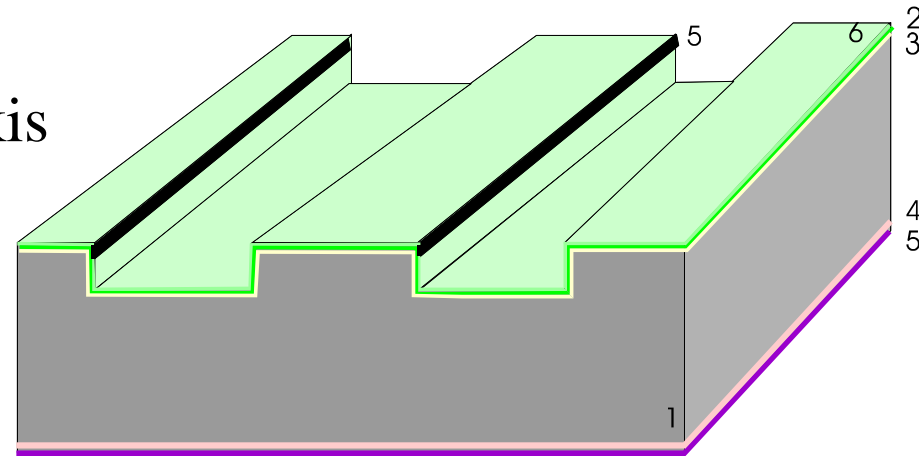
Dvipusis

Mechaniškai graviruotas

Susitapdinanti metalizacija

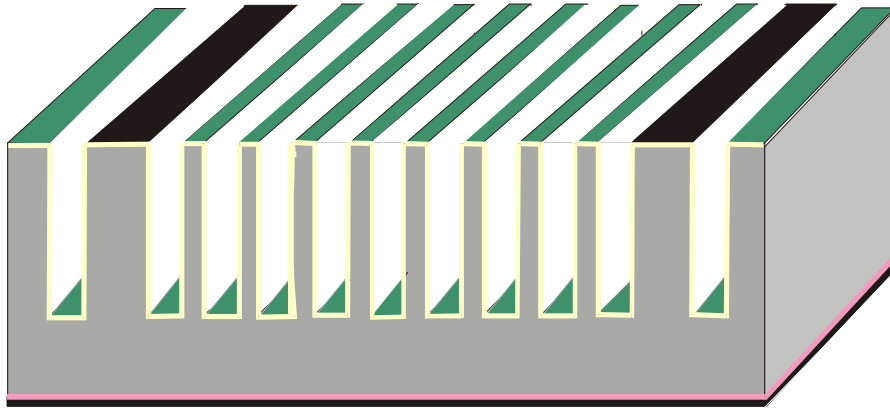
Kontakto metalas-puslaidininkis plotas labai mažas. Tai padeda išvengti rekombinacijos kontaktuose.

