

ENERGETSKI SUSTAVI TRANSFORMACIJA ENERGIJE SUNCA

TRANSFORMACIJA ENERGIJE SUNCA

Energija SUNCA smatra se obnovljivim i ekološki prihvatljivim izvorom energije.

Gotovo svi na Zemlji dostupni oblici energije osim nuklearne energije predstavljaju energiju dobivenu transformacijom energije Sunca.

Za direktnu primjenu najpogodniji oblici energije Sunca su:

- ☐ toplinska energija (*energija toplinskog zračenja*)
- ☐ svjetlosna energija

TRANSFORMACIJA ENERGIJE SUNCA

Toplinska energija – za zagrijavanje (*direktno i indirektno putem medija*).

Najčešće se primjenjuje zagrijavanje vode ili zraka pomoću solarnih kolektora.

Solarne elektrane s parno-turbinskim postrojenjem za dobivanje električne energije.

Svjetlosna energija – energija svjetlosnog zračenja – direktna transformacija u električnu energiju pomoću fotonaponskih panela – fotonaponske solarne elektrane.

ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

Svjetlost – elektromagnetsko zračenje vidljivo ljudskom oku.

Područje vidljive svjetlosti obuhvaća svjetlost s valnom duljinom od 390 do 750 nm.

Elektromagnetsko zračenje predočava se kao roj čestica koje se nazivaju fotoni. Svaki foton nosi određenu količinu energije.

Elektromagnetski spektar predstavlja cjelokupni raspon zračenja koje nastaje u svemiru.

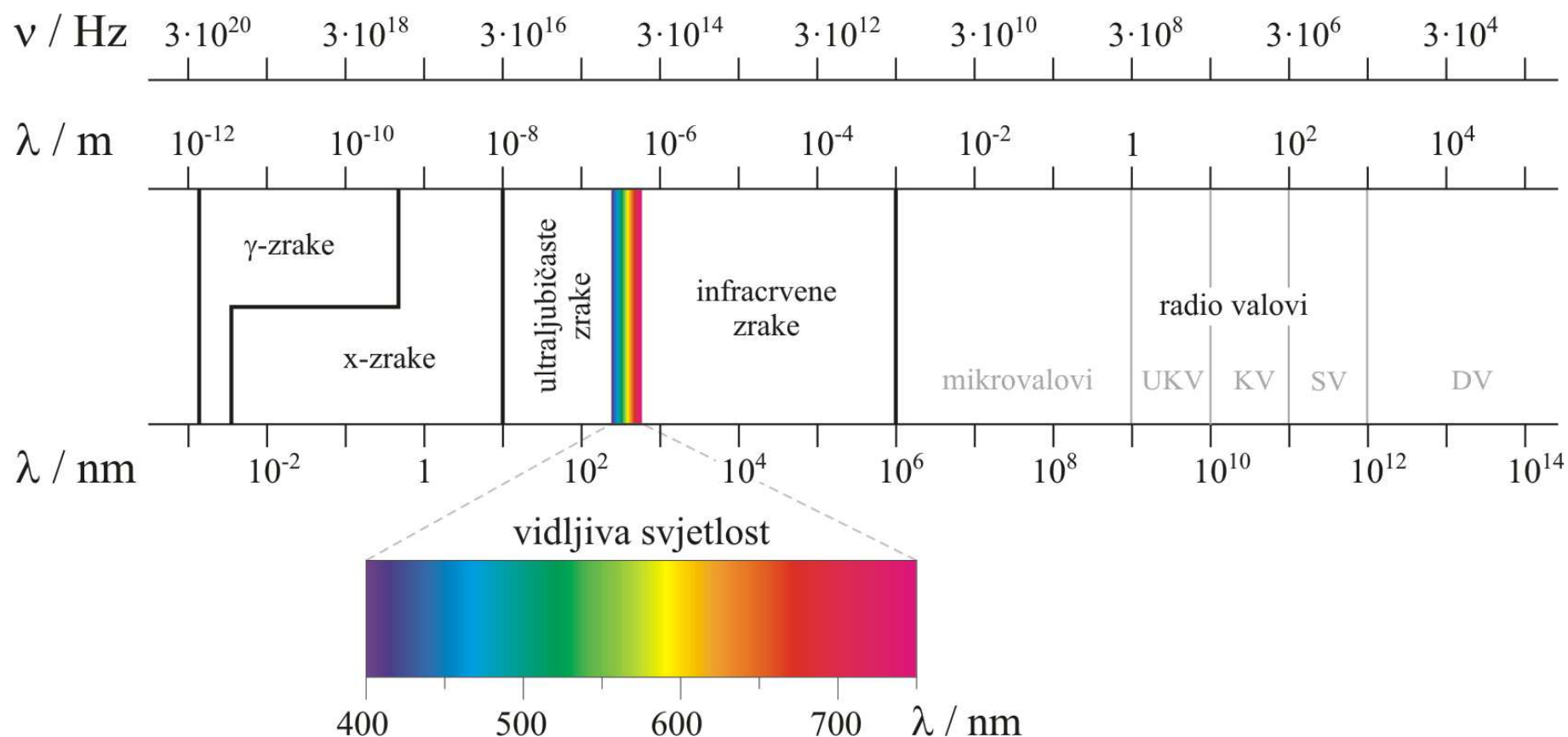
VRSTE ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA

Vrste elektromagnetskog zračenja u ovisnosti o valnoj duljini λ su:

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| ○ kozmičke zrake | < 1 pm |
| ○ gama zrake (γ -zrake) | od 1pm do 0,1nm |
| ○ rendgensko zračenje (X-zrake) | od 0,1nm do 10nm |
| ○ ultraljubičasto zračenje (UV-zrake) | od 10nm do 390nm |
| ○ vidljivo zračenje (svjetlost) | od 390nm do 750nm |
| ○ infracrveno zračenje (IR-zrake) | od 0,75 μ m do 300 μ m |
| ○ mikrovalno zračenje | od 3mm do 30cm |
| ○ radiovalovi | od 0,3mm do 3000m |

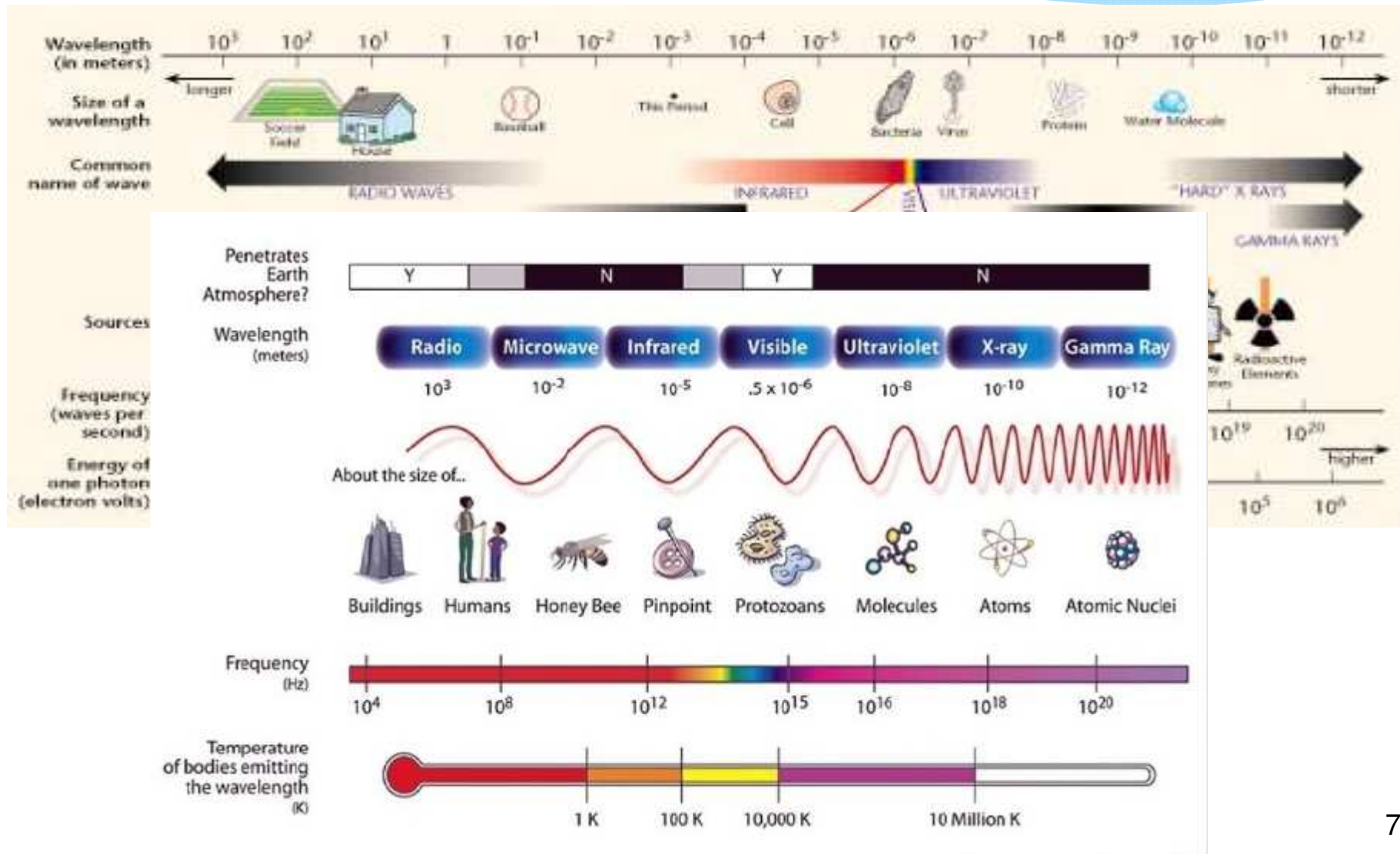
VRSTE ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA

Spektar elektromagnetskog zračenja



VRSTE ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA

Spektar elektromagnetskog zračenja



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Elektromagnetska zračenja uzajamno se razlikuju jedino frekvencijom.

Svjetlost nastaje kada se električni naboji kreću u elektromagnetskom polju.

Atom odašilje svjetlost kada je neki od njegovih elektrona potaknut dodatnom energijom izvana. Zračenje pobuđenih elektrona predočavamo valom.

Svjetlost manje energije ima manju frekvenciju, a veću valnu duljinu, a za svjetlost više energije vrijedi obrnuto

$$\text{valna duljina} = \text{brzina svjetlosti} / \text{frekvencija}$$

$$\lambda = c / f$$

Brzina svjetlosti, kao i svih ostalih elektromagnetskih valova, u vakumu iznosi 299 792 458 m/s.

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Iako se **svjetlost** ponaša kao val, njezine tri značajke ne mogu se objasniti teorijom valova.

Emisija svjetlosti sa usijanih tvari (*crno tijelo*). Obična sijalica je usijana volframova žica koja kada se zagrije emitira bijelu svjetlost. Valna dužina emitirane svjetlosti zavisi od temperature tijela – crveno usijana tijela su hladnija od usijanih tijela koja emitiraju bijelu svjetlost. Ovu je pojavu objasnio Max Planck i ustanovio prve principe kvantne teorije. On je pretpostavio da atomi mogu primati (*apsorbirati*) ili otpuštati (*emitirati*) energiju samo u malim diskretnim „paketima”. Najmanju količinu energije koja se može emitirati ili apsorbirati elektromagnetnim zračenjem nazvao je kvant. Energija svakog pojedinačnog kvanta svetlosti je jednaka umnošku konstante i frekvencija svjetlosti, ili **$E = h \cdot f$**

Planck-ova konstanta koja iznosi $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js f frekvencija Hz
Prema kvantnoj teoriji energija se uvijek emitira ili apsorbira kao cijelobrojni umnožak **hf** . Ako neki atom emitira ukupno energiju od 3 **hf** kažemo da je taj atom emitirao tri kvanta energije.

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Fotoelektrični efekt – izbijanje elektrona s površine metala pomoću svjetlosti

Einstein je pomoću Planck-ove teorije objasnio fotoelektrični efekat izbacivanje elektrona sa površine metala pomoću svjetlosti.

Einsteinovo objašnjenje – zračenje koje pogađa metal se sastoji od malih paketa energije koje je nazvao foton i koji se ponaša kao čestica.

Kada foton pogodi metal on nestane i preda svoju energiju elektronu metala.

Ukoliko je energija fotona mala elektron ne može napustiti jezgro atoma i ništa se ne događa.

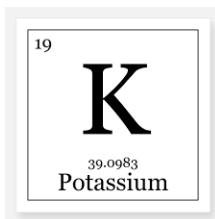
Ako je energija fotona dovoljno velika elektroni napuštaju jezgru.

Ako je energija fotona znatno veća višak energije fotona se pretvara u kinetičku energiju tih elektrona.

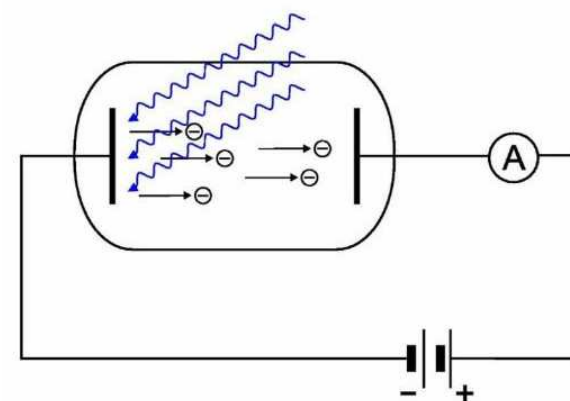
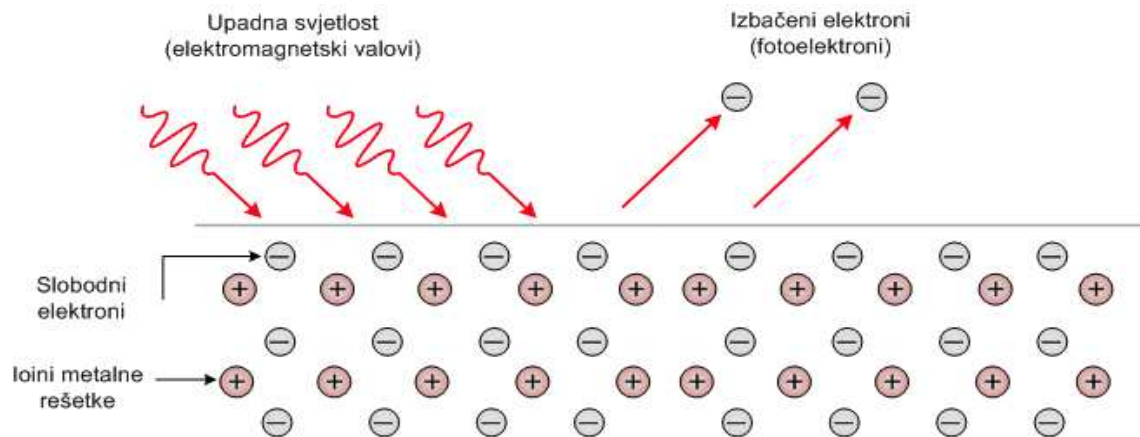
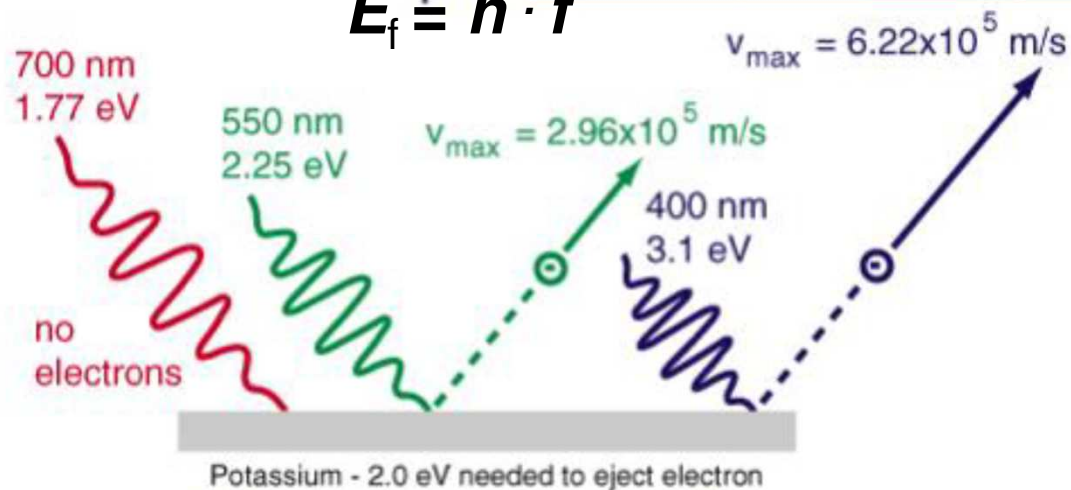
ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Fotoelektrični efekt (učin)

Kalij



$$E_f = h \cdot f$$



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Emisija svjetlosti s pobuđenih atoma plinova – emisijski spektri (*neonska lampa*)

Laser – daje snop svjetlosti samo jedne valne dužine – monokromatska svjetlost.

Sijalica (*sa žarnom niti*) daje svjetlost različitih valnih dužina – polikromatska svjetlost.

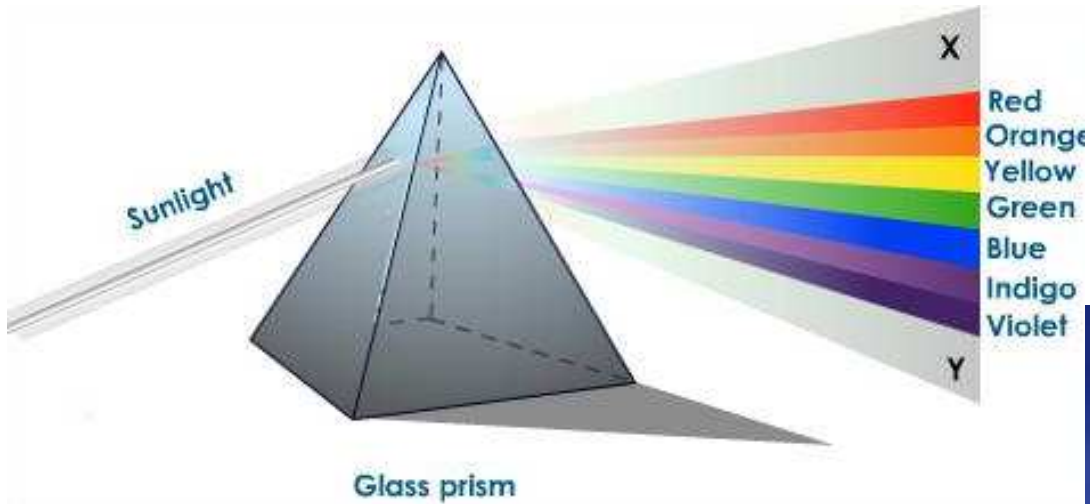
Ako svjetlost Sunca ili volframove sijalice propustimo kroz prizmu ona se prelama i razlaže po valnim dužinama.

Sve valne dužine su sadržane u bijeloj svjetlosti, nema praznih mjesta – takvi spektri se zovu kontinuirani spektri.

Kada se plinovi pod niskim pritiskom stave u zatvorenu staklenu cijev i kroz njih propusti struja oni daju nešto drukčiji spektar - linijski spektri. Neon svjetli crvenkasto narandžasto, natrij žuto...

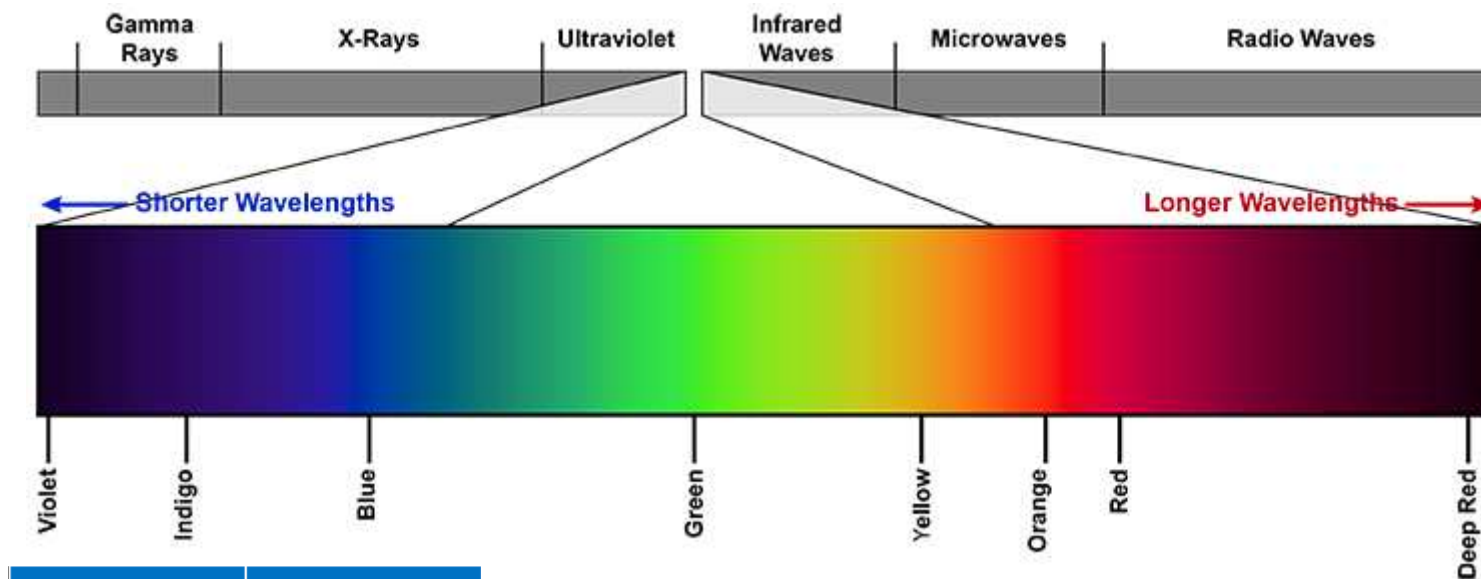
ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Razlaganje (*disperzija ili rasap*) svjetlosti



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Boju vidljivog svjetla određuje valna duljina.



Color	Wavelength
violet	380–450 nm
blue	450–495 nm
green	495–570 nm
yellow	570–590 nm
orange	590–620 nm
red	620–750 nm

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Energija i snaga sunčeva zračenja na Zemlji

Ozračenje – gustoća snage **G** [W/m²]

(iradijacija, insolacija)

Panel: najbolji fiksni nagib za cijelu godinu

$\beta_g = \varphi^o$, za ljetu $\beta_{lj} = \varphi^o - 15^o$ i zimu

$\beta_z = \varphi^o + 15^o$

Ozračenost – gustoća energije **H** [Ws/m²]

Zemljopisna širina φ

Deklinacija Sunca δ - kut između ravnine

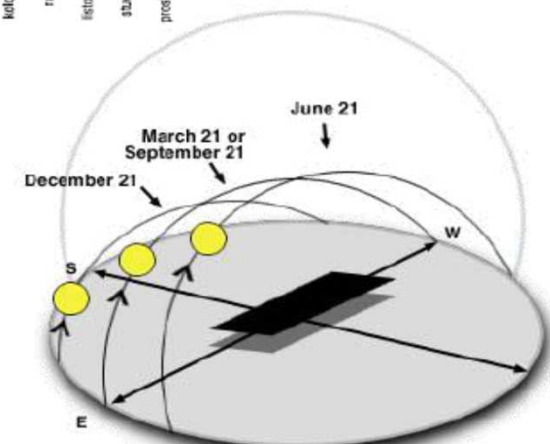
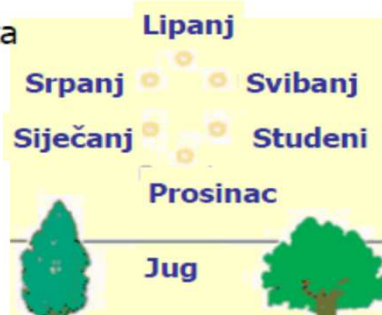
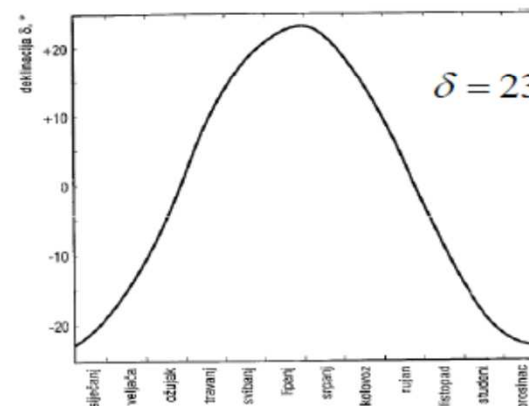
ekvatora i spojnice središta Zemlje i Sunca

Satni kut Sunca ω - vrijeme izraženo pomoću kuta ($1h \equiv 15^o$, 0^o za Sunce u najvišem položaju, negativno prije podne: npr. 10h sunč. vremena odgovara sat. kutu $\omega = -30^o$; ω_s satni kut izlaska/zalaska: $\alpha = 0^o/180^o$ u formuli

Visina Sunca α - kut između horizonta i Sunca

Azimut Sunca Ω - kut na ravnini horizonta

Između pravca prema jugu i pravca projekcije sunčevih zraka na horizont (0^o za Sunce u najvišem položaju, negativno prije podne)



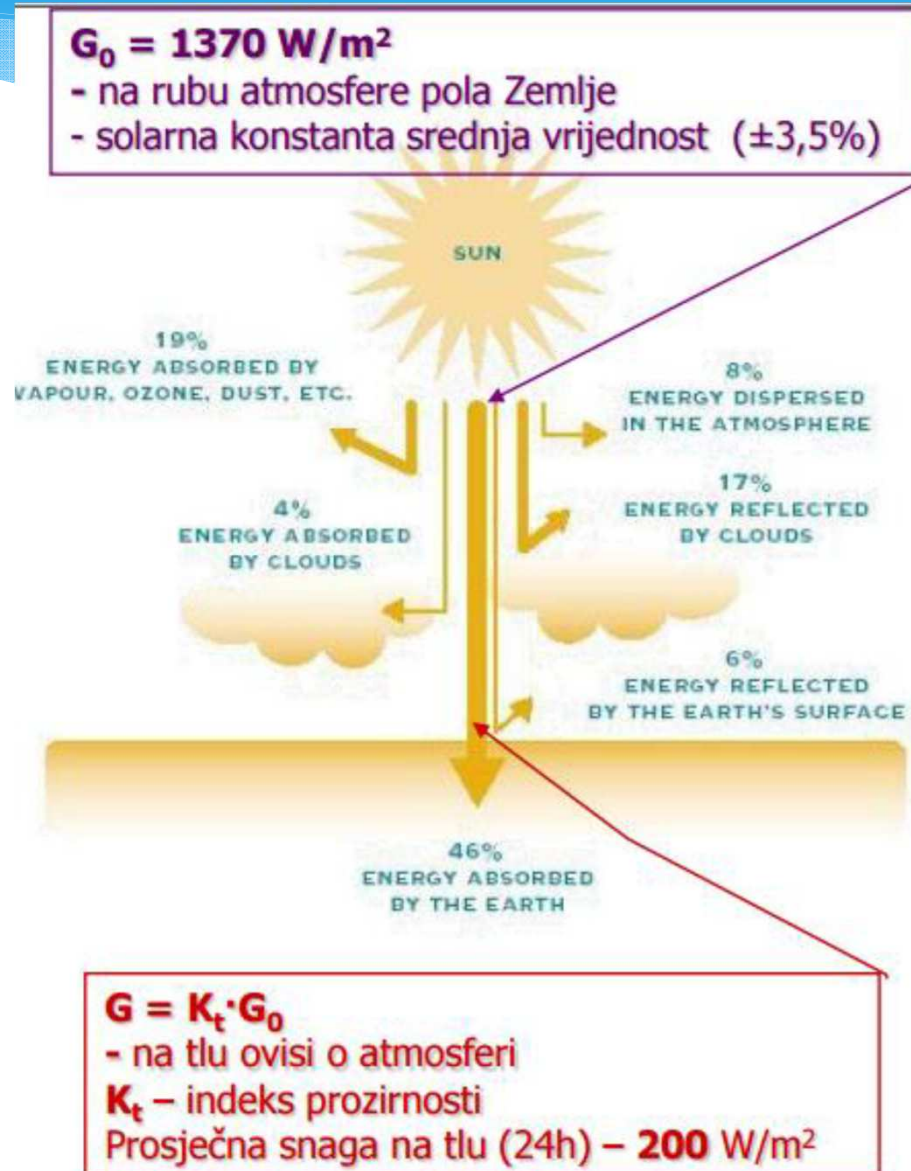
Izvor: <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf>

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Bilanca energije sunčeva zračenja koje dolazi do rubnog sloja atmosfere.

G_0 – gustoća snage W/m^2

Dnevna ozračenost – insolacija (*iradijacija*)



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Učinkovitost solarnih kolektora i foto-naponskih modula ovisi pored ostalog i o njihovom položaju – orijentaciji u prostoru, radi prividnog kretanja Sunca tijekom dana.

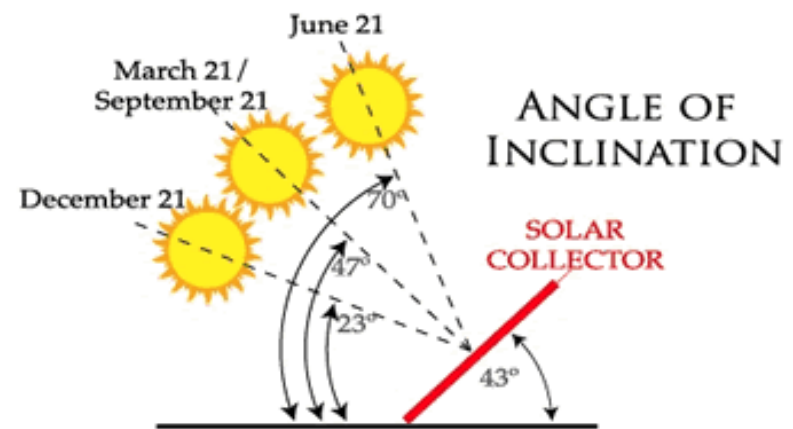
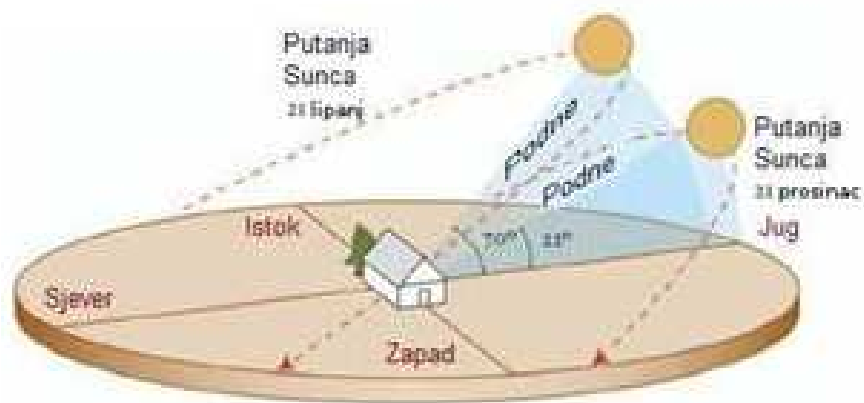
Razlikuju se sustavi s nepomičnim nosačima, nepomični sezonski prilagodljivi (*ljeto, zima*) i sustavi koji omogućuju praćenje Sunca.

Kut nagiba (*elevacija*) nepomičnih nosača u ovisnosti o godišnjem dobu iznosi $30-60^\circ$ u smjeru juga za lokacije sa zemljopisnom širinom $\sim 45^\circ$.

Uređaji za praćenje sunca mogu povećati učinkovitost samih kolektora i foto-naponskih panela, ali je prije konačne ocijene učinkovitosti sustava u obzir uzeti i povećanje složenosti i cijene, utrošak dijela prikupljene energije za rad sustava za praćenje i drugo.

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Snaga sunčeve energije ljeti u podne može biti oko 1000 W/m^2



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Pojam „photo” dolazi od grčke riječi za svjetlost, a „voltaic” od prezimena talijanskog fizičara A. Volta.

„PhotoVoltaic” – fotonaponski.

Francuski fizičar A.E. Becquerel prvi je zamijetio fotonaponski – fotoelektrični efekt 1839. godine.

Dok je teorijsko objašnjenje fotoelektričnog efekta dao A. Einstein 1905. godine za što je pored ostalog i dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1921. godine.

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Princip rada fotonaponskih ćelija

Fotonaponske ćelije su izrađene od posebnih materijala - poluvodiča, kao što je silicij.

Atom silicija ima 14 elektrona, raspoređenih u tri različite „putanje-ljuske”. Vanjska ljuska ima 4 elektrona. Stoga atom silicija će uvijek tražiti načine da ispuni svoju posljednju ljusku i zato će dijeliti elektrone s četiri obližnja atoma.

Koristi se i fosfor koji ima 15 elektrona, od toga 5 elektrona u svojoj vanjskoj ljusci.

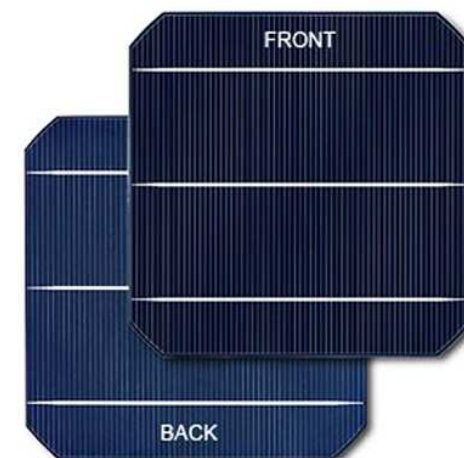
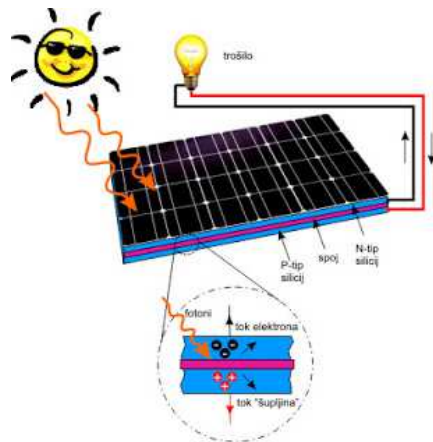
Stoga, kada se kombinira s silicijem, jedan elektron ostaje slobodan.

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Struktura koja pretvara (*transformira*) sunčevu energiju direktno u istosmjernu struju.

Predstavlja izvor istosmjerne struje koja nastaje uslijed razlike potencijala kao posljedice oslobađanja slobodnih elektrona pod utjecajem svjetla.

Pri tom dolazi do transformacije sunčeve energije (*spektra svjetlosne energije valnih dužina od $0,39 \mu\text{m}$ do $0,75 \mu\text{m}$*) u električnu energiju.

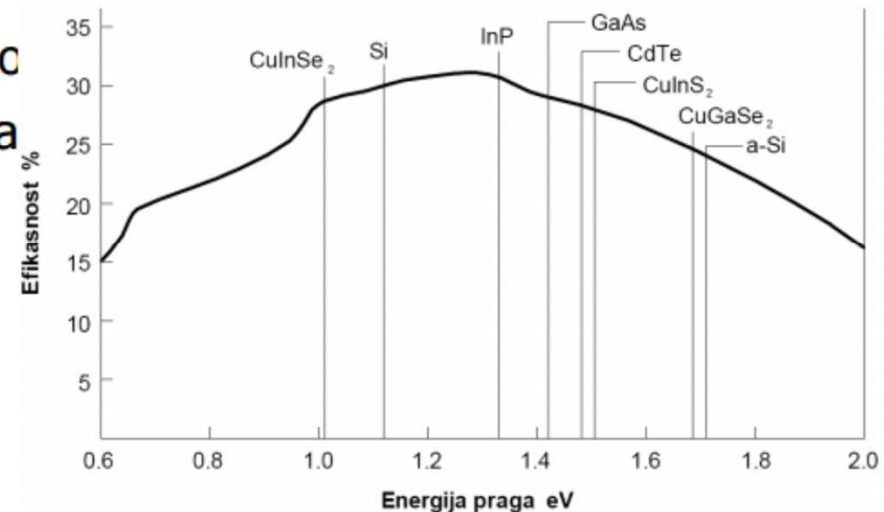


ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

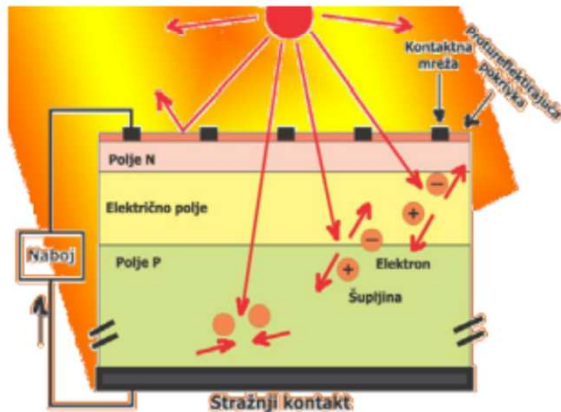
Učinkovitost FN ćelije

Bakar Indium Selenid (CuInSe_2)
Galij Arsenid, CadmijTelur

- 77% Sunčeva spektra iskoristivo
- Oko 43% apsorbiranog zračenja samo grije kristal.
- Teorijski maksimum:
 - na 0°C efikasnost = 28%
- Efikasnost opada brzo s porastom temperature
 - na 100°C efikasnost = 14%



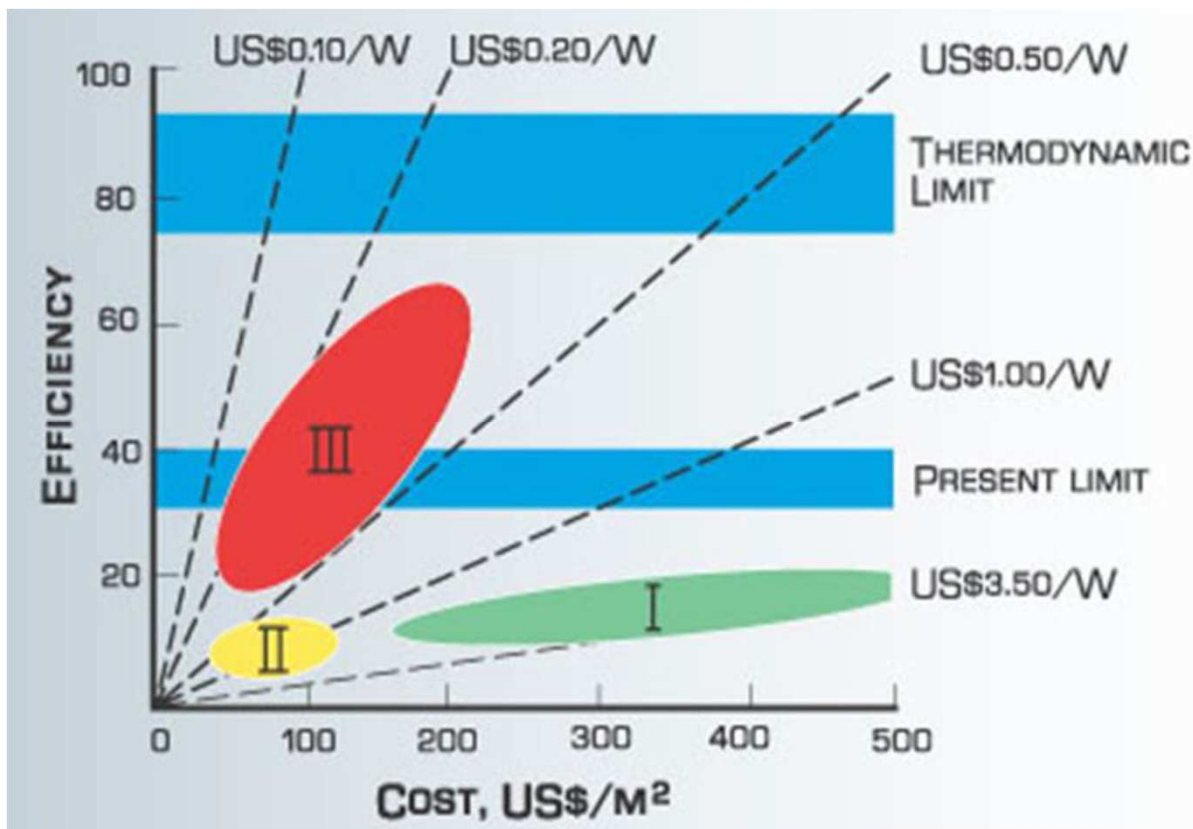
Teorijski maksimum efikasnosti za neke vrste FN ćelija pri standardnim uvjetima ovisno o vrsti ćelije i **energiji zabranjenog pojasa E_g** .



Za izbijanje elektrona foton mora imati veću energiju od E_g .
Energija fotona veća od E_g se ne iskoristi potpuno.
Ćelije s manjim E_g imaju i manji napon.

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Učinkovitost fotonaponskih panela prve, druge i treće generacije u ovisnosti o primjenjenoj tehnologiji (*„wafers”, tankog filma i naprednog tankog filma*)



Teoretska najveća učinkovitost iznosi 43%.

U laboratorijskim uvjetima ostvaren je stupanj korisnosti od ~ 30%.

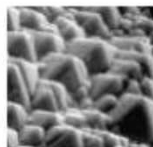
U realnim uvjetima postiže se ~ 12%

Izvor: University of New South Wales

ENERGETSKI SUSTAVI

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Solarni modul i panel



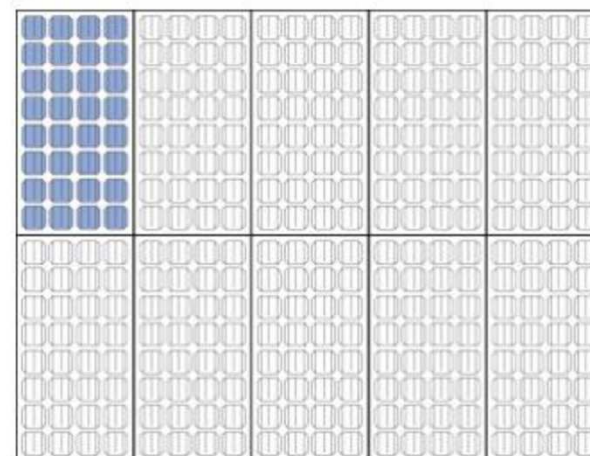
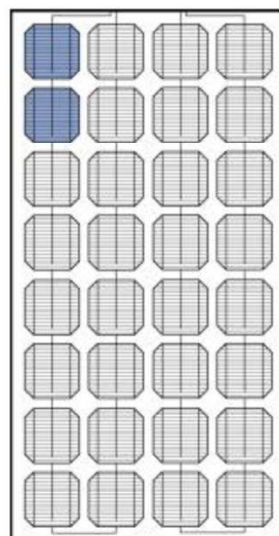
Vršna snaga Wp:	3,8W
Napon otvorenog strujnog kruga Voc:	0,605V
Struja Kratkog spoja Isc:	8,9A
Napon max. snage Vmp:	0,472V
Struja pri max. snazi Imp:	8,05A
Efikasnost: 14,6%	
Debljina: 450-600 microns	

Ćelija 165x165mm

Napon praznog hoda Voc	23V
Struja kratkog spoja Isc	9,9A
Napon max. snage Vmp	17,8 V
Struja pri max. snazi Imp	8,42 A
150Wp	

Dimenzije: 1700 x 690 x 34mm

Težina: 14,5kg



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Osnovne značajke FN (*fotonaponskih*) ćelija

TABLICA 3 EFIKASNOST, POTREBNA POVRŠINA ZA 1 kW I UDIO U PROIZVODNJI 2007. (PHOTON, 02/2008.)

Tehnologija	Kristalični silicij			Tanki film		
	<i>Mono kristalični mc-Si</i>	<i>Poli kristalični pc-Si</i>	<i>Trakasti ribbon c-Si</i>	<i>Amorfni/ mikrokrystalni Si. a-Si/μc-Si</i>	<i>Kadmij telurid CdTe</i>	<i>Bakar indij(galij) diselenid disulfid CI(G)S</i>
Efikasnost ćelije	16 – 19%	14 – 15%	14 – 15%	4-8%	8-11%	7-11%
Efikasnost panela	13 – 15%	12 – 14%	12 – 14%			
Površina za 1 kW	~ 7 m ²	~ 8 m ²	~ 8 m ²	14 m ²	11 m ²	10 m ²
Cijena za 1 kW	2000 \$			1200 \$	4500 \$	8500 \$
Životni vijek* godina	25			20	15 [#]	5 [#]
Udio u proizv. 2007.	42.2%	45.2%	2.2%	5.2%	4.7%	0.5%

* Životni vijek ovisi o granici prihvatljive degradacije efikasnosti koja nije posve poznata za CdTE i CIGS.

Izvor: <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf>

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

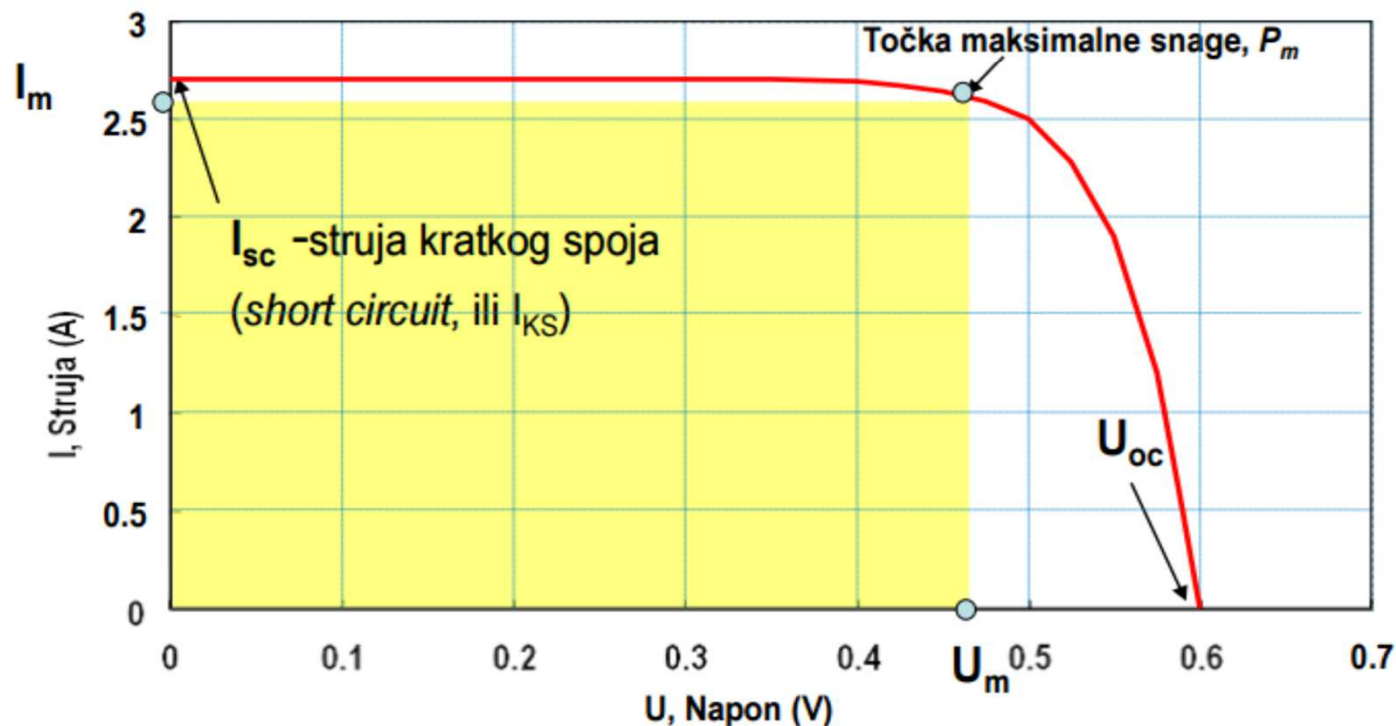
I-U (*strujno-naponska*) karakteristika i najveća snaga

Unutrašnji otpori FN ćelije određuju I-U karakteristiku s točkom maksimalne snage.

Za maksimalnu snagu P_m karakteristične su struja I_m i napon U_m

U_{oc} – napon otvorenog kruga (*open circuit*, ili U_{OK} ili samo U_0)

Omjer maksimalne snage i produkta I_{KS} sa naponom U_0 se naziva **faktor punjenja F**.

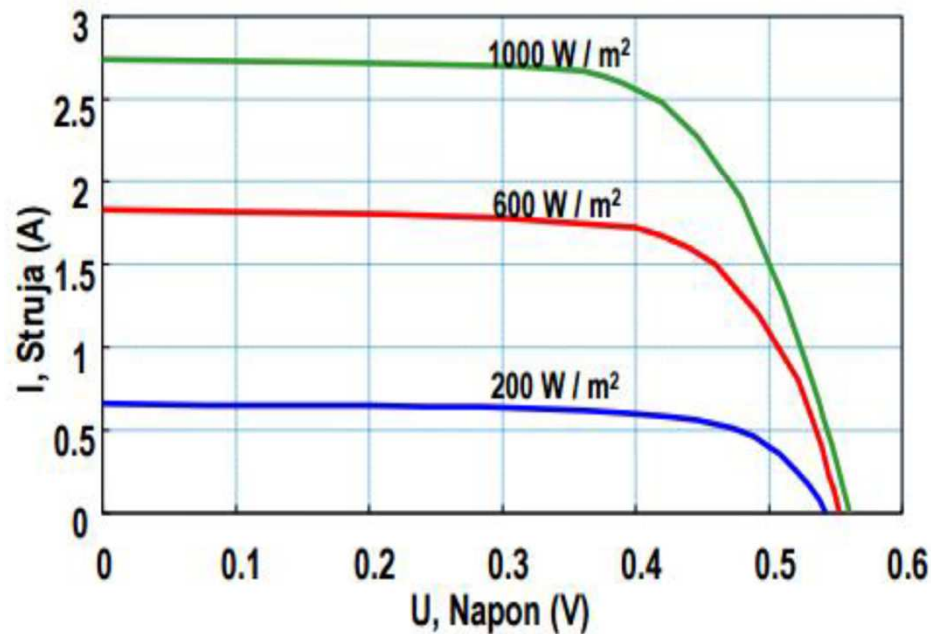


$$F = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{KS} \cdot U_0}$$

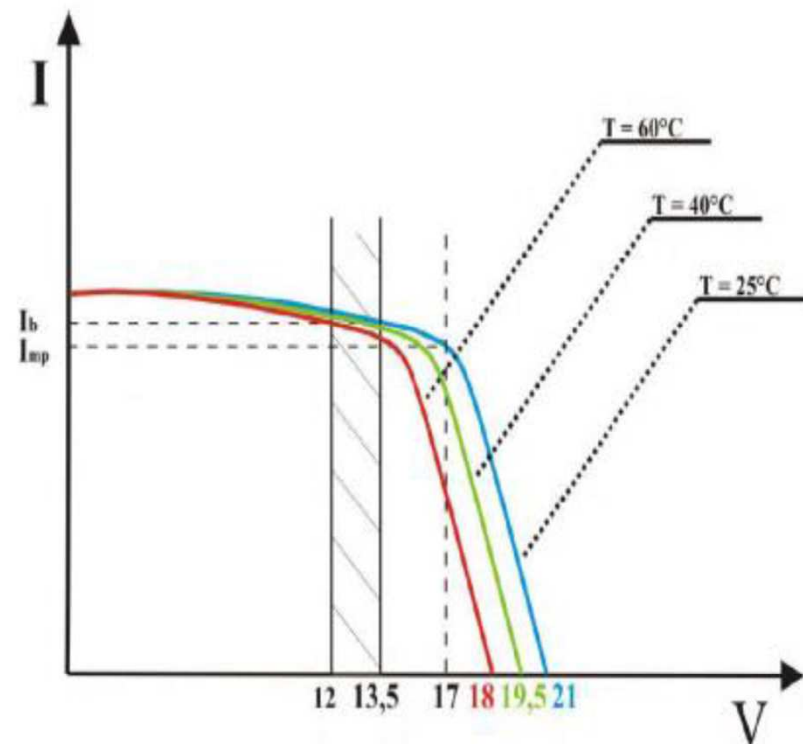
Izvor: <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf>

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Utjecaj sunčevog zračenja i temperature na snagu FN ćelija



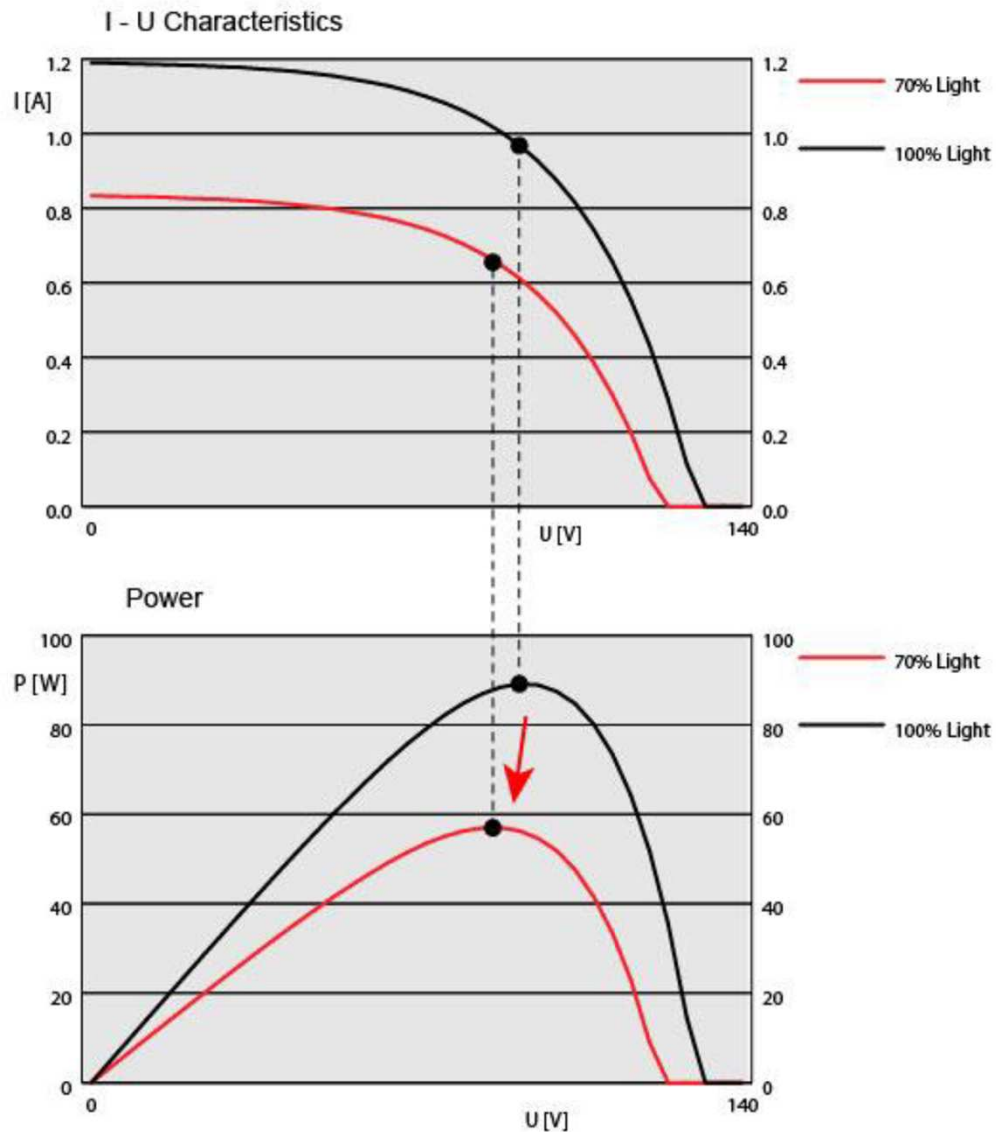
I-U karakteristika monokristalne FN ćelije pri ozračenjima od 200, 600 i 1000W/m²



I-U karakteristika modula sa monokristalnim FN ćelijama pri tri različite temperature.

Izvor: <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf>

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije



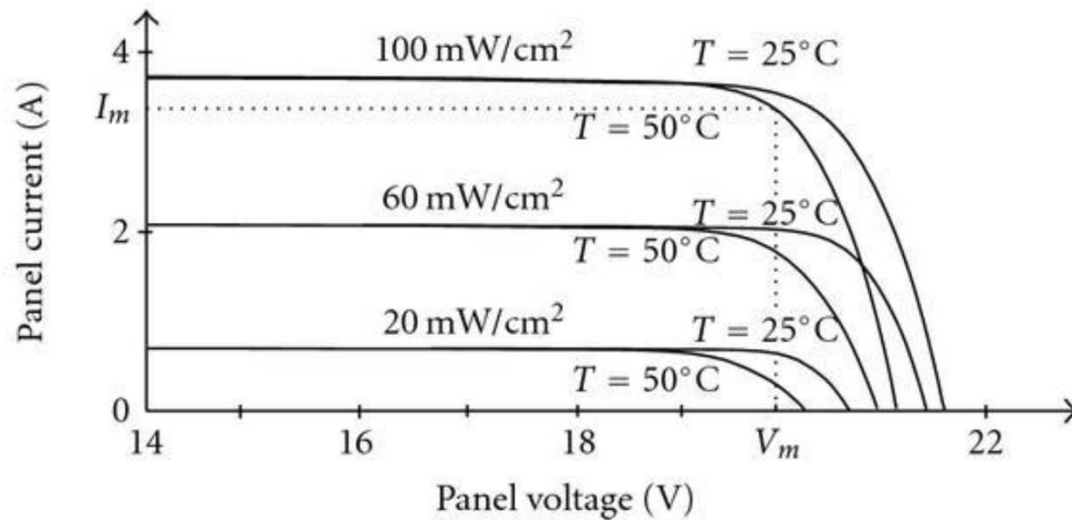
Maximum Power Point Tracker (MPP)

Maximum Power Point Tracker (MPP)

