



# Elettrotecnica industriale

Seminario sul Fotovoltaico

# La definizione di fonti rinnovabili

**Le fonti rinnovabili sono definite come le fonti energetiche che risultano essere pressoché inesauribili e sono in grado di rigenerarsi in tempi brevi.**

# La radiazione solare

- L'energia irradiata dal Sole ha origine in seguito a processi di fusione dell'idrogeno contenuto al suo interno. La propagazione della radiazione avviene in maniera sferica, fino al raggiungimento della fascia esterna dell'atmosfera terrestre. All'interno del Sole si hanno moltissime reazioni nucleari di fusione, tra cui vi è la reazione che trasforma l'idrogeno in elio; tale processo genera calore che viene poi trasmesso verso gli strati esterni per i tre processi di trasferimento del calore, irraggiamento, conduzione e convezione (par. 4.1.1). L'energia viene poi trasmessa attraverso lo spazio per irraggiamento.
- La fotosfera è lo strato esterno della zona convettiva e può essere considerata come la sorgente della maggior parte della radiazione solare. L'irraggiamento complessivo solare, calcolato a livello della fotosfera, è circa  $63000 \text{ KW/m}^2$ , che corrisponde ad una temperatura di  $5779 \text{ K}$ .
- Il valore della potenza irradiata subisce una attenuazione geometrica dovuto alla propagazione. Quando la radiazione ha percorso la distanza Sole-Terra (149.5 milioni di Km), assume un valore nettamente inferiore e quantificabile a  $1367 \text{ W/m}^2$ . Questo valore di radiazione prende il nome di costante solare. Dato che la distanza Terra-Sole varia periodicamente durante l'anno, la costante solare indicata è invece un valore medio; il valore dell'irraggiamento varia comunque, rispetto a tale valore tra 3%, assumendo il valore massimo durante il periodo invernale e il minimo durante quello estivo.

# La Radiazione Solare

Emissioni sole: 175-178 miliardi MW, solo  $1350 \text{ W/m}^2$  raggiungono l'atmosfera (variabile durante l'anno del  $\pm 3\%$  a causa dell'ellitticità dell'orbita terrestre). Solo 1000 arrivano alla superficie terrestre (valori medi e con cielo sereno).

La radiazione solare fuori dell'atmosfera (detta costante solare,  $H_0$ ) ha una intensità pari a  $1,4 \text{ kW/m}^2$ .

L'energia solare sfruttabile è sotto forma di radiazione ed ha una lunghezza d'onda variabile tra 0.2 e 3 micron.

La radiazione solare fuori dall'atmosfera ha valore costante tutto l'anno.

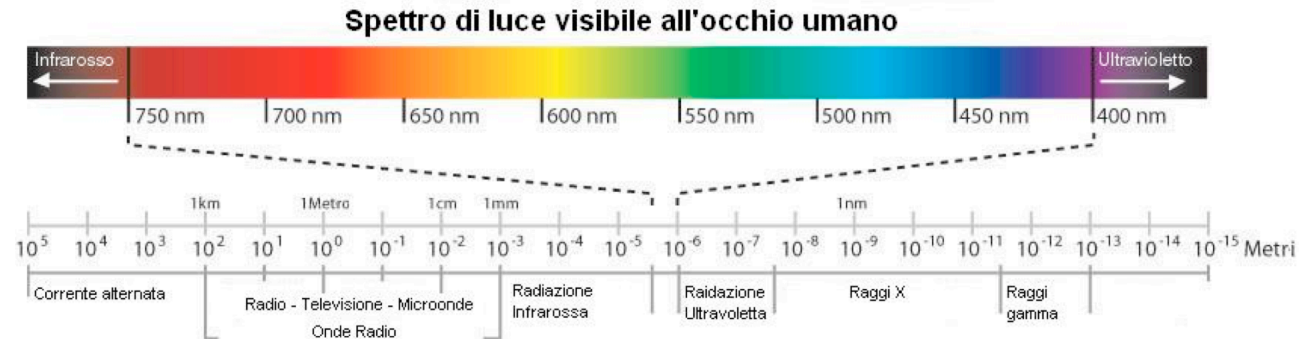
La radiazione solare che raggiunge la terra ( $H_h$ ) dipende da fattori quali:

- Latitudine; Altitudine; Stagione; Ora; Meteo locale.