$$\eta = 21\%$$



Siekta maksimaliai supaprastinti technologiją

Lamella



Dvipusis SE

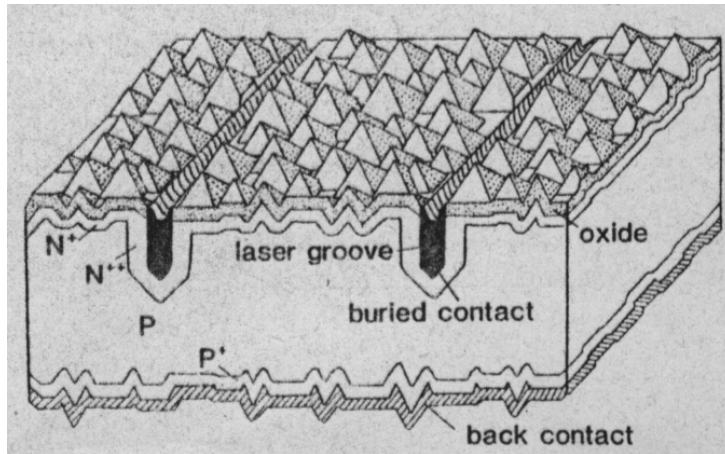
$\eta = 15\%$

Grioveliai suformuoti mechaniškai įpjaunant

Lazerių panaudojimui

Siaurų griovelių formavimas – sudėtingas uždavinys taikant įprastines metodikas

Todėl kai kuriais atvejais jie “pjaustomi” lazerio pagalba



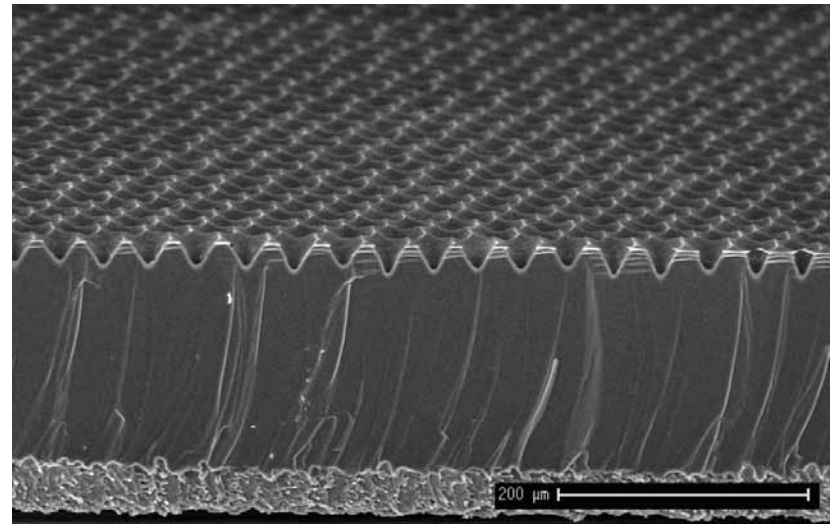
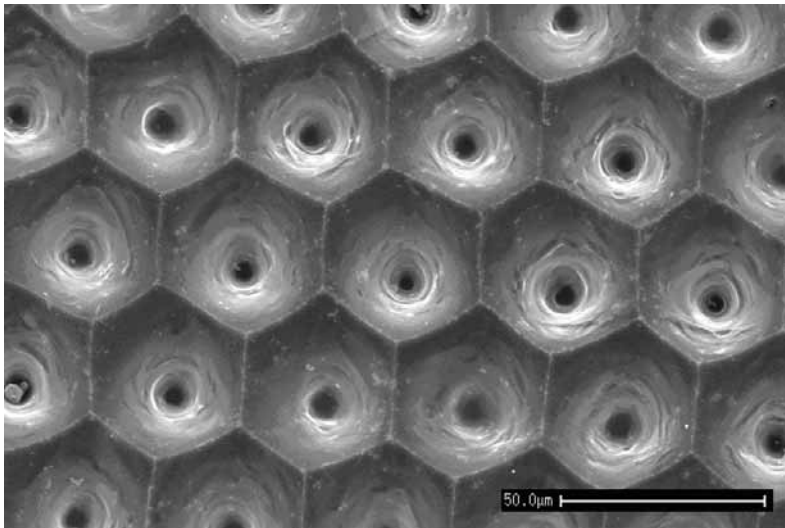
BCSC elementas $\eta=19,6\%$
gamyboje iki $\eta = 18\%$, gamintoja
BP Solar

Kitas priėjimas – lazeriu pažeidžiamas tik SiO_2 paviršinis sluoksnis, toliau griovelis ėsdinamas

Lazerinis tekstūravimas

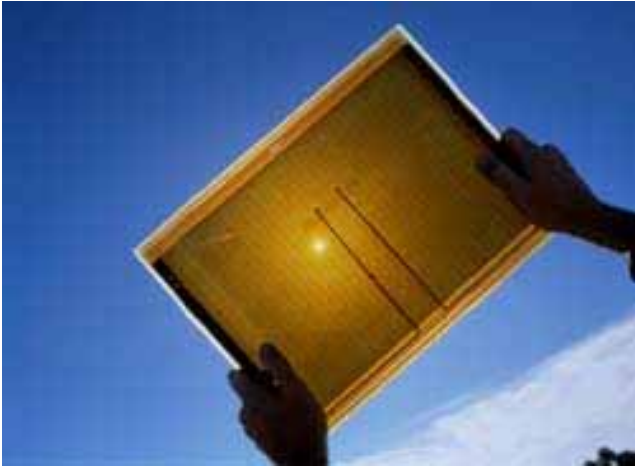
Tekstūruojant Si paviršių cheminiais metodais, rezultatas priklauso nuo kristalografinės paviršiaus orientacijos.

Tai neparanku tekstūruojant poli-Si paviršius



Išmatuotas krūvininkų gyvavimo laikas po lazerinio
Tekstūravimo - 3ms. Tai rodo, kad paviršius menkai pažeidžiamas
tekstūravimo metu

Plonasluoksniai antros kartos SE



Paprastai daroma iš α -Si

Pagrindiniai privalumai – pigus substratas, priklausomai nuo auginimo sąlygų $E_g=1..1.7\text{eV}$

Du pagrindiniai trūkumai – žemas efektyvumas ($\sim 10\%$) ir greita degradacija

Žemą efektyvumą lemia neperiodinė puslaidininkio struktūra – daug tūrinių defektų ir mažas krūvininkų gyvavimo laikas. Defektai pasyvuojami, naudojant vandenilį, bet pasyvacijos kokybė degraduoja

Termodinaminė riba

Fundamentali efektyvumo riba, nusakoma termodinamikos, yra

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Mūsų atveju $T_c \sim 300\text{K}$, $T_h \sim 6000\text{K}$

$$\eta = 95\%$$

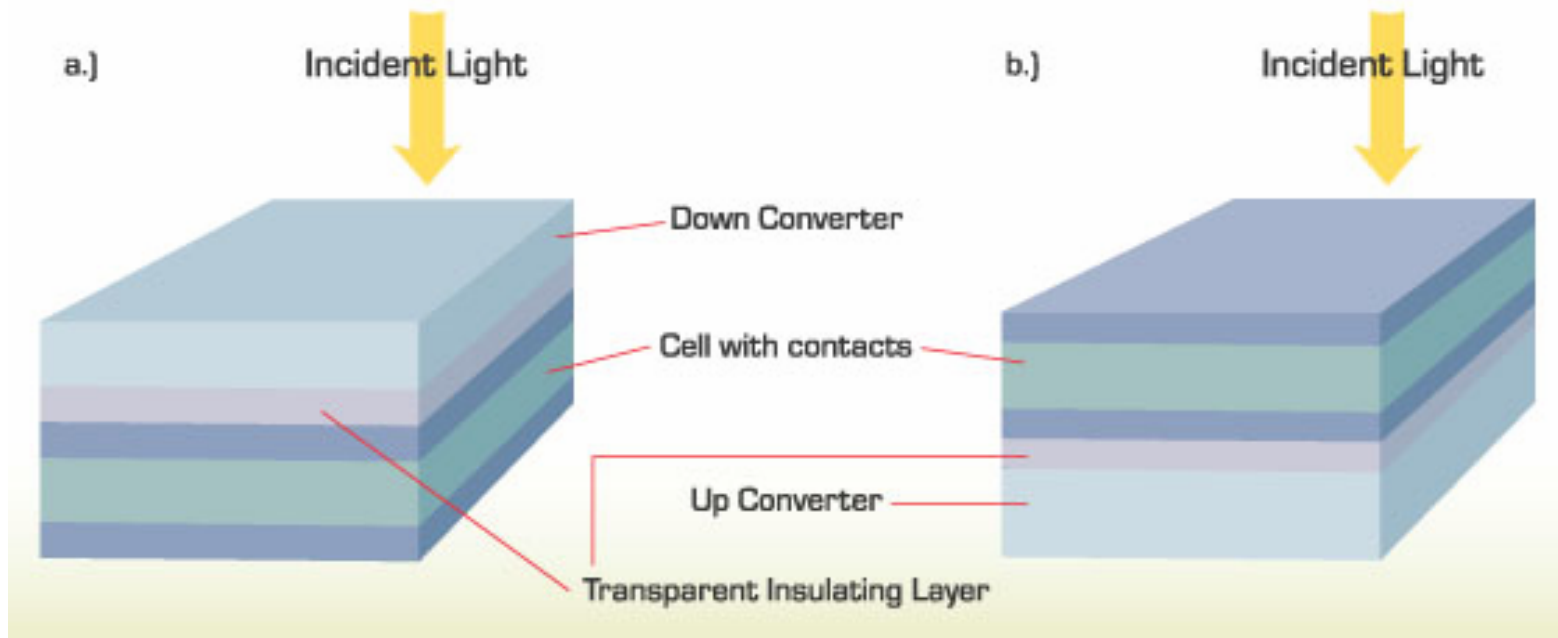
Tačiau ši riba galioja tik su sąlyga, kad visa tai, ką išspinduliuoja “aušintuvas”, patenka į “kaitintuvą” – t.y., iš saulės elemento į Saulę

Kadangi tai ne visai taip, riba bus

$$\eta = 93,3\%$$

Trečiosios kartos SC

Saulės spektrą transformuojantys SC

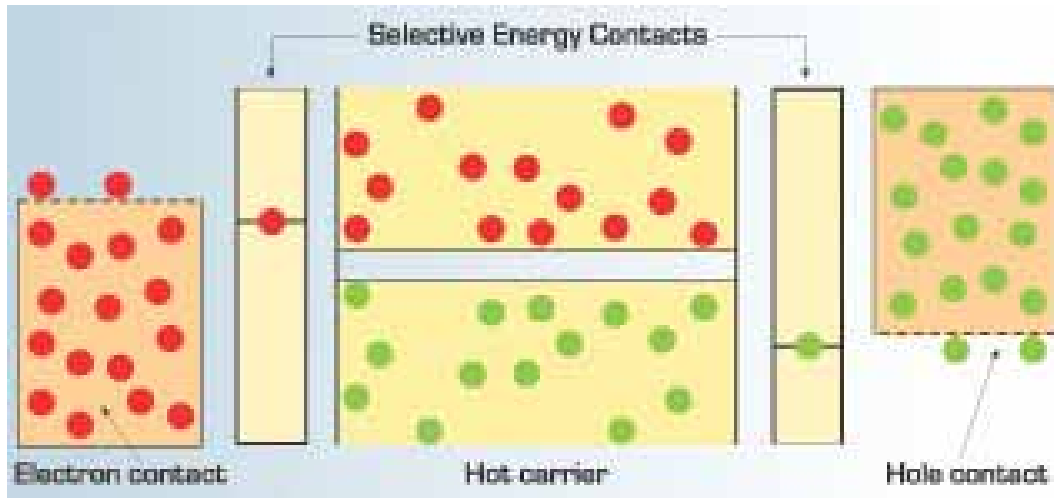


Down conversion – jei fotono $E > 2E_g$, generuojami 2 fotonai $E > E_g$

Up conversion – fotonai, kurių energija $E < E_g$, sugeriami silpnai.

Todėl padidinus jų energiją, generacijai panaudojama papildoma spektro dalis

Karštųjų elektronų SC



Děkui už děmesj