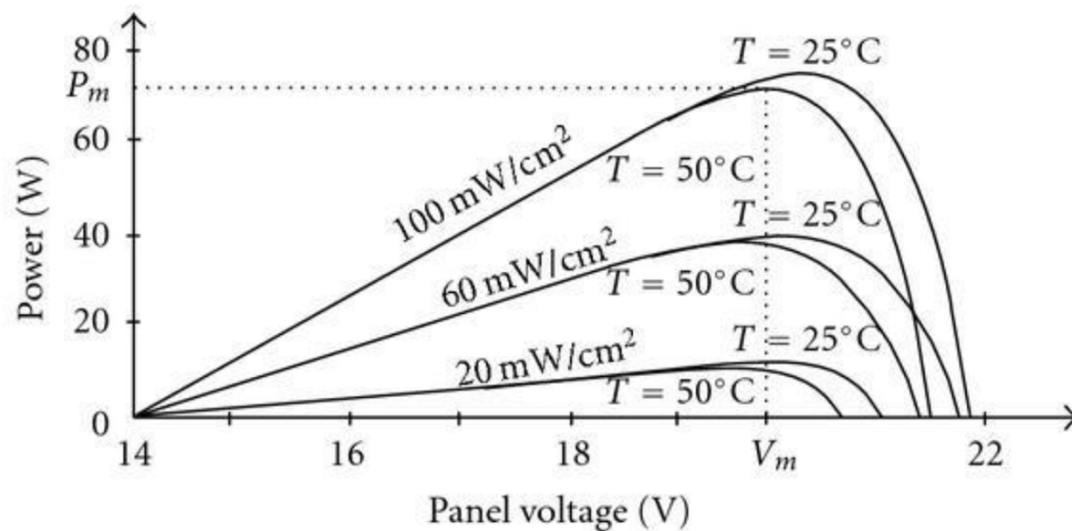
is inserted between the solar module and the load (its output) in order to ensure optimum operation.

MPP input voltage range 200 - 400V transformed into a maximum voltage of 550V.

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije



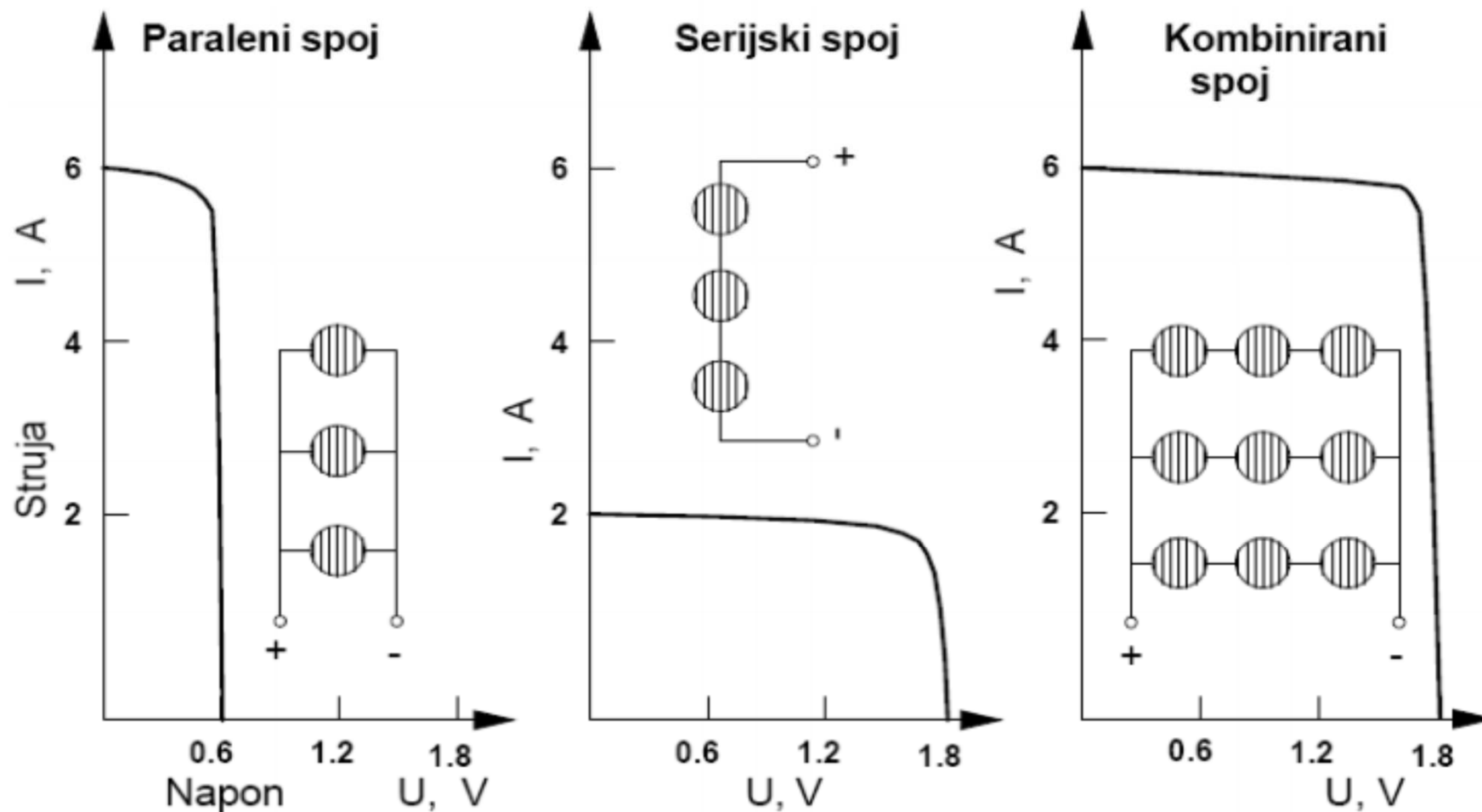
I-U karakteristika FN ćelija



P-U karakteristika FN ćelija

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

U-I karakteristika FN ćelija za paralelni, serijski i kombi. spoj



Izvor: <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf>

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Prema instaliranoj snazi uobičajena podjela je na sustave:
male snage – obiteljske kuće, **srednje snage** – poslovne zgrade i **velike snage** – FN solarne elektrane



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Autonomni – „otočni” sustavi – nisu povezani s javnom električnom mrežom.



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Transformacija sunčeve svjetlosti u električnu energiju može biti:

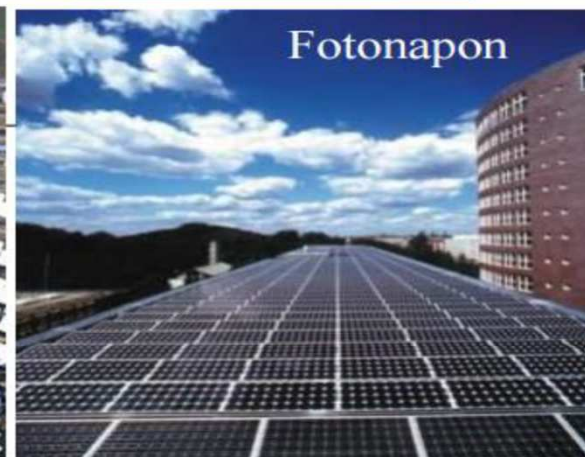
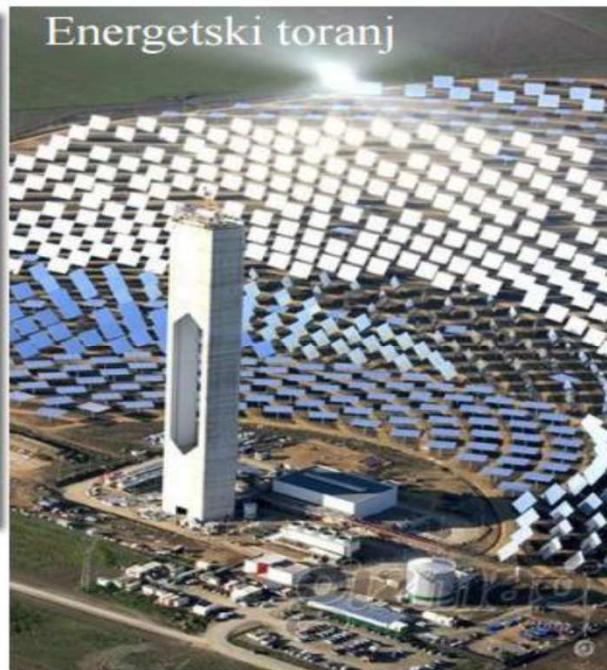
- ☐ direktna – fotonaponske ćelije (*Photovoltaic*),
- ☐ indirektna - solarne termoelektrane.

Za direktnu konverziju pretežno se primjenjuju silicijeve Si fotonaponske ćelije, a u manjoj mjeri koriste se i: galij arsenid GaAs, bakar-indium-diselenidne CuInSe i kadmij-telurijeve CdTe.



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

U primjeni su različiti sustavi solarnih elektrana za direktnu i indirektnu transformaciju sunčeve svjetlosti u električnu energiju.