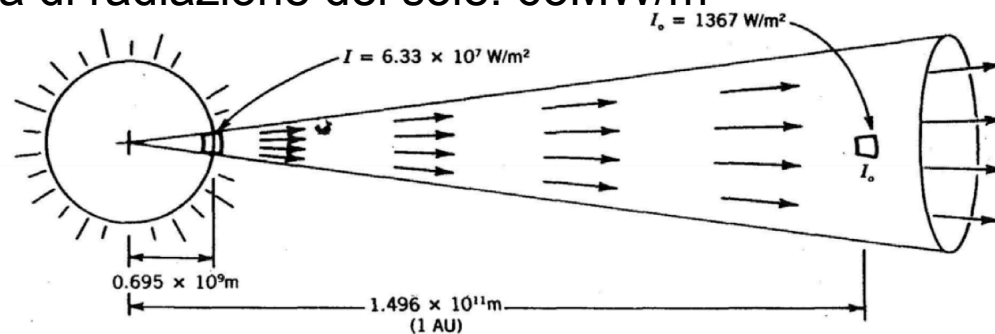
(Fonte: UNIFI – Dip. Energetica)

# Spettro della radiazione elettromagnetica e Costante solare

1100nm vicino infrarosso limite massimo per la generazione fotovoltaica



Intensità di radiazione del sole:  $63 \text{ MW/m}^2$



Processi di fusione dell'idrogeno

Distanza Terra-Sole : 147 milioni di km

# La radiazione solare

- Radiazione solare = radiazione elettromagnetica
- Fotone:
  - ↳ particella elementare (quanto) della radiazione solare
  - ↳ sia Onda che Particella: dualismo onda-corpuscolo

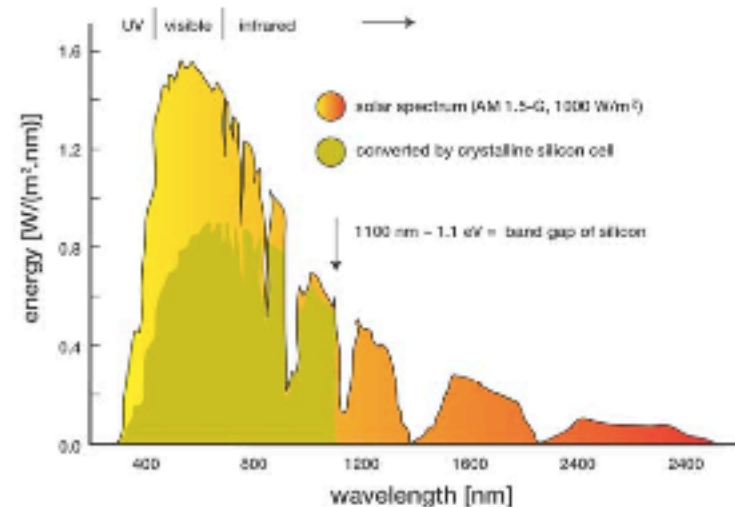
**La luce è composta da fotoni di energia differenti:**

$$E_{\text{fotoni}} = h\nu$$

$$\nu = c / \lambda$$

Spettro solare:

- ultravioletto (UV):  $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$
- visibile (VIS):  $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$
- infrarosso (IR):  $0.78 < \lambda < 10.0 \mu\text{m}$



source: [www.vicphysics.org/documents/events/stav2005/spectrum.JPG](http://www.vicphysics.org/documents/events/stav2005/spectrum.JPG)

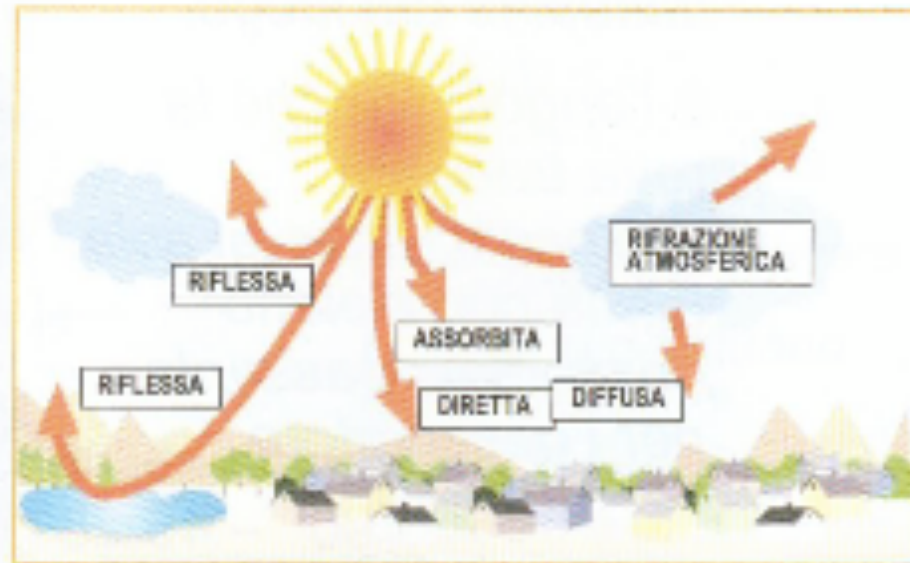
Spettro del corpo nero: SOLE

# La radiazione solare

## ● radiazione solare

- *è l'energia ricevuta all'interno dell'atmosfera sottoforma di onde elettromagnetiche e si divide in:*

- diretta
- diffusa
- riflessa



# La Radiazione Solare

Quando la radiazione attraversa l'atmosfera, viene scissa in 4 parti:

- Riflessa (dalle nubi)
- Diffusa in tutte le direzioni (urto con  $N_2$ ,  $O_2$ , vