



# Tehnološke osnove iskorištavanja obnovljivih izvora energije

---

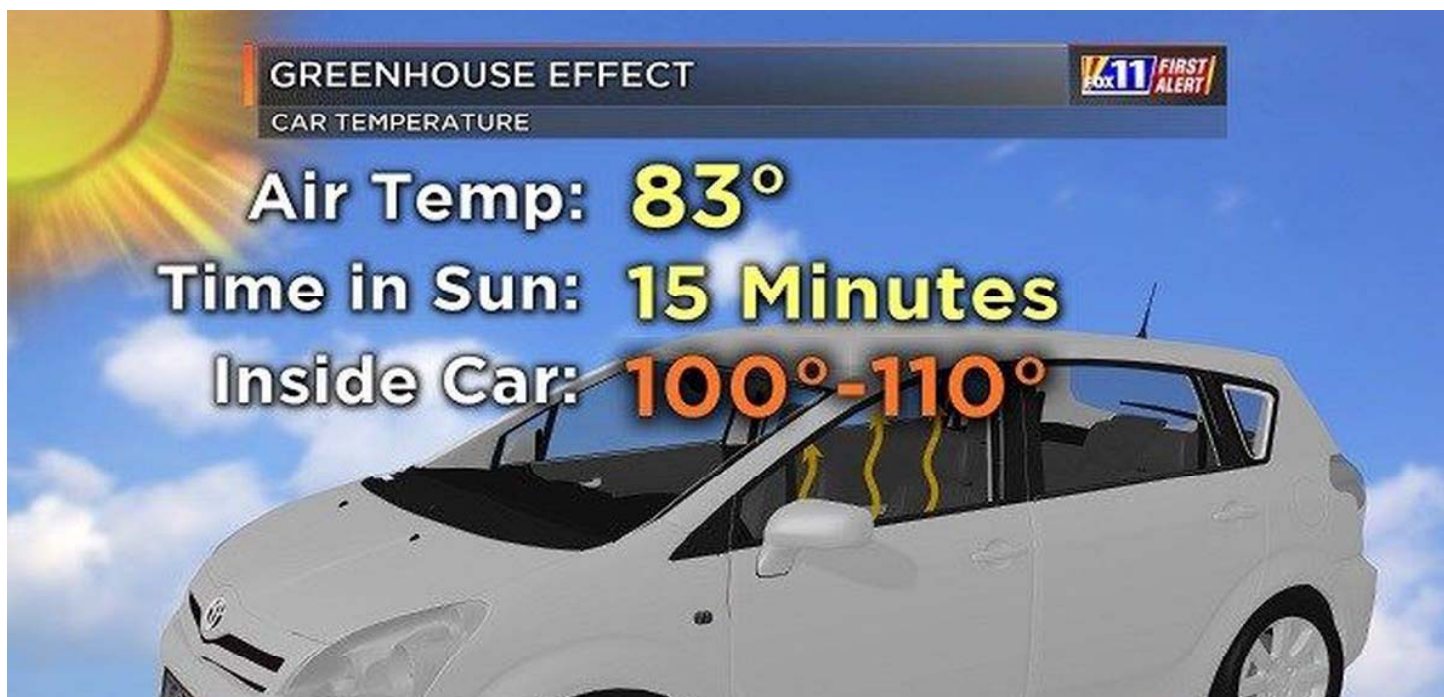
## 3. Sunce - resursi



# Umjesto uvoda



- Što je to globalno zatopljenje i efekt staklenika?
- Da li ste efekt staklenika doživjeli u nekoj drugoj prilici?





# Crno tijelo



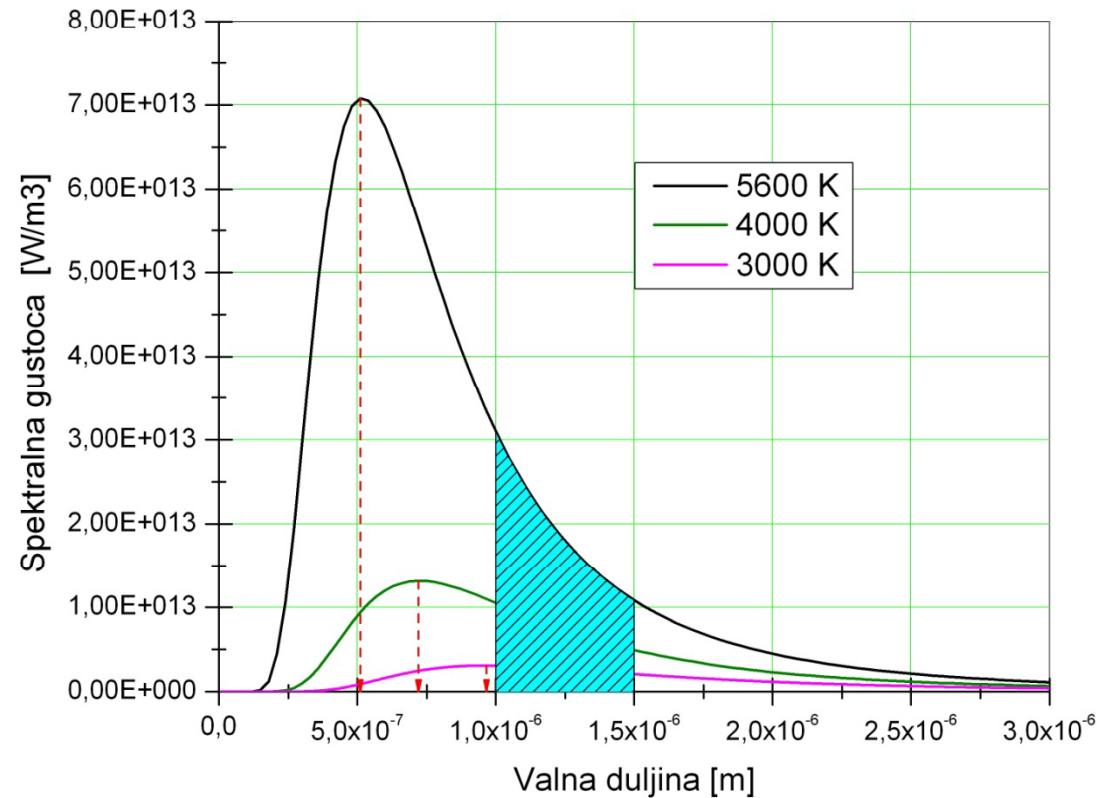
- Što je to?
  - Teoretska apstrakcija – savršeni emiter ili savršeni apsorber
- Fizikalni zakon
  - Planckov zakon - intenzitet pojedinih valnih duljina zračenja koje emitira crno tijelo ovisne su o njegovoj temperaturi:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \left[ \text{W/m}^3 \right] \quad h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$
$$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

- Ukupna snaga emisije definirana je Stefan-Boltzmannovim zakonom

$$P(T) = A \sigma T^4 \left[ \text{W} \right]$$

$$R = \sigma \cdot T^4 \left[ \text{W/m}^2 \right]; \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$



- Wienov zakon pomaka
  - Valna duljina na kojoj je zračenje maksimalno

$$\lambda_{\max} T = \text{konst} = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$



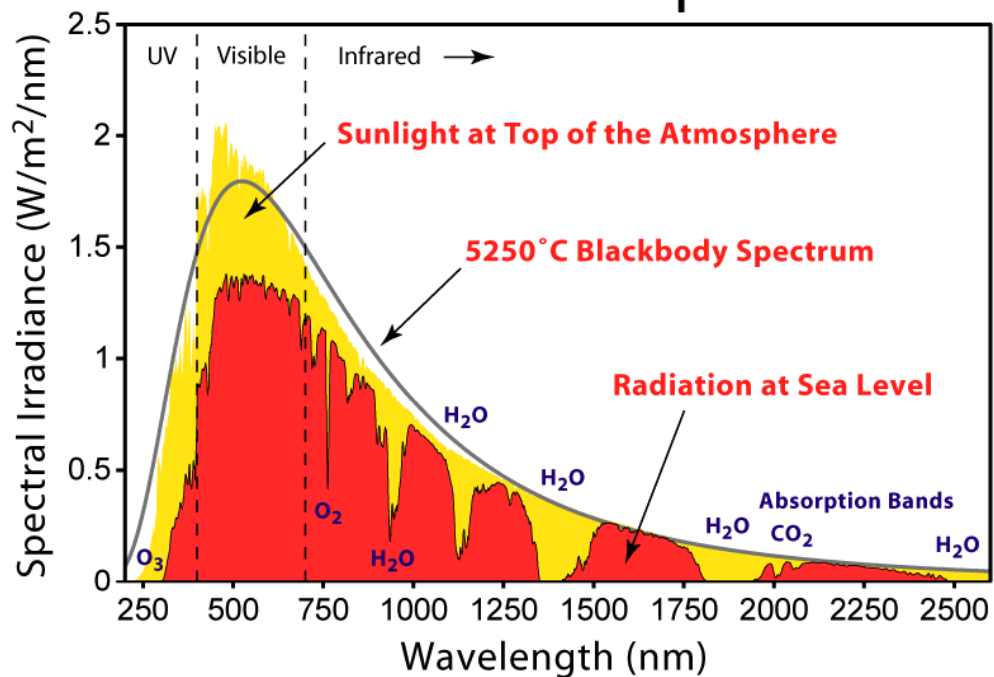
# Sunčevo zračenje



- Temperatura u unutrašnjosti reda veličine  $2 \times 10^7$  K, tlak  $10^{14}$  Pa, gustoća  $10^5$  kg/m<sup>3</sup>.
- Sunce izotropno u prostor emitira oko  $10^{26}$  W ( $6,4 \cdot 10^{17}$  W/m<sup>2</sup>); na Zemlju oko  $1,7 \cdot 10^{17}$  W
- Spektar zračenja koje zrači površina Sunca odgovara spektru crnog tijela temperature 5800 K
- Površina ispod krivulje skalirana je da iznosi 1,37 kW/m<sup>2</sup>
- Ekstraterestičko zračenje – Sunčevo zračenje na ulasku u Zemljinu atmosferu; srednja vrijednost naziva se solarna konstanta:  $G_0 = (1367 \pm 2)$  W/m<sup>2</sup>
- **Fizikalna veličina gustoća energetskega toka  $G$  [W/m<sup>2</sup>](ozračenje, iradijancija)**



## Solar Radiation Spectrum



Obratite pozornost na pomak maksimuma i kvalitetu poklapanja sa stvarnim Sunčevim spektrom pri uporabi različitih temperatura

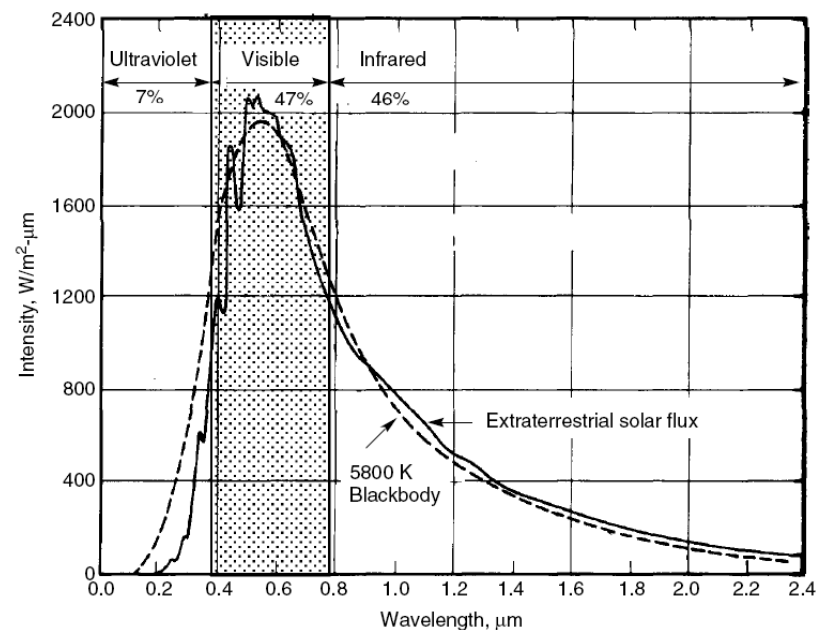


Figure 7.2 The extraterrestrial solar spectrum compared with a 5800 K blackbody.



# Primjer 1



- Pretpostavite da je Zemlja crno tijelo prosječne površinske temperature  $15^{\circ}\text{C}$  i površine od  $5,1\text{E}14 \text{ m}^2$ . Kojom snagom Zemlja emitira zračenje i koja je valna duljina na kojoj je zračenje najjače? Usporedite tu valnu duljinu s maksimalnom valnom duljinom Sunčeva zračenja (površinska temperatura Sunca je približno  $5800 \text{ K}$ ) i vidljive svjetlosti.

Prema Stefan-Boltzmanovom zakonu:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5,1 \cdot 10^{14} \cdot (15 + 273) \Rightarrow$$

$$P = 2 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

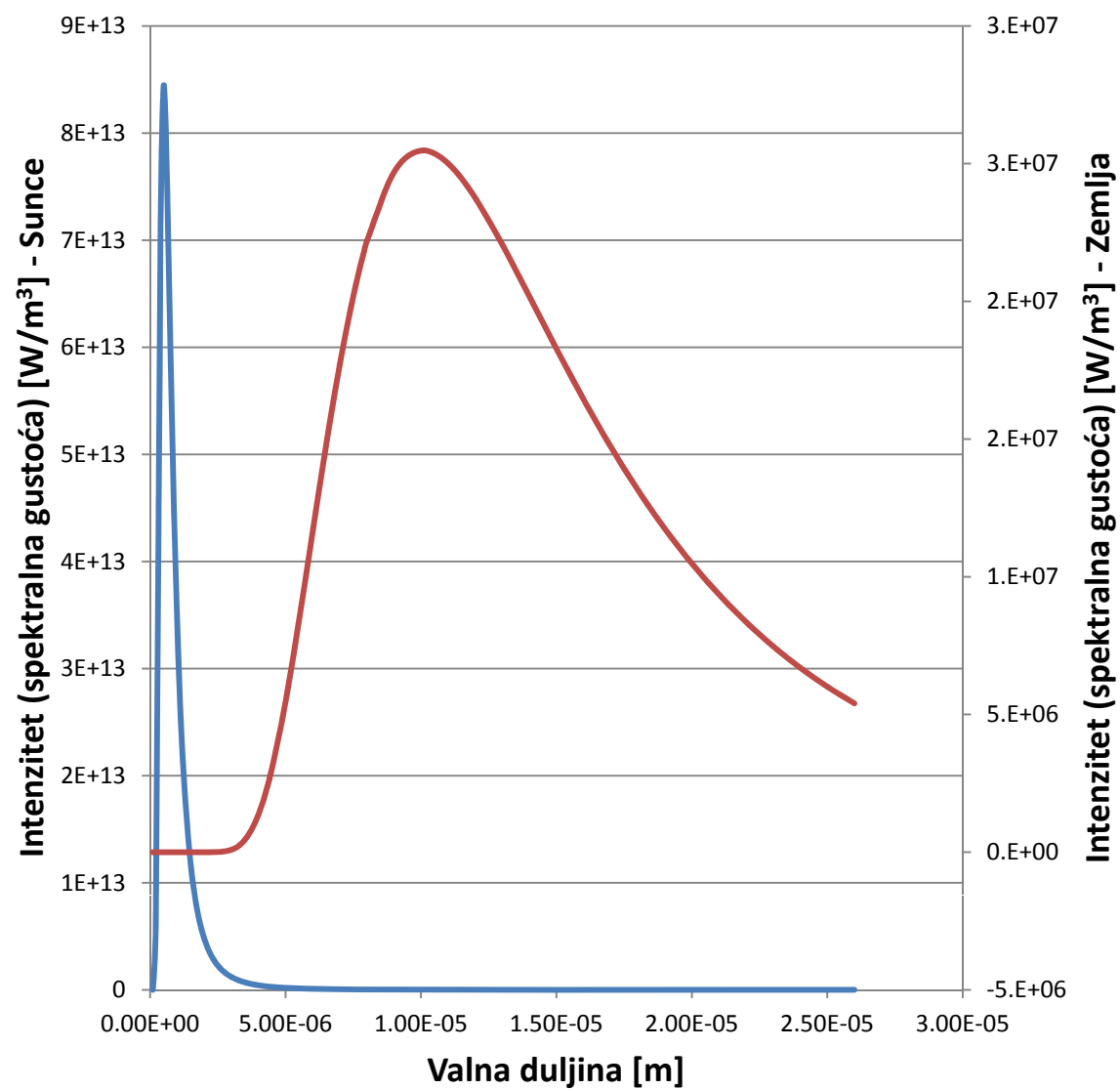
Prema Wienovom zakonu:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{15 + 273} \Rightarrow$$

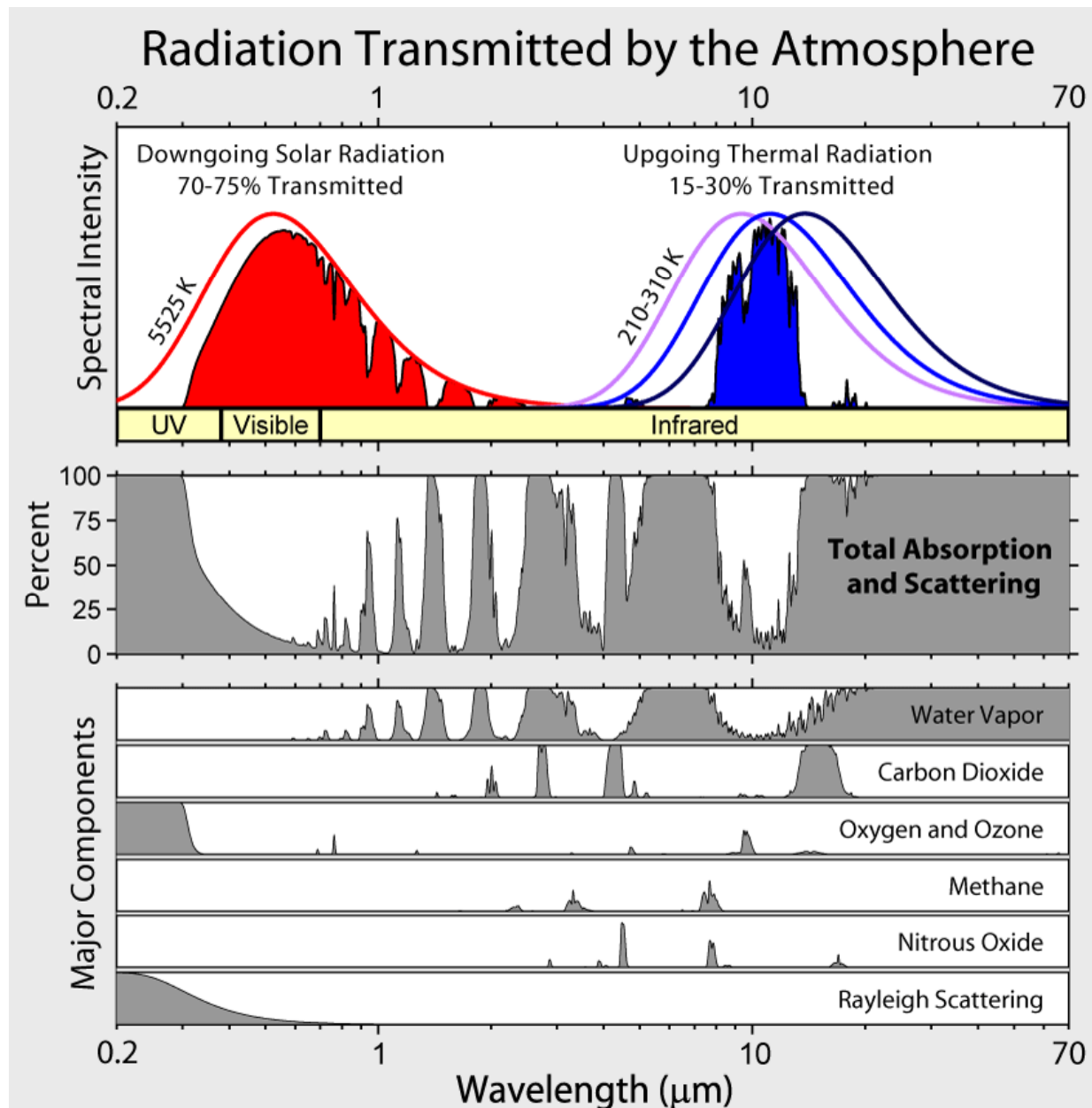
$$\lambda_{\text{max}} = 10,1 \mu\text{m}$$

$$\lambda_{\text{max\_Sunca}} = 0,5 \mu\text{m}$$

- Zemljina atmosfera različito reagira s valnim duljinama Zemlje i Sunca – efekt staklenika
- Efekt staklenika: Sunce emitira vidljivu svjetlost -> Ona prolazi kroz staklo, grije biljke i tlo -> Biljke i tlo isijavaju termičko zračenje (uglavnom infracrveno) -> Za te valne duljine staklo je neprozirno -> Infracrveno zračenje se zadržava u stakleniku i povišuje temperaturu u njemu.







# ☀ Efekt atmosfere na Sunčevo zračenje 🏴

- Prolazak kroz atmosferu – raspršenje, apsorpcija – promjena spektra

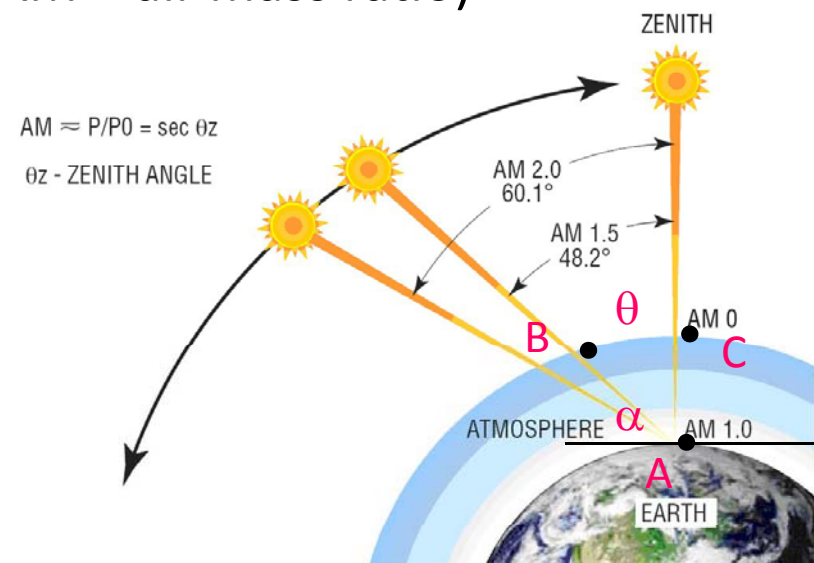
$$G_{bn} = G_0 e^{-km}$$

pri čemu je  $G_{bn}$  ozračenje izravnog Sunčevog zračenja koje na površinu Zemlje upada na plohu okomitu na smjer Sunčevih zraka,  $k$  – koeficijent atenuacije zračenja (ekstincijski koeficijent),  $m$  – optička masa zraka (AM – air mass ratio)

$$m = \frac{\overline{BA}}{\overline{CA}} = \frac{1}{\cos \phi_Z} = \frac{1}{\sin \alpha} = \csc \alpha$$

$\phi_Z$  - zenitna udaljenost (zenitni kut Sunca);

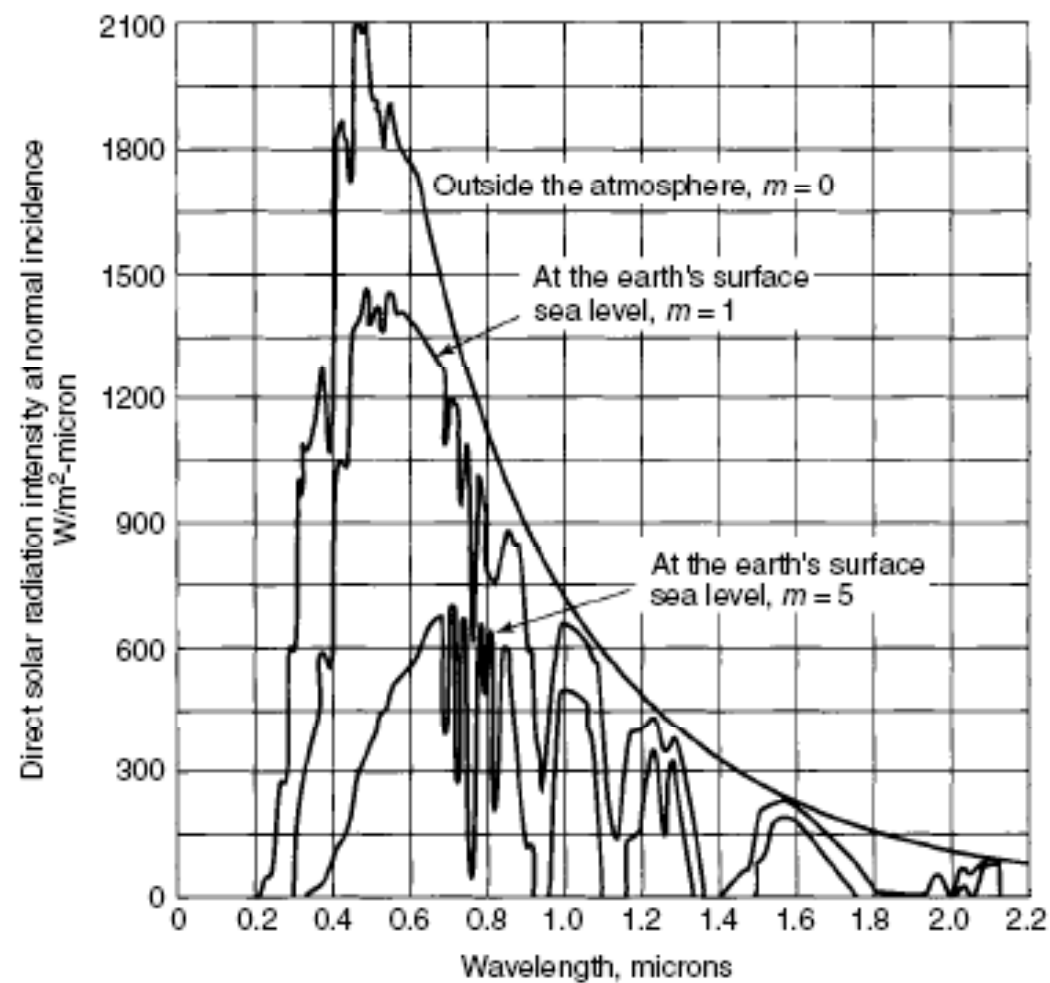
$\alpha$  - visina Sunca





Air Mass vrijednost	Karakteristika
AM0	Spektar izvan atmosfere kojeg aproksimira spektar crnog tijela na temp. 5800 K; upotreba panela u svemiru
AM1.0	Spektar na razini mora kada je Sunce u zenitu (okomito iznad); AM1 ( $\theta=0^\circ$ ) to AM1.1 ( $\theta=25^\circ$ ) korisno za procjenu efikasnosti panela u ekvatorijalnim i tropskim područjima
<b>AM1.5</b>	<b>Odgovara zenitnom kutu <math>\theta=48.2^\circ</math>; predstavlja cjelogodišnji prosjek za umjereni pojas; od 1970-tih se koristi za standardizaciju (po definiciji je ozračenje normiranog AM1.5 Sunčeva spektra 1000 W/m<sup>2</sup>)</b>
AM2 i više	AM2 ( $\theta=60^\circ$ ) i veći upotrebljava se za procjenu panela instaliranih na većim zemljopisnim širinama (sjeverna Europa); AM2-3 korisno za procjenu tijekom zime na Z.Š. $37^\circ$ i više
AM38	Horizontalni smjer na razini mora ( $\theta=90^\circ$ ); veliki stupanj nesigurnosti





**Figure 7.4** Solar spectrum for extraterrestrial ( $m = 0$ ), for sun directly overhead ( $m = 1$ ), and at the surface with the sun low in the sky,  $m = 5$ . From Kuen et al. (1998), based on *Trans. ASHRAE*, vol. 64 (1958), p. 50.



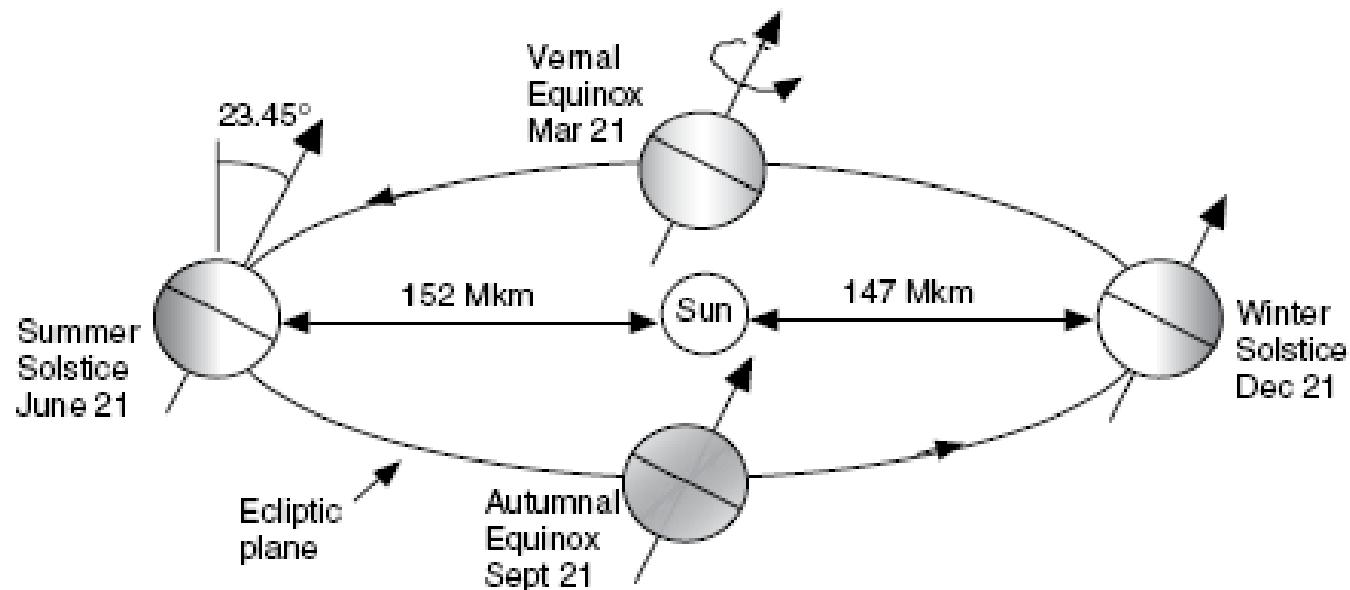
# Zemljina orbita



- Eliptična orbita s periodom od 365,25 dana
- Najbliža Suncu (perihelion) 2. siječnja\* (147 milijuna km), a najdalja od Sunca (afel) 4. srpnja\* (152 milijuna km) (\* podaci za 2016. godinu)

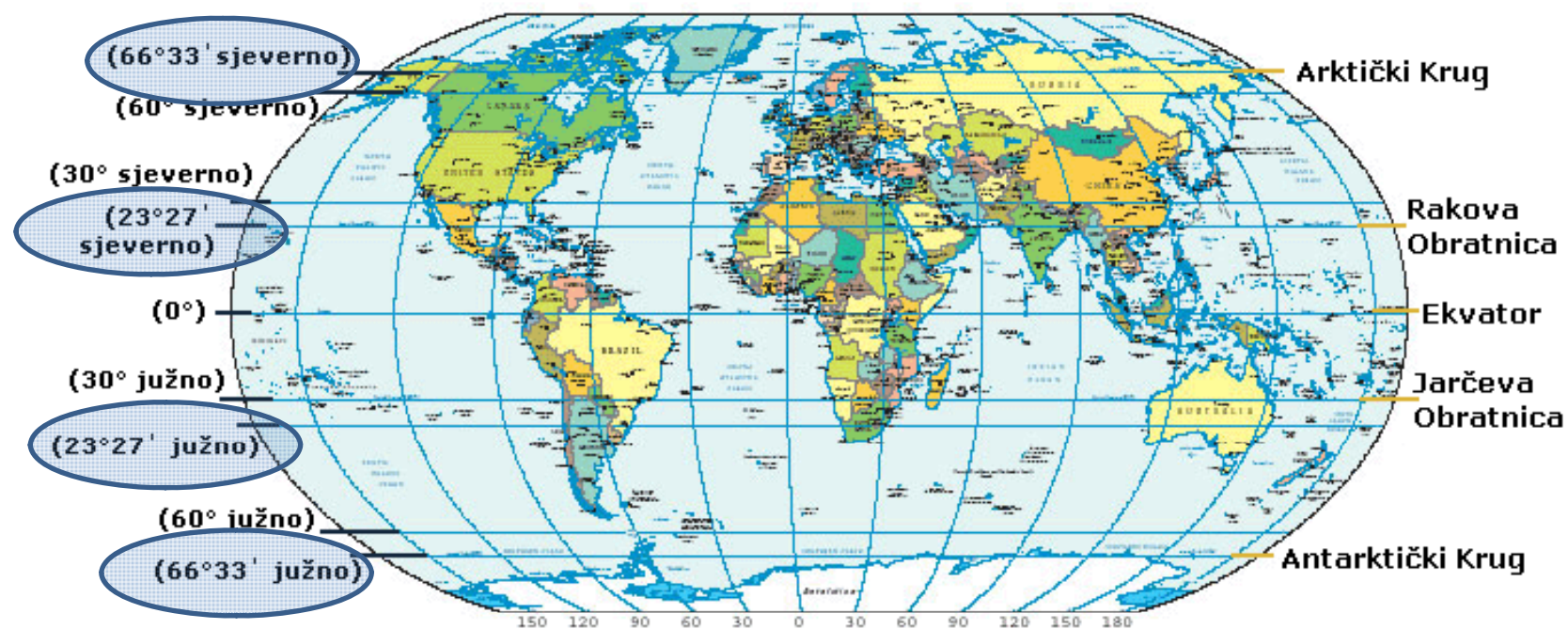
$$d = 1,5 \cdot 10^8 \left\{ 1 + 0,017 \sin \left[ \frac{360(n - 93)}{365} \right] \right\} \text{ km}$$

- Ekliptika – ravnina u kojoj se Zemlja giba oko Sunca
- Rotacija oko vlastite osi – os je u odnosu na ekliptiku nagnuta 23,45°



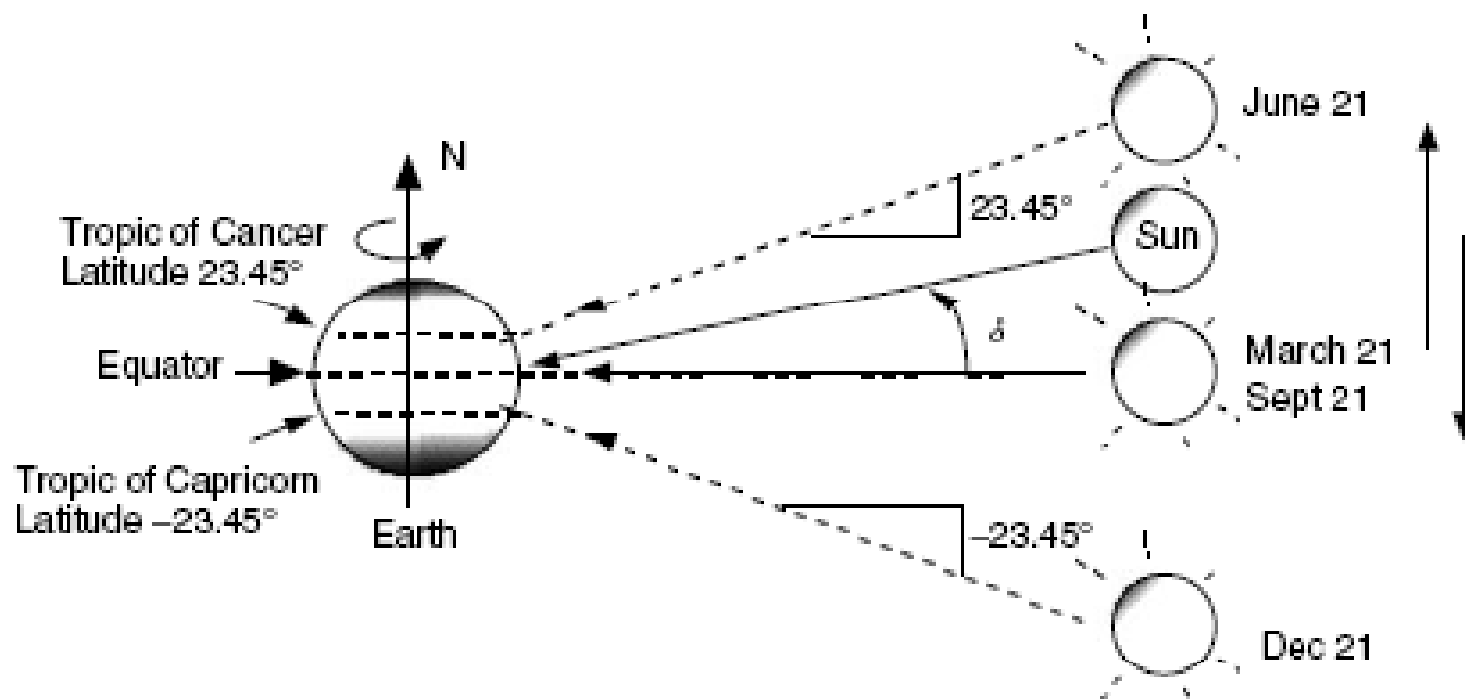
- 21. ožujka i 21. rujna – spojnica središta Sunca i središta Zemlje prolazi Ekvatorom – ekvinocij (ravnodnevica) – 12 sati dana i 12 sati noći
- 21. prosinca - zimski solsticij (suncostaj) na sjevernoj hemisferi – nagib osi na Sjevernom polu je najudaljeniji od Sunca 23,45°
- 21. lipnja – ljetni solsticij – os nagnuta prema Suncu za 23,45°

Milankovićeve oscilacije (ekscentričnosti orbite – 100000 godina, nagib osi od 21,5° do 24,5 ° - 41000 godina i precesija – 23000 godina) – utjecaj na klimu





# Antička slika!







# Visina Sunca i deklinacija

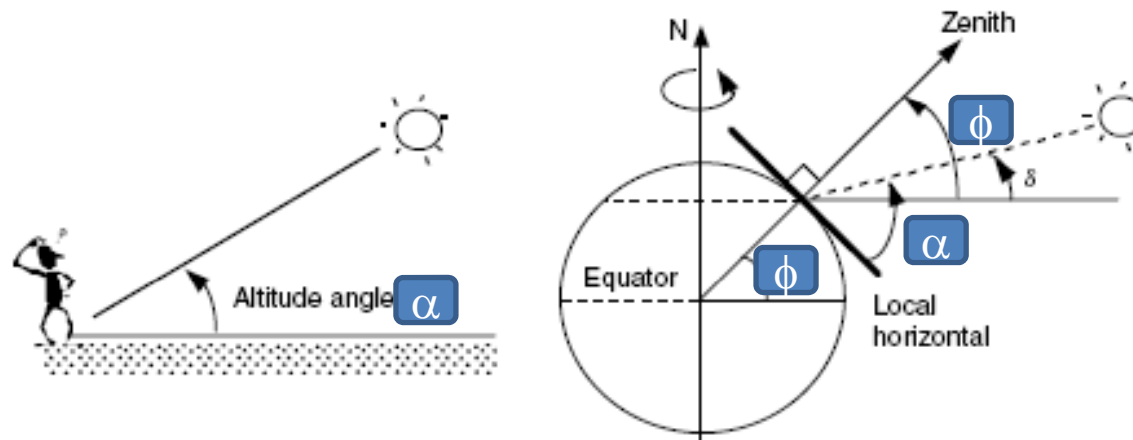


- Visina Sunca  $\alpha$  je kut između Sunčevih zraka i horizontalne plohe
- Deklinacija Sunca ( $\delta$ ) je kut između spojnice središta Zemlje sa središtem Sunca i ravnine u kojoj leži ekvator; mijenja se od  $-23,45^\circ$  (21.12.) do  $23,45^\circ$  (21.6.)

$$\alpha = 90^\circ - \varphi + \delta$$

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(360^\circ \frac{284 + n}{365}\right)$$

$n$  - broj dana od 1. siječnja.

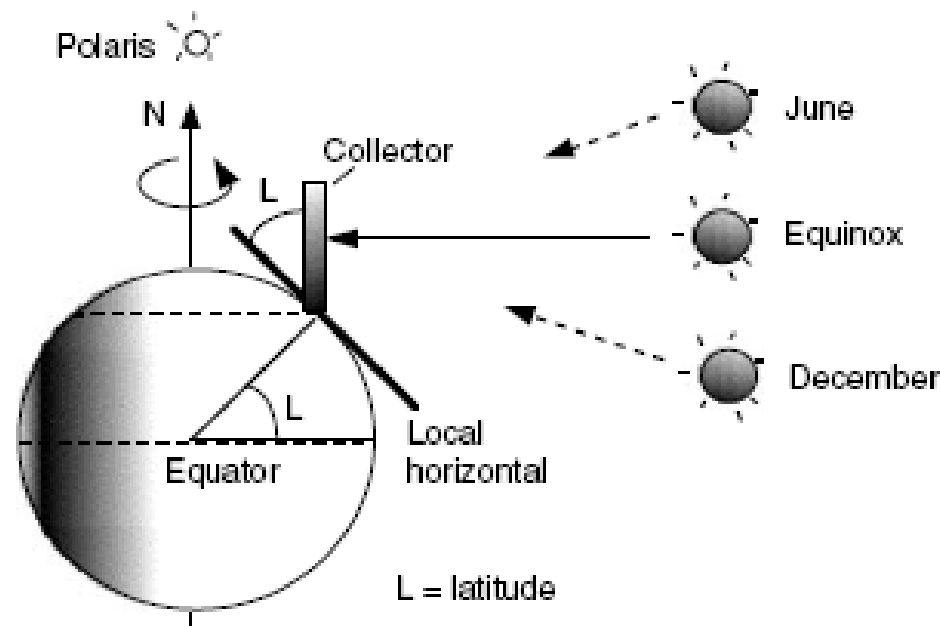




# Malo inženjerske prakse



Zašto inženjerska praksa kaže da je za postavljanje panela okrenutog prema jugu razuman nagib jednak zemljopisnoj širini lokacije?





## Primjer 2



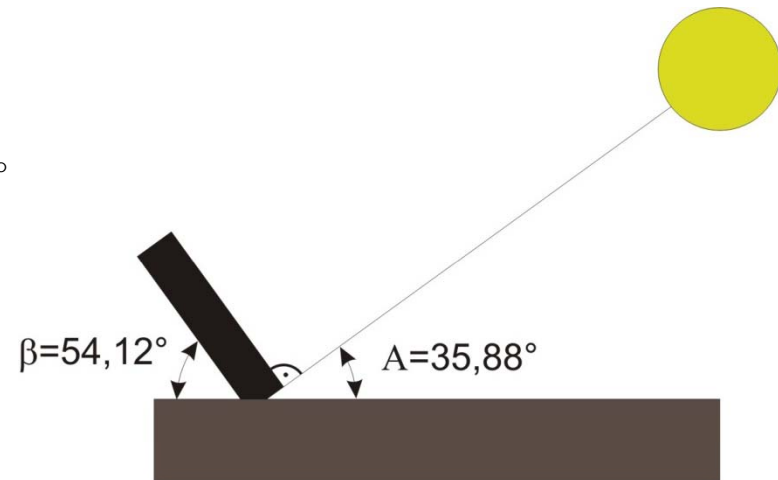
- Odredite optimalni kut nagiba za PV modul okrenut prema jugu i smješten u Zagrebu u solarno podne (doba dana kada je Sunce u najvišem položaju) 1. ožujka. Zemljopisna širina Zagreba je  $\phi=45,82^\circ$ .

$$n = 31 + 28 + 1 \Rightarrow n = 60$$

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(360^\circ \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \Rightarrow \delta = -8,3^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ - \phi + \delta \Rightarrow \alpha = 35,88^\circ$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha \Rightarrow \beta = 54,12^\circ$$

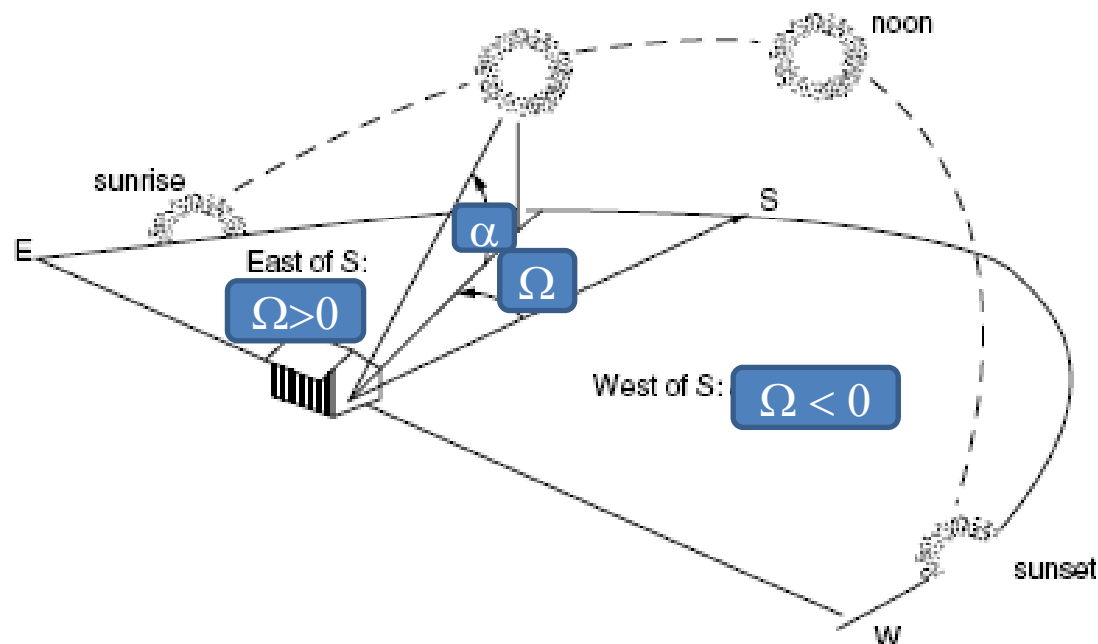




# Položaj Sunca



- Položaj Sunca određen je visinom Sunca ( $\alpha$ ) i azimutom ( $W$ )
- prema konvenciji – na sjevernoj hemisferi azimut Sunca je kut između pravca prema jugu i pravca projekcije Sunčevih zraka na horizont





- Satni kut Sunca ( $\omega$ ) je vrijeme izraženo pomoću kuta i računa se od Sunčeva podneva (doba dana kada je Sunce u najvišem položaju – odgovara kutu od  $\omega = 0^\circ$ ) – računa se tako da se interval od Sunčeva podneva (izražen u satima) pomnoži s  $15^\circ$  negativno za prijepodne i pozitivno za poslijepodne (dogovor)
- Azimut Sunca – kut na ravnini horizonta – vidi primjer 3.

$$\sin \Omega = \frac{-\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}$$

- Kut izlaska (zalaska Sunca) na horizontalnu ravninu  $\omega_s$  ( $\alpha$  je  $0^\circ$ , odnosno  $180^\circ$ ) – izraz vrijedi za gornju granicu atmosfere

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega; \quad \cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta$$
$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$$

- Trajanje Sunčevog dana od izlaska do zalaska:

$$Z = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$$



## Primjer 3



- Odredite visinu Sunca i azimutni kut Sunca u 3 sata poslijepodne u Zagrebu na dan ljetnog solsticija. Zemljopisna širina Zagreb je  $\phi = 45,82^\circ$ .
- Na dan ljetnog solsticija (21.6.) os Zemljine rotacije maksimalno je nagnuta k Suncu te je kut deklinacije Sunca  $\delta = 23,45^\circ$ .
- U 3 sata poslijepodne satni kut Sunca je dogovorno pozitivani iznosi  $\omega = 3 \cdot 15 = 45^\circ$ . Visinu Sunca određujemo iz izraza:

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \Rightarrow \alpha = 39,35^\circ$$

$$\sin \Omega = \frac{-\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \Rightarrow \sin \Omega = -0,8384 \Rightarrow \begin{aligned} \Omega_1 &= -57^\circ \\ \Omega_2 &= -123^\circ \end{aligned}$$

Pitanje je koja je vrijednost točna. Naime, u proljeće i ljeto u rano jutro i kasno poslijepodne moguće je da je azimutni kut Sunca po apsolutnoj vrijednosti veći od  $90^\circ$ . {u ovom primjeru je stvar jasna, ali...}

$$\cos \alpha \geq \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \Rightarrow |\Omega| \leq 90^\circ \text{ inace } |\Omega| > 90^\circ$$
$$\Omega = -57^\circ$$



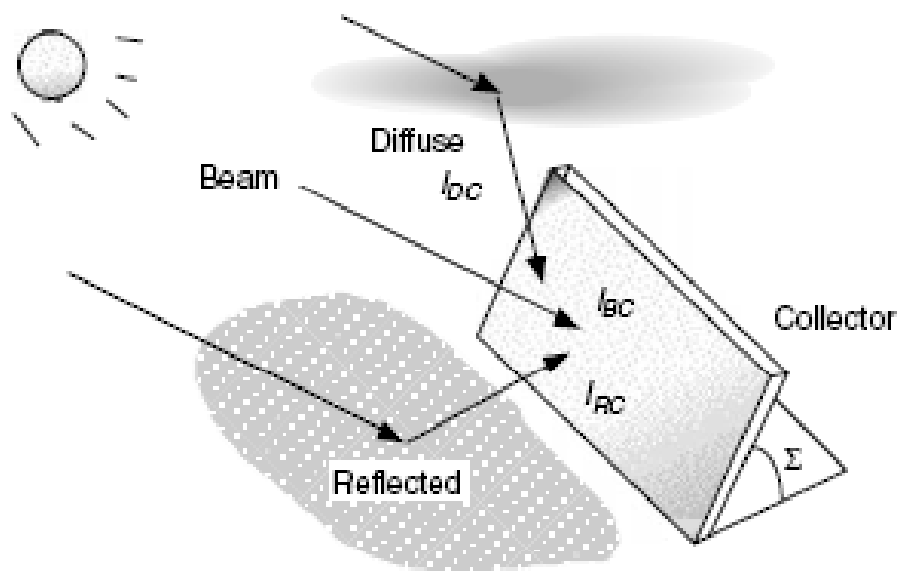
# Ozračenje



- Ukupno ozračenje prizemne horizontalne ili nagnute plohe na koju upada Sunčevo zračenje sastoji se od direktne (izravne) -  $G_b$ , difuzne (raspršene) -  $G_d$  i reflektirane (odbijene) -  $G_r$  komponente:

$$G = G_b + G_d + G_r$$

$$G_b = G_{bn} \sin \alpha \text{ za horizontalnu plohu}$$



Za ozračenje se osim simbola  $G$  koristi i simbol  $I$ , posebno u američkoj literaturi.



# Ozračenost



- **Ozračenost (iradijacija) [J/m<sup>2</sup>]** – integracijom ozračenja (iradijancije) po vremenu – satna, dnevna, mjesečna ili godišnja suma zračenja

$$H = \int_{t_1}^{t_2} G dt$$

- Ekstraterestičko ozračenje horizontalne plohe:

$$G_0 = \overline{G}_0 \left( 1 + 0,034 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right)$$

- Ekstraterestička ozračenost horizontalne plohe:

$$H_0 = \frac{86400}{\pi} \overline{G}_0 \left( 1 + 0,034 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \left( \frac{2\pi}{360} \omega_s \sin \varphi \sin \delta + \sin \omega_s \cos \varphi \cos \delta \right)$$



# Proračun ozračenosti prizemne horizontalne plohe Angstreom-Pageovom formulom

- Koristimo srednju dnevnu vrijednost ekstraterestičke ozračenosti, srednju dnevnu vrijednost relativnog trajanja sijanja Sunca i dva koeficijenta ovisna o lokaciji
- Relativno trajanje sijanja Sunca je omjer stvarnog trajanja sijanja Sunca i mogućeg trajanja sijanja Sunca (trajanja Sunčevog dana)
- Koeficijenti a i b izračunati su za neke lokacije, a mogu se koristiti i na lokacijama istog klimatskog područja, pr. za Zagreb a=0,20 i b=0,59; za Split a=0,24 i b=0,51

$$\bar{H} = \bar{H}_0 (a + b\bar{S})$$

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = (a + b\bar{S})$$

$K_T$  se naziva indeksom prozračnosti

# Ozračenost prizemne nagnute plohe – Kulišić metoda Liu, Jordana i Kleina



Odredite srednju dnevnu ozračenost plohe u Karlovcu u mjesecu svibnju, postavljenoj pod nagibom jednakim zemljopisnoj širini Karlovca ( $\varphi=45^\circ 30'$ ). Ozračenost na horizontalnu plohu za prosječan dan u mjesecu iznosi  $H = 19,94 \text{ MJ/m}^2$ , dok prosječna ekstraterestička ozračenost za svibanj iznosi  $H_0 = 39,09 \text{ MJ/m}^2$ . Albedo (faktor refleksije) iznosi 0,2. Prosječna deklinacija Sunca iznosi  $18,8^\circ$ . (Primjer 1.6 iz *riješeni primjeri sunce.pdf*)

$$\beta = \varphi = 45^\circ 30'$$

$$\rho = 0,2$$

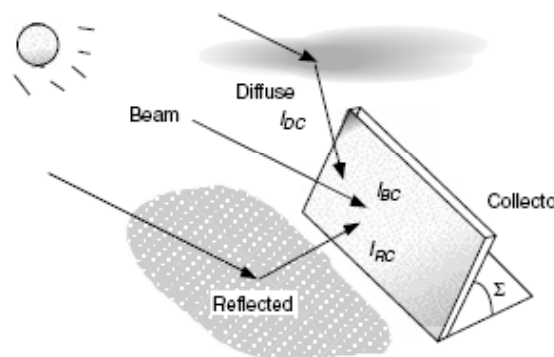
$$H = 19,94 \text{ MJ/m}^2$$

$$H_0 = 39,09 \text{ MJ/m}^2$$

$$\delta = 18,8^\circ$$

---


$$\overline{H}_{\beta \text{ srednja dnevna}} = ?$$



$$\overline{H}_{\beta} = \overline{H}_{b\beta} + \overline{H}_{d\beta} + \overline{H}_{r\beta}$$



$$\overline{H}_\beta = \overline{H}_{b\beta} + \overline{H}_{d\beta} + \overline{H}_{r\beta}$$



$$\overline{H}_{b\beta} = \overline{H}_b \overline{R}_{b\beta} = (\overline{H} - \overline{H}_d) \overline{R}_{b\beta}$$

$$\overline{R}_{b\beta} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \sin \varphi \sin \delta \frac{\pi}{180} \omega_s}$$

$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \rightarrow$  vremenski kut izlaska Sunca na horizontalnu plohu

$\omega'_s = \min\{\omega_s, \arccos[-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta]\} \rightarrow$  vremenski kut zalaska Sunca na nagnutu plohu

$$\omega_s = \arccos(-\tan 45,50 \tan 18,8) \Rightarrow \omega_s = 69,73^\circ$$

$$\omega'_s = \min\{69,73^\circ, \arccos[-\tan(45,5 - 45,5) \tan 18,8]\} = \min\{69,73^\circ, 90^\circ\} \Rightarrow \omega'_s = 69,73^\circ$$

$$\boxed{\overline{R}_{b\beta} = 0,984}$$



$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,60 - 4,17\bar{K}_T + 5,29\bar{K}_T^2 - 2,86\bar{K}_T^3 \text{ ili } \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = A + B\bar{K}_T; A = 1,05; B = 1,125$$

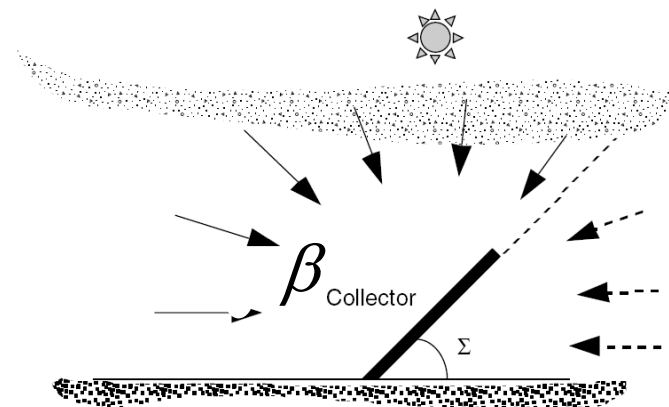
$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = \frac{19,94}{39,09} = 0,51 \Rightarrow \bar{H}_d = 0,47 \cdot 19,94 = 9,37 \text{ MJ/m}^2$$
$$\bar{H}_d = 1,62 \cdot 19,94 = 32,30 \text{ MJ/m}^2$$

$$\bar{H}_{b\beta} = \bar{H}_b \bar{R}_{b\beta} = (\bar{H} - \bar{H}_d) \bar{R}_{b\beta} = 10,40 \text{ MJ/m}^2$$

$$\bar{H}_{d\beta} = \bar{H}_d \frac{1 + \cos \beta}{2}$$



$$\bar{H}_{d\beta} = 7,97 \text{ MJ/m}^2$$





$$\bar{H}_{r\beta} = \rho \bar{H} \frac{1 - \cos \beta}{2} \Rightarrow \bar{H}_{r\beta} = 0,60 \text{ MJ/m}^2$$

$\rho \rightarrow$  faktor refleksije

$$\bar{H}_{\beta} = \bar{H}_{b\beta} + \bar{H}_{d\beta} + \bar{H}_{r\beta} =$$
$$0,40 + 7,97 + 0,6 = 18,97 \text{ MJ/m}^2$$



# Ashrae model



Model karakterizacije Sunčeva zračenja Američkog društva inženjera grijanja, hlađenja i klimatizacije (ASHRAE) na vedar dan temeljen je na empiričkim podacima prikupljenima sredinom 20. stoljeća u SAD-u. Riječ je o jednostavnom modelu ograničene točnosti, no vrlo je jednostavan za primjenu. Također valja napomenuti da zbog drugačijih atmosferskih prilika u Hrvatskoj u odnosu na SAD, uporaba ASHRAE modela unosi dodatnu pogrešku. Primjenljiv za situaciju čistog neba.

$$G_b = A \cdot e^{-km}$$

Direktno ozračenje na horizontalnu plohu

$$A = 1160 + 75 \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 275) \right]$$

A je prividno ekstraterestičko ozračenje,

$$k = 0,174 + 0,035 \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 100) \right]$$

k je koeficijent optičke dubine (koeficijent apsorpcije),

$$m = \frac{1}{\sin \alpha}$$

m je optička masa zraka.

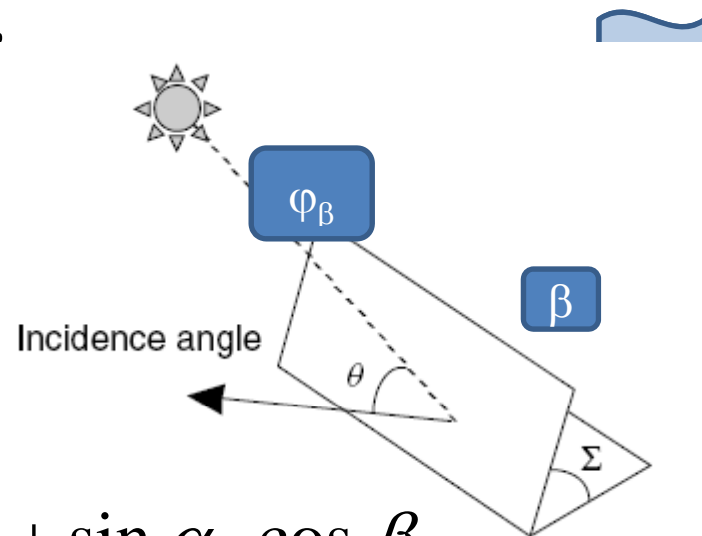
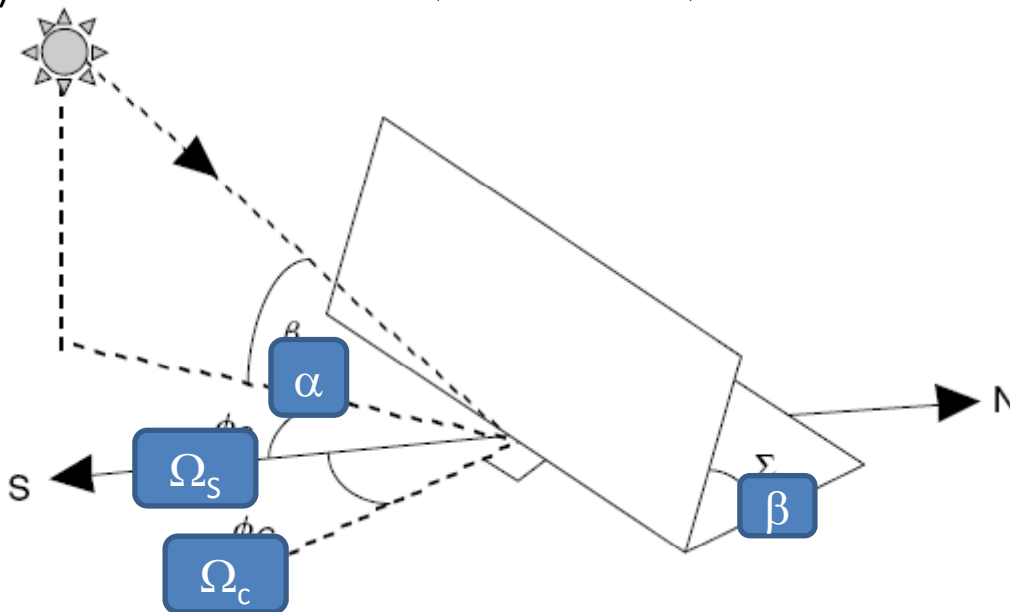


# Direktno ozrače

Direktno ozračenje na plohu pod kutem

$$G_{b\beta} = G_b \cdot \cos \varphi_\beta$$

$$\cos \varphi_\beta = \cos \alpha \cdot \cos(\Omega_s - \Omega_c) \cdot \sin \beta + \sin \alpha \cdot \cos \beta$$



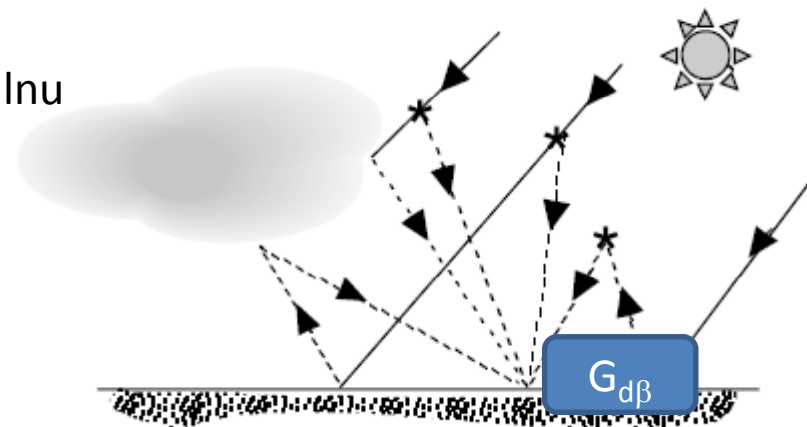


# Difuzno ozračenje



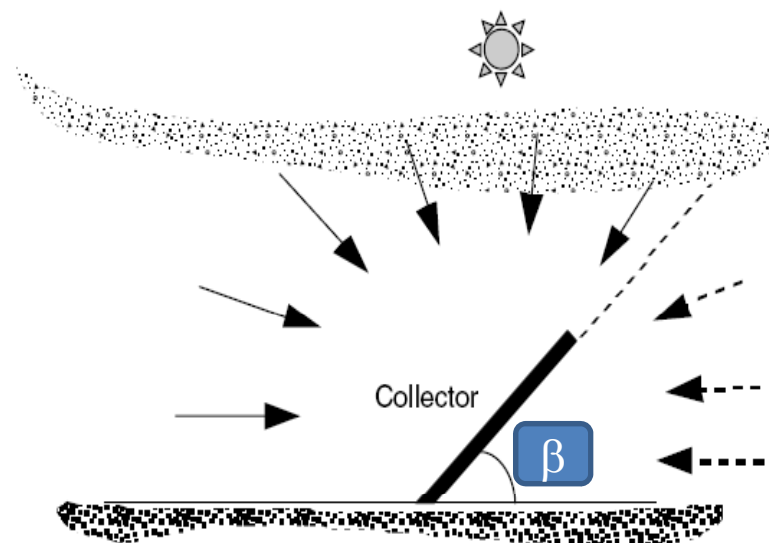
$G_d = C \cdot G_b$  Difuzno ozračenje na horizontalnu plohu

$$C = 0,095 + 0,04 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 100) \right]$$



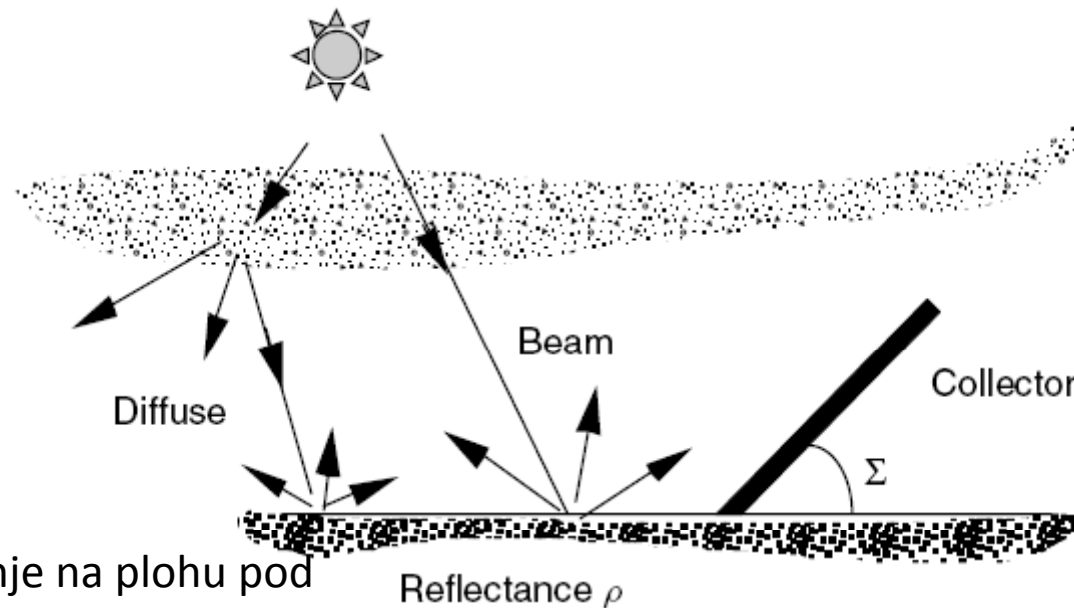
Difuzno ozračenje na plohu pod kutem

$$G_{d\beta} = G_d \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$$





# ☀️ Reflektirano ozračenje



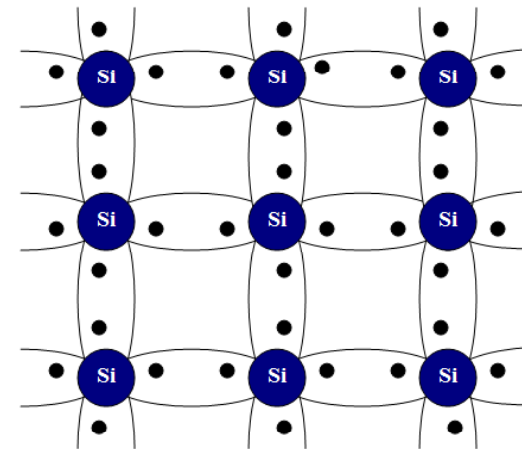
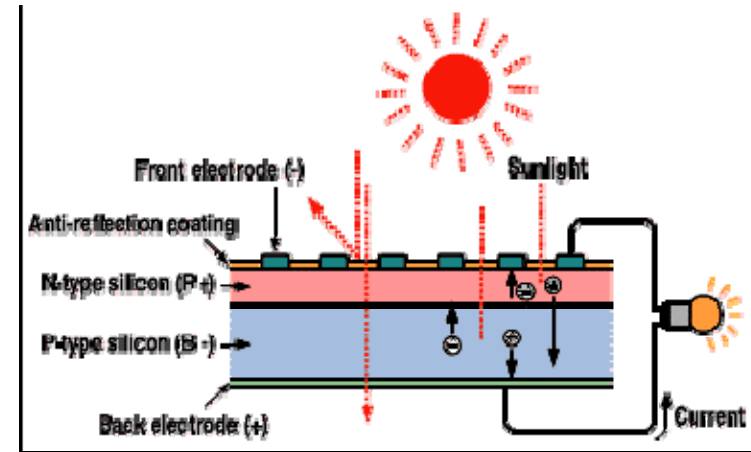
Reflektirano ozračenje na plohu pod kutem

$$G_{r\beta} = \rho \cdot (G_d + G_b) \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

# Fotonaponska konverzija

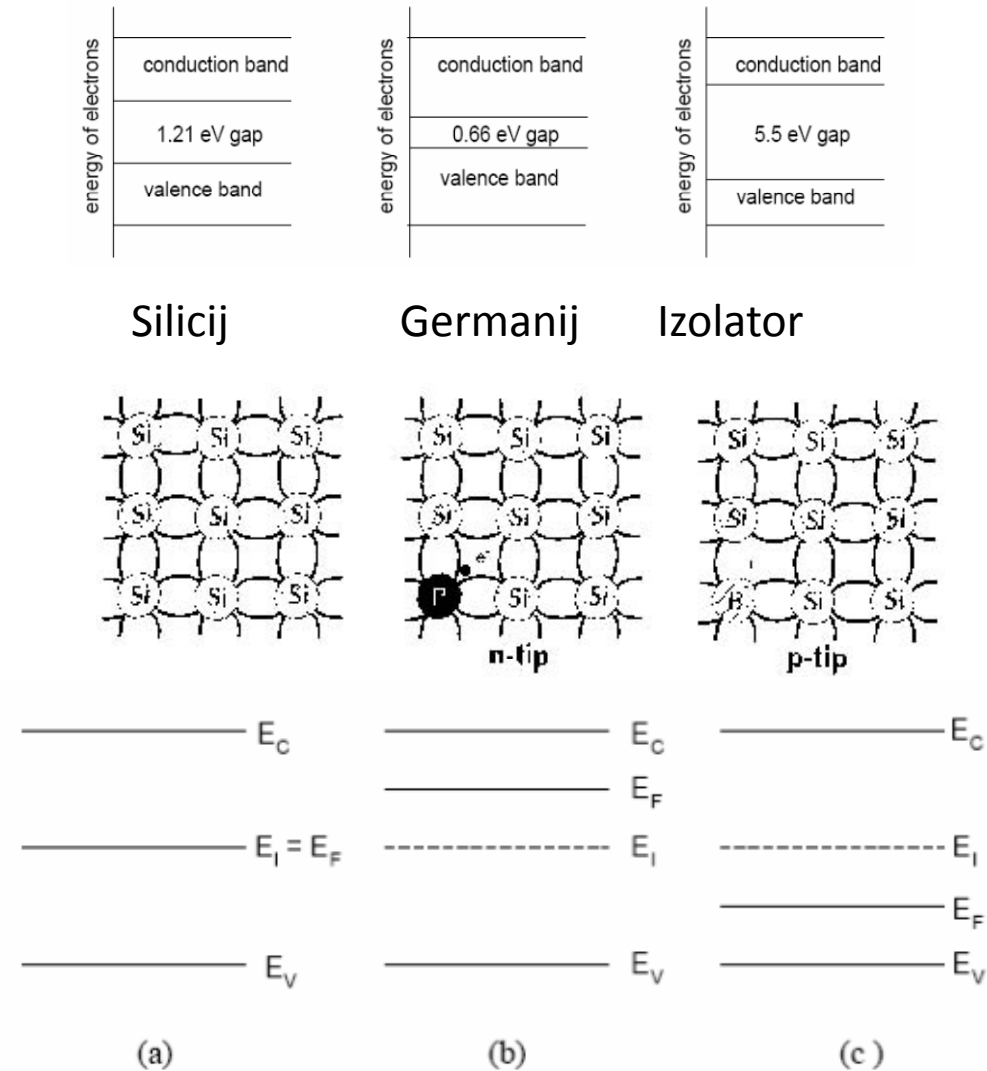


- Silicijeva solarna ćelija je p-n spoj s rešetkastim metalnim kontaktom (max 5% površine) na prednjoj strani i cjelovitim metalnim kontaktom na zadnjoj strani
- Prednja strana prekrivena prozirnim antirefleksijskim slojem
- Napon od približno 0,5 V i struja oko 20-35 mA/cm<sup>2</sup>
- Atomi u kristalnoj rešetci poluvodiča (pr. <sup>14</sup>Si) vezani su kovalentnom vezom; konfiguracija 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>2</sup>



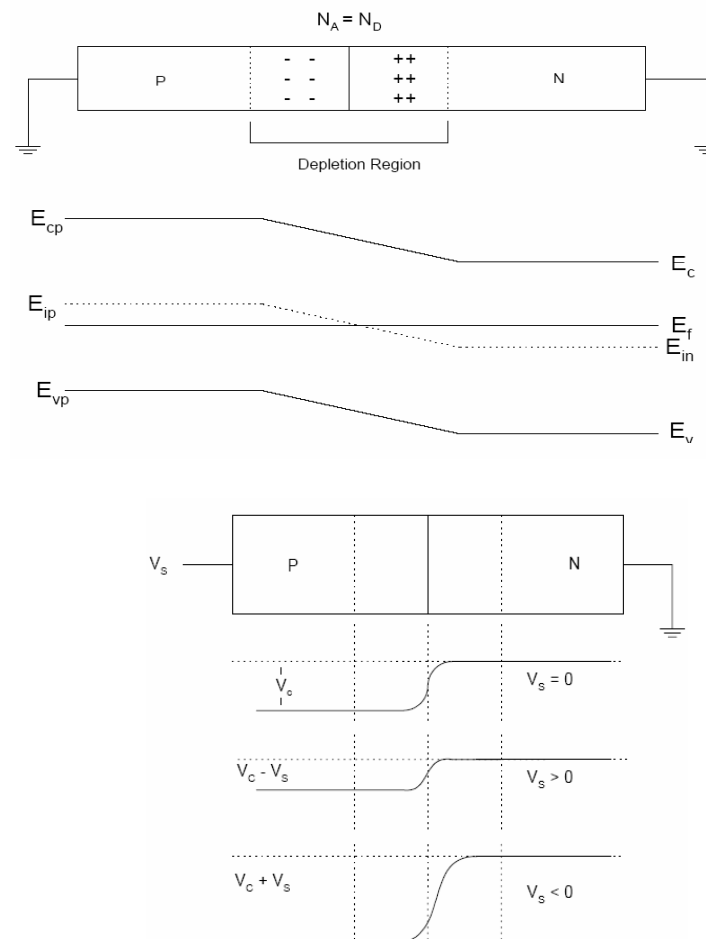


- Na apsolutnoj nuli valentna je vrpca popunjena elektronima, a vodljiva je vrpca prazna
- Između vrpca nalazi se zabranjeni pojas širine  $E_g$
- Povećanjem temperature elektroni toplinskom uzбудom prelaze iz valentne u vodljivu vrpcu ostavljajući šupljine u valentnoj vrpici
- Dodavanjem primjesa može se dobiti n (P, As, Sb) ili p tip (B, Al, Ga, In) poluvodiča
- Primjese stvaraju dodatne energetske nivoe unutar zabranjenog pojasa (donorski i akceptorski nivo)



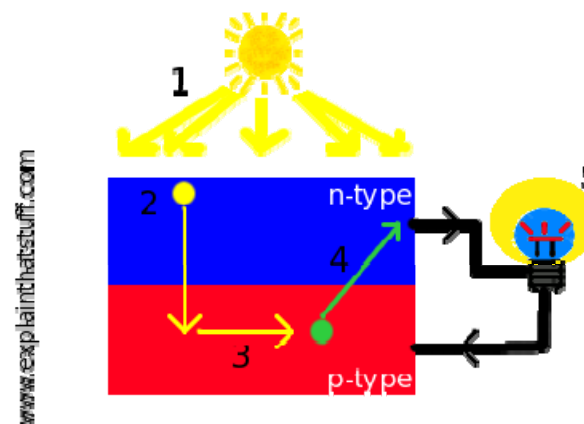
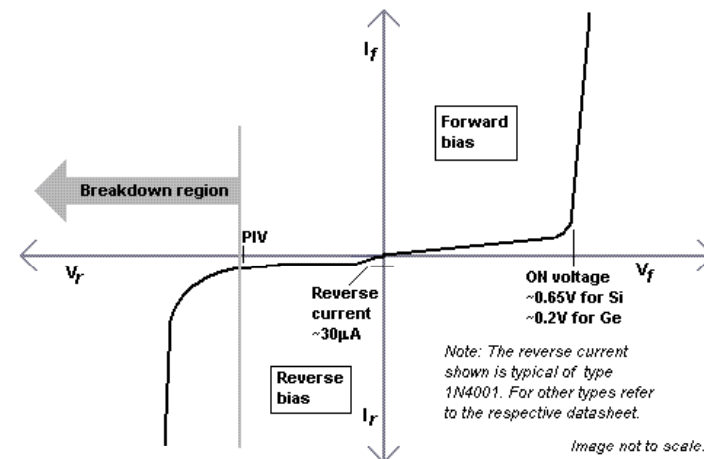


- Pri nastajanju p-n spoja elektroni iz n područja difundiraju u p područje i rekombiniraju se sa šupljinama i obrnuto – stvara se osiromašeno područje i potencijalna barijera (unutarnje električno polje) koje zaustavlja difuziju
- Propusna i nepropusna polarizacija p-n spoja



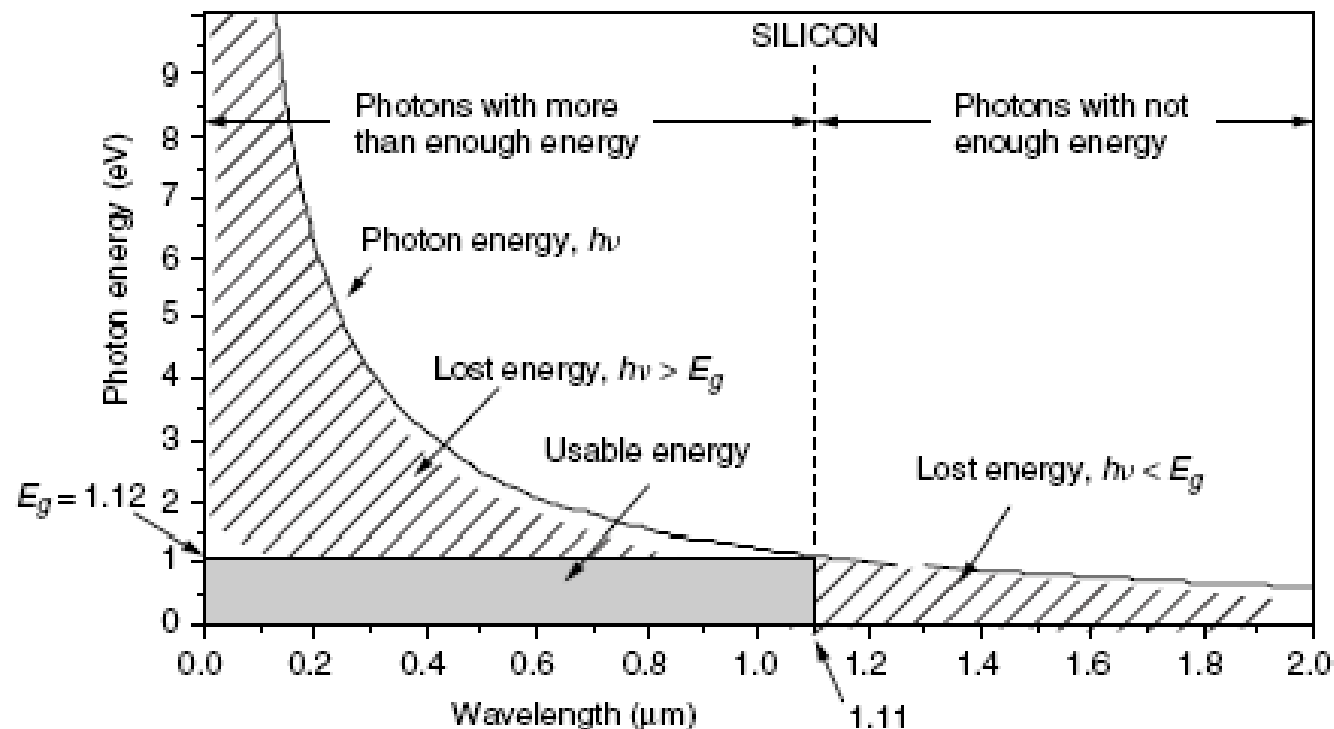


- Strujno – naponska karakteristika p-n spoja:  
 $I_d = I_0(e^{eU/kT} - 1)$
- Kad Sunčevo zračenje obasja p-n spoj apsorbirani fotoni dovoljno velike energije proizvode parove elektron-šupljina; nastane li apsorpcija unutar ili u blizini p-n spoja unutrašnje električno polje odvaja nastali par; skupljanje elektrona i šupljina na odgovarajućim stranama uzrokuje elektromotornu silu;  $I = I_d - I_{ph}$

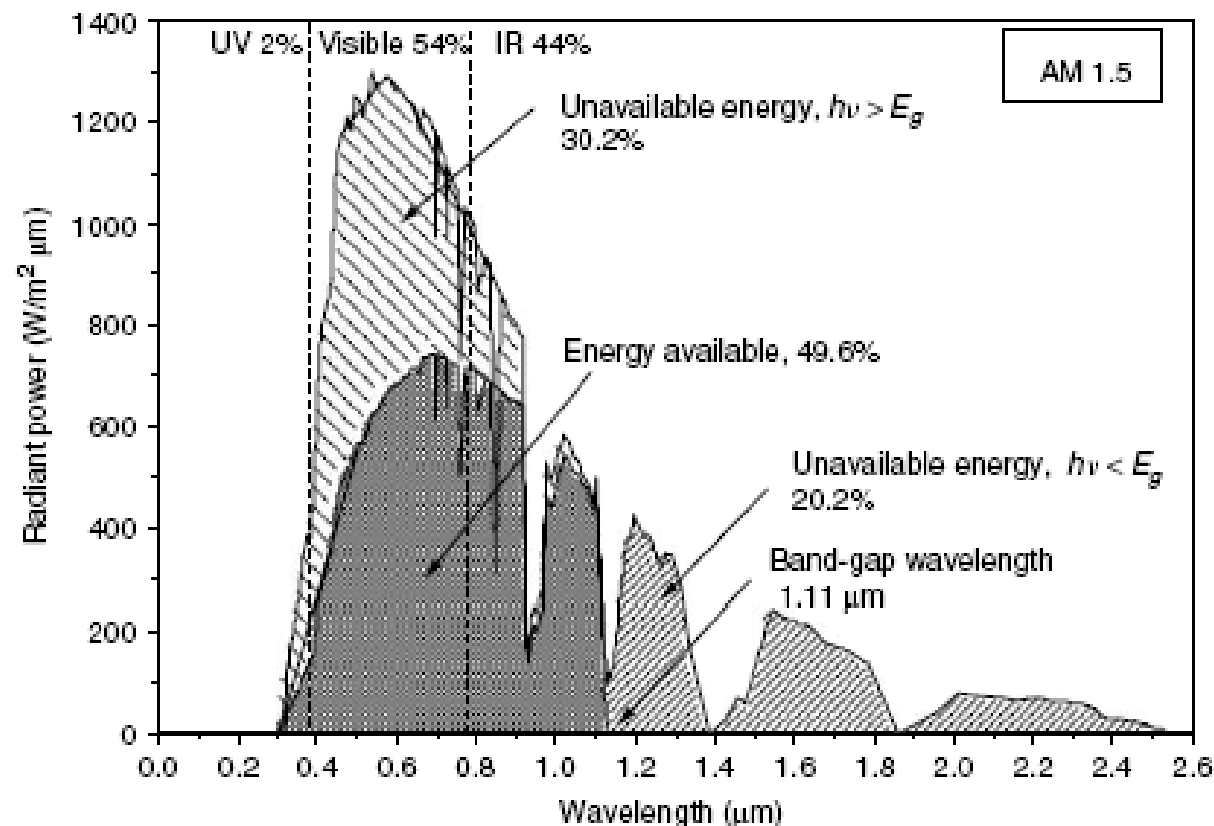




# Veza sunčevog spektra i širine zabranjenog pojasa



**Figure 8.9** Photons with wavelengths above 1.11 μm don't have the 1.12 eV needed to excite an electron, and this energy is lost. Photons with shorter wavelengths have more than enough energy, but any energy above 1.12 eV is wasted as well.



**Figure 8.10** Solar spectrum at AM 1.5. Photons with wavelengths longer than 1.11 μm don't have enough energy to excite electrons (20.2% of the incoming solar energy); those with shorter wavelengths can't use all of their energy, which accounts for another 30.2% unavailable to a silicon photovoltaic cell. Spectrum is based on ERDA/NASA (1977).

# ☀ Efikasnost ćelije i širina zabranjenog pojasa 🏠

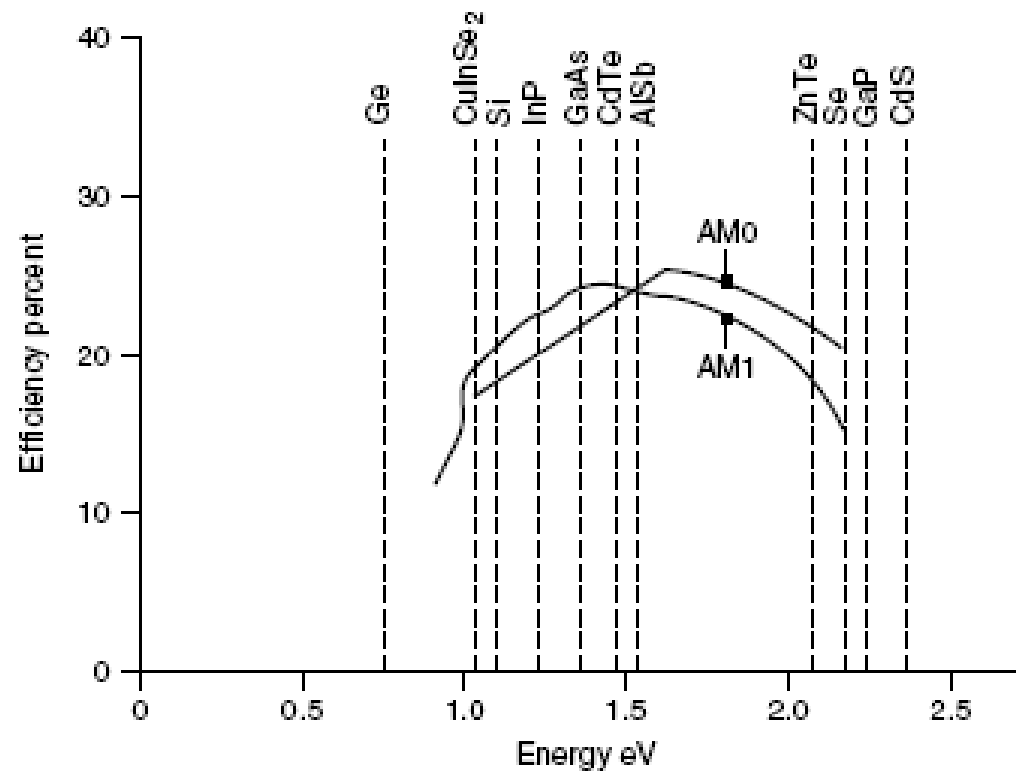
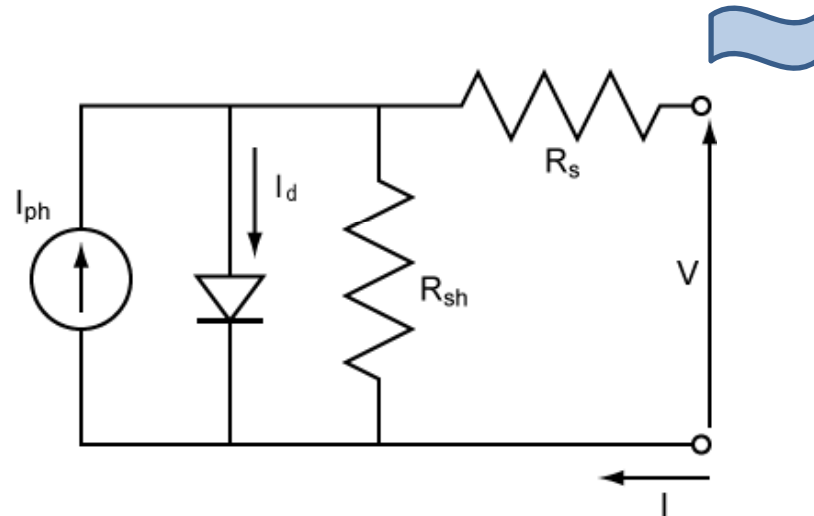


Figure 8.11 Maximum efficiency of photovoltaics as a function of their band gap. From Hersel and Zweibel (1982).





- Osvijetljena solarna ćelija ponaša se kao izvor konstantne struje
- Izlazna struja  $I$  jednaka je struji koju proizvodi sunčeva svjetlost  $I_{ph}$ , umanjenoj za, zanemarivu, struju diode  $I_d$  i struju šanta  $I_{SH}$ .
- Otpor šanta  $R_{SH}$  je obrnuto razmjernan rasipnoj struji prema zemlji.
- Serijski otpor  $R_s$  predstavlja unutarnji otpor toku struje i ovisi o dubini p-n spoja, nečistoćama i otporu spoja.
- U idealnoj fotonaponskoj ćeliji  $R_s = 0$  (nema serijskog gubitka) i  $R_{SH} = \infty$  (nema rasipanja prema zemlji).
- U običnoj visoko kvalitetnoj silicijevoj ćeliji veličine jednog kvadratnog inča  $R_s = 0,05$  do  $0,10 \Omega$  i  $R_{SH} = 200$  do  $300 \Omega$ .



$$R_p = R_{sh}$$

$$I = -I_0 \left( e^{e(U+R_s I)/kT} - 1 \right) + I_{ph} - \frac{U}{R_p}$$

$$\varepsilon = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} - 1 \right) - \text{napon praznog hoda}$$



- Snaga sunčane ćelije
- Maksimalna snaga sunčane ćelije
- Faktor punjenja pokazuje koliko se stvarna ćelija približuje idealnoj, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora ćelije (0,7 – 0,9)
- Efikasnost ćelije je omjer maksimalne snage i ulazne snage Sunčevog zračenja

$$P = UI = U(I_{ph} - I_0 e^{eU/kT} + I_0)$$

$$P_{\max} = I_{\max} U_{\max} = \varepsilon I_{ks} F$$

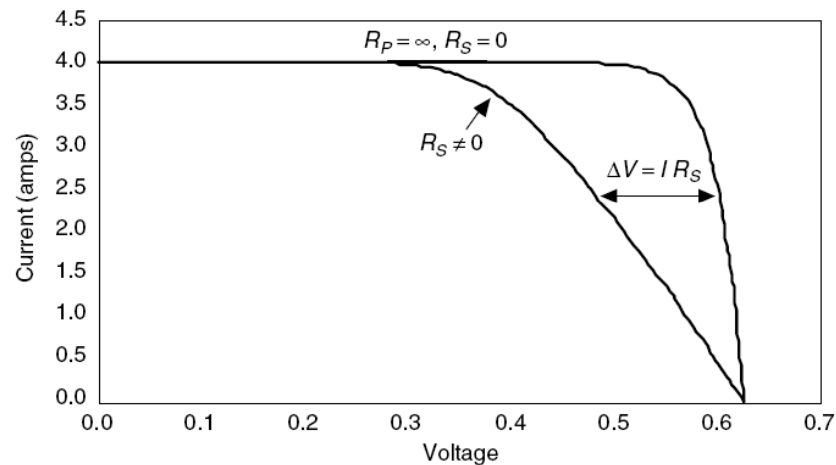
$$F = \frac{I_{\max} U_{\max}}{\varepsilon I_{ks}} \rightarrow \text{faktor punjenja}$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_U} = \frac{P_{\max}}{GA}$$

$G \rightarrow$  Suncevo ozračenje

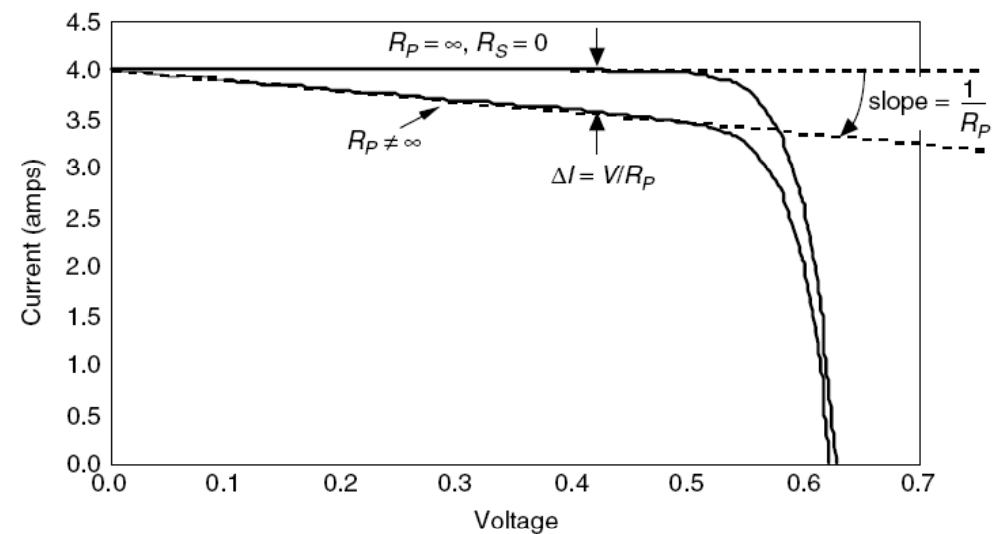


# Utjecaj serijskog i paralelnog otpora



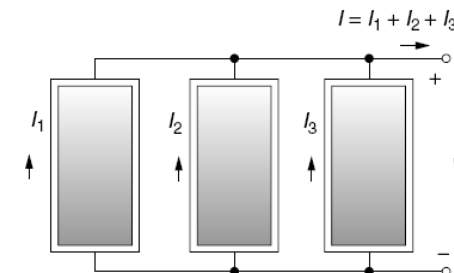
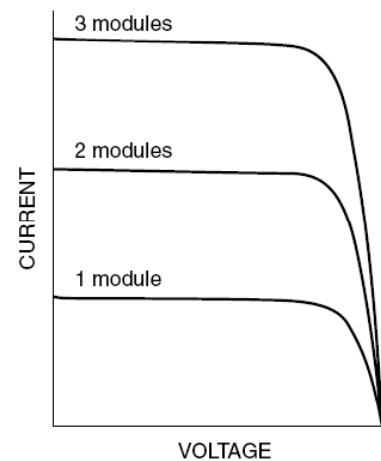
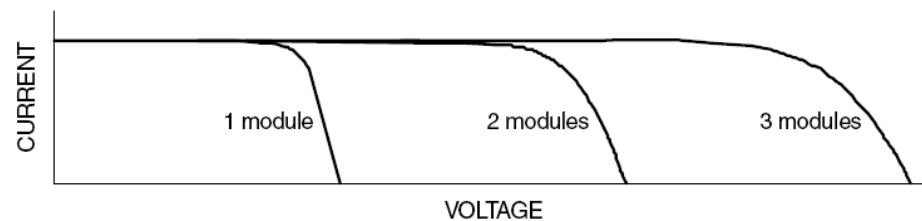
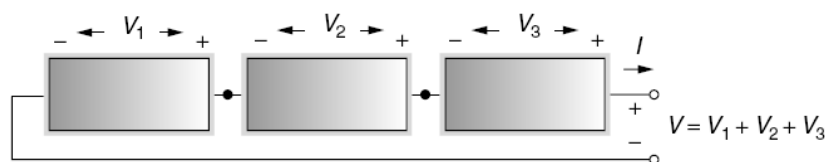
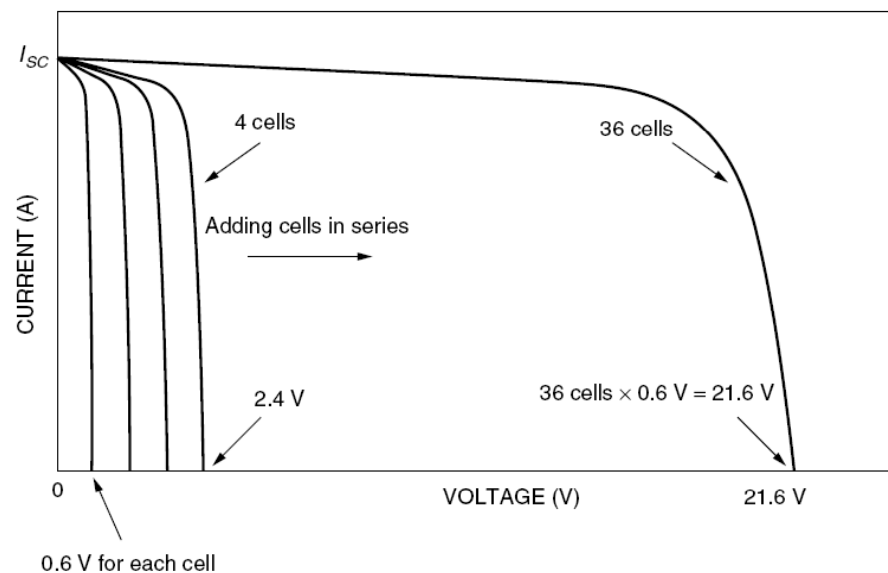
Paralelni otpor uvodi pomak prema dolje na I-U karakteristici – za isti napon struja je manja

Serijski otpor uvodi pomak ulijevo na I-U karakteristici – za istu struju napon je manji



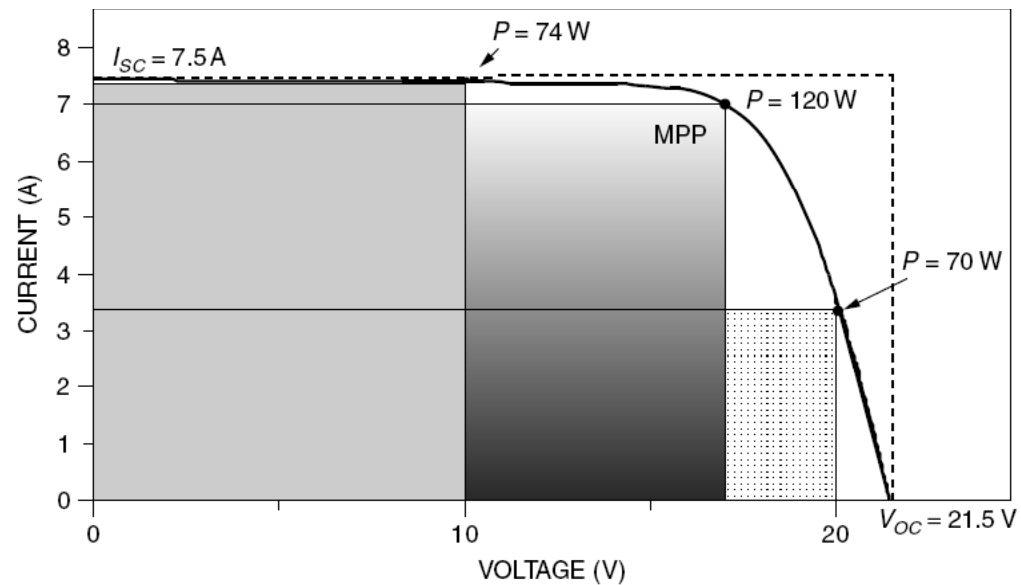
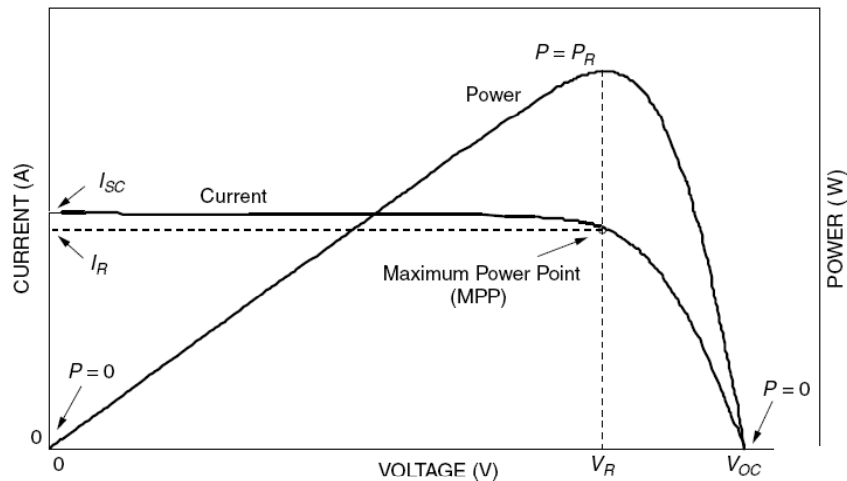


# Ćelija, modul, panel

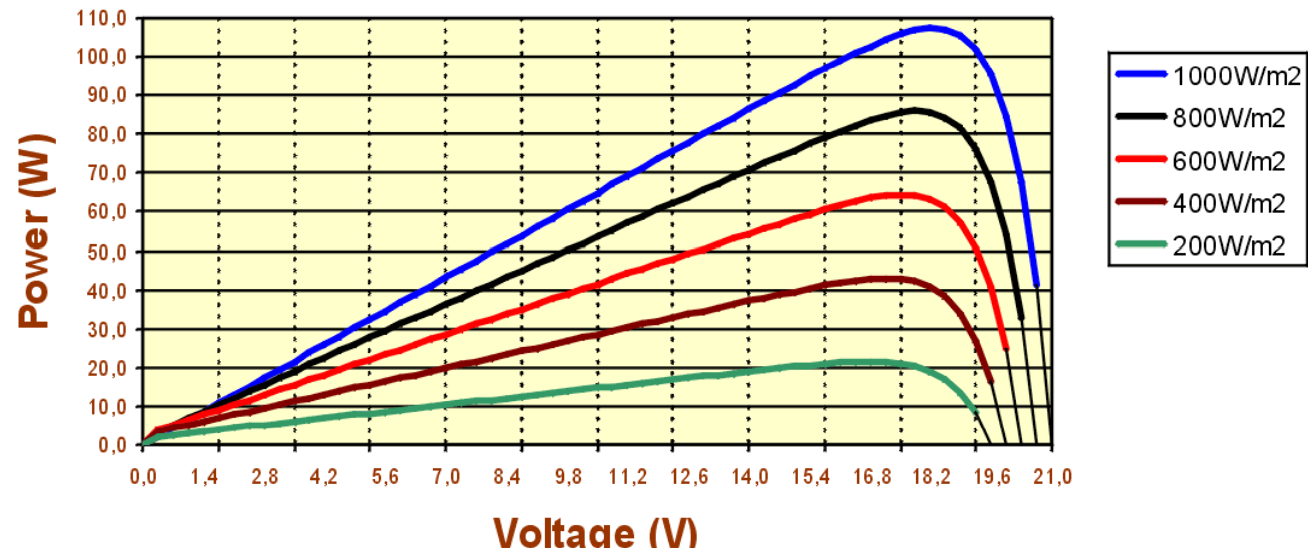




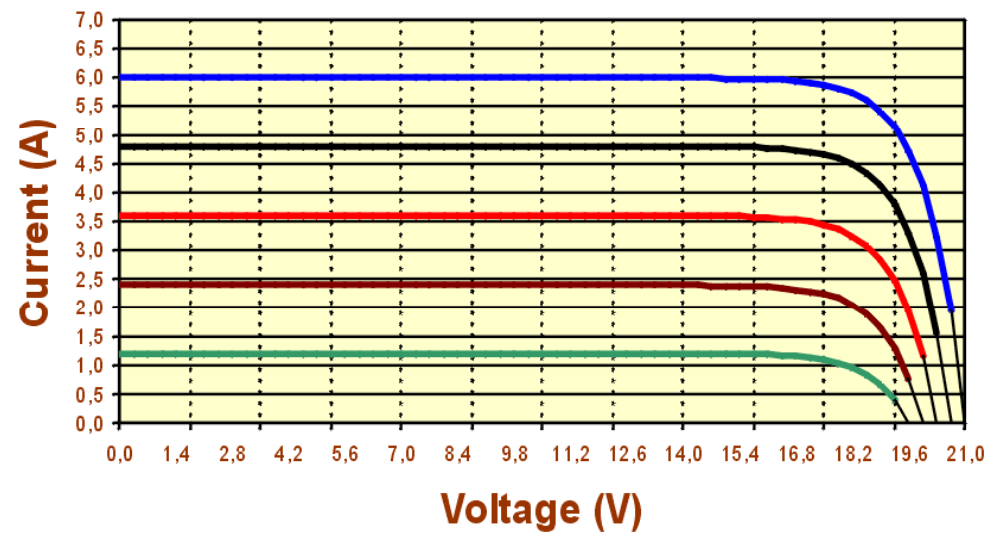
# i-u karakteristika u stc uvjetima



## Module power characteristics

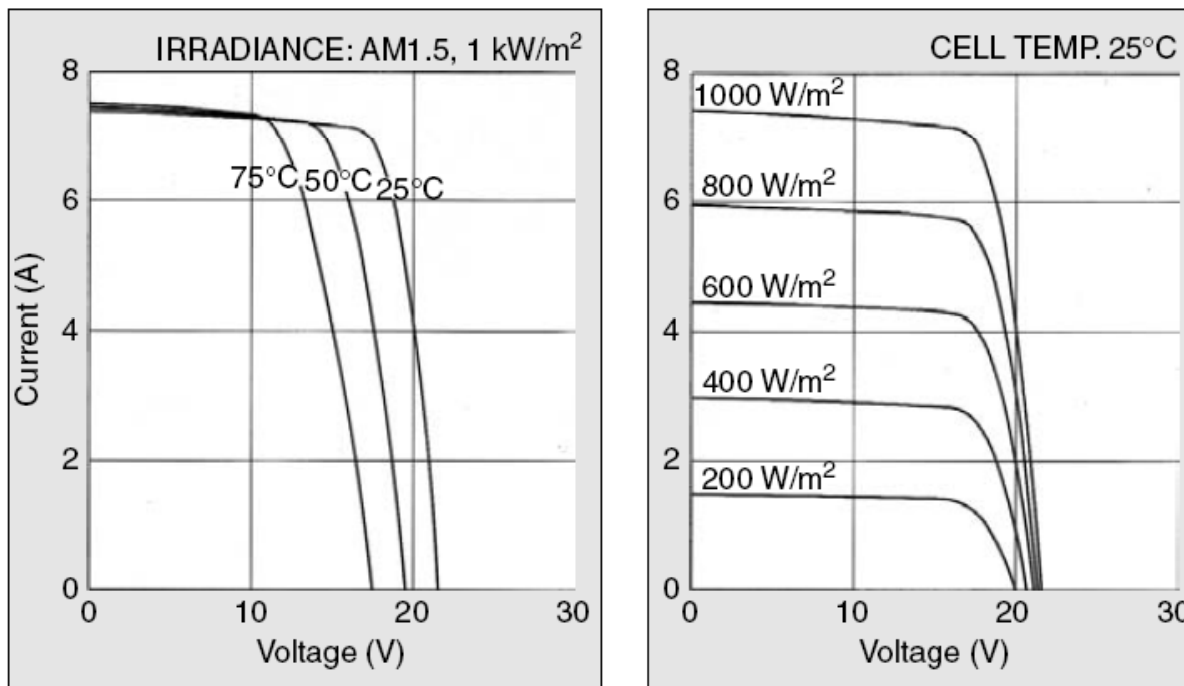


## Module I-U characteristics





# Utjecaj temperature i insolacije na i-u karakteristiku



**Figure 8.36** Current-voltage characteristic curves under various cell temperatures and irradiance levels for the Kyocera KC120-1 PV module.



# STC i NOCT uvjeti



- STC – standard test conditions – uvjeti testiranja panela i pod tim uvjetima vrijede nazivni podaci
  - Ozračenje 1000 W/m<sup>2</sup> uz spektar koji odgovara AM1,5
  - Temperatura ćelije 25°
- NOCT – nominal operating cell temperature – temperatura ćelije u uvjetima:
  - Ambijentalna temperatura 20°
  - Ozračenje 0,8 kW/m<sup>2</sup>
  - Brzina vjetra 1 m/s

$$T_{cell} = T_{amb} + \left( \frac{NOCT - 20^{\circ}}{800} \right) \cdot G$$





- Smanjenjem širine zabranjenog pojasa povećava se opseg apsorpcije valnih duljina, ali se povećava i inverzna struja sazićenja koja smanjuje EMS
- Najveća osjetljivost za valne duljine oko  $0,8 \mu\text{m}$