Korištenje Sunca

**PROIZVODNJA
EL. EN.**



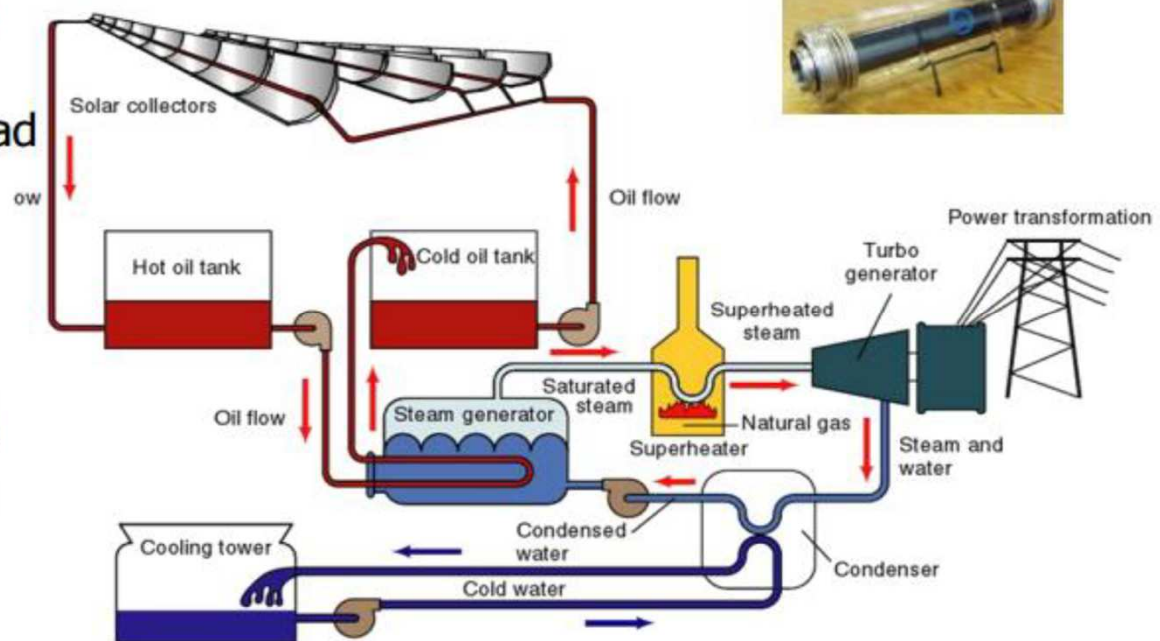
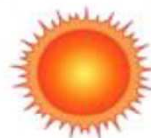
ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Solarna elektrana – **parabolična protočna** (s paraboličnim kolektorima)

- kao i sve druge koncentrirane teh. koristi samo direktno zračenje
- najrazvijenija tehnologija
- instalirano više stotina MWe
- koncentracija sunca 75x
- temperature do 500 °C
- godišnja efikasnost (sunce u el. en.) do 14%
- obično prati sunce ist.-zapad
- Rankine ciklus direktno ili posredno
- cijena blizu konkurentne drugim izvorima
- optimalna snaga 200 MWe
- unapređenja na cijevima i spremanju topline (otopljena sol)



30 MWe, Kramer Junction, California



Izvor: <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf>
ENERGETSKI SUSTAVI

ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

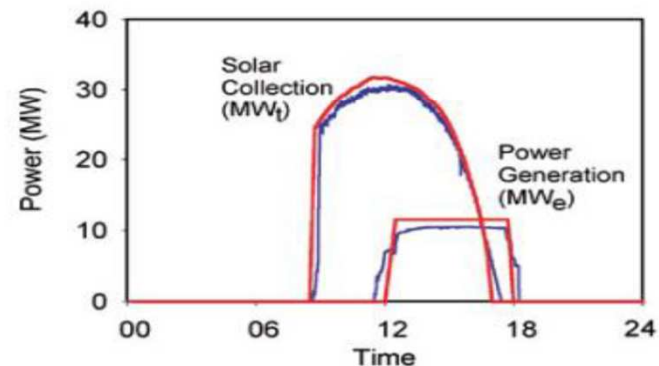
Solarna elektrana – **solarni toranj** (sa zrcalima za prikupljanje solarnog zračenja)

Solarna elektrana – solarni toranj

- manje razvijenija tehnologija u odnosu na parabolične protočne
- instalirano probno više desetaka MWe
- koncentracija sunca 800x
- temperature do 560 °C
- procjena godišnje efikasnosti do 18%
- radni mediji: voda, org. kapljevine soli natrij nitrata ili zrak
- Rankine ciklus posredno ili direktno
- optimalna snaga 100-e MWe
- unapređenja na cijevima i spremanju topline (otopljena sol)



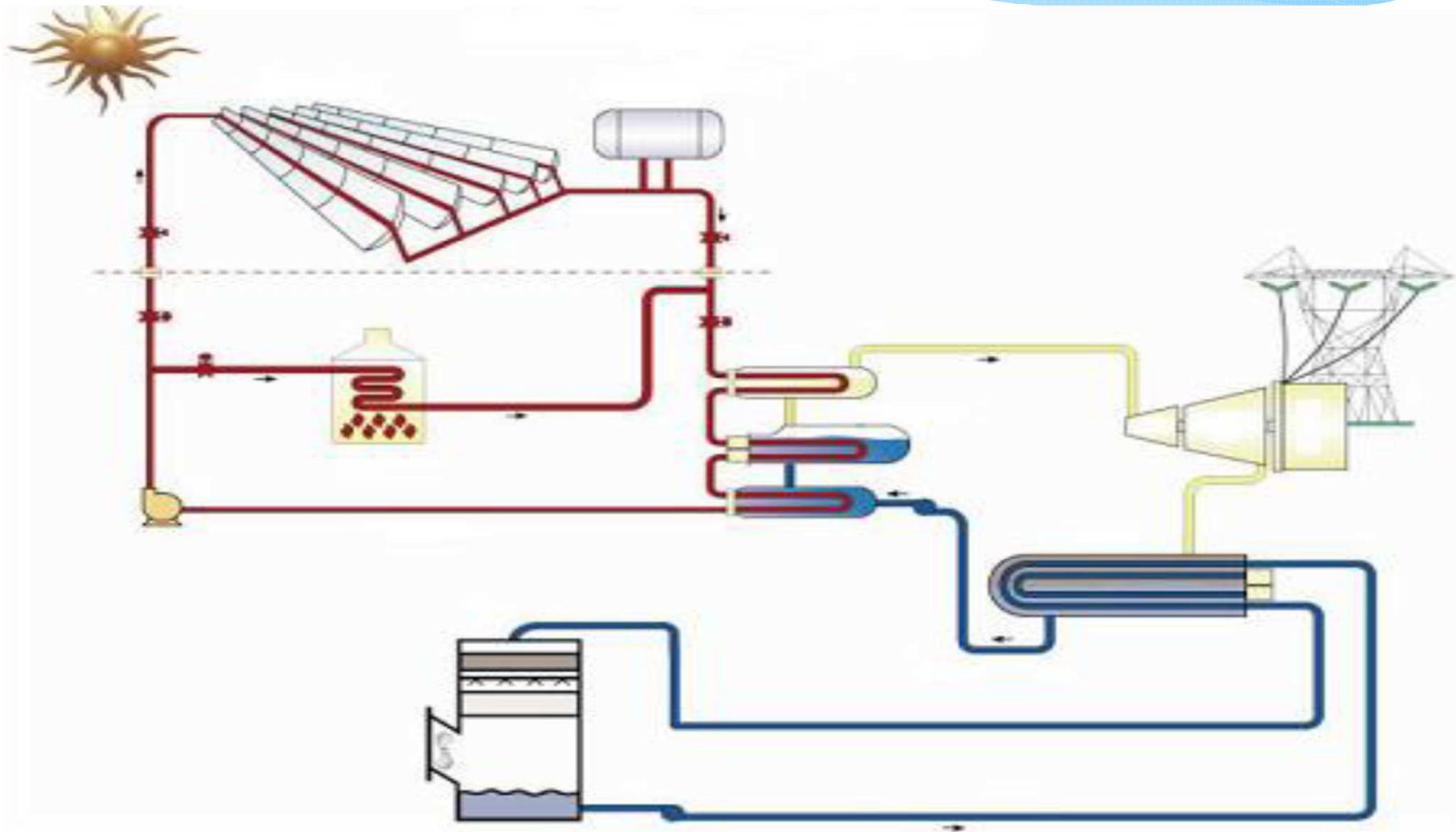
Solar II 10 MWe, California, skoro 2000 ogledala, 100m toranj, 40 M\$



Izvor: <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf>
ENERGETSKI SUSTAVI

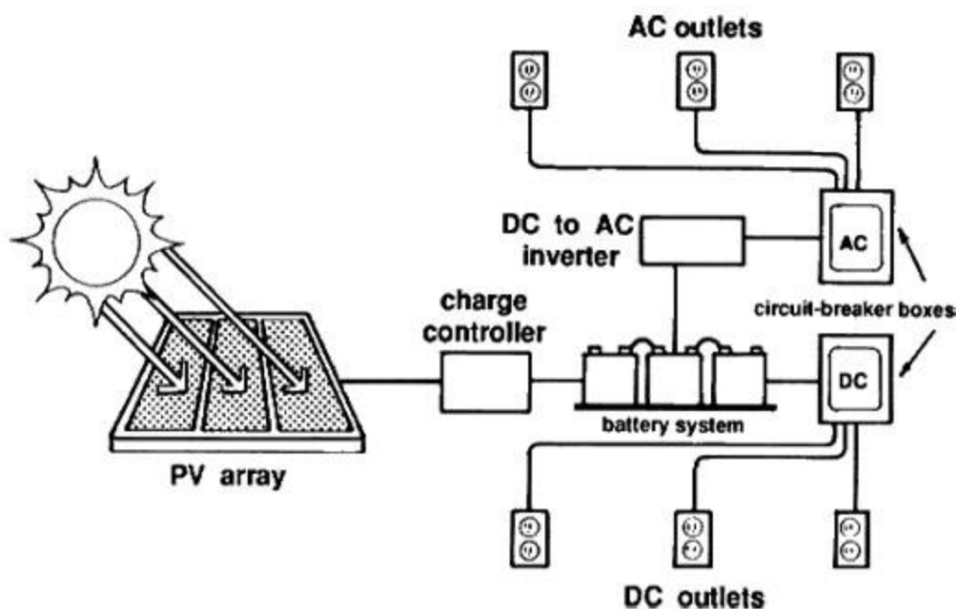
ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Solarna elektrana s parboličnim kolektorima u kojoj se dozračena toplina sunčevog zračenja koristi za dobivanje vodene pare.



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Solarna elektrana za opskrbu električnom energijom manjeg objekta bez mogućnosti povezivanja s javnom električnom mrežom – autonomni otočni sustav.



ENERGIJA SUNCA – dobivanje električne energije

Solarna elektrana za opskrbu električnom energijom manjeg objekta s mogućnosti povezivanja s javnom električnom mrežom.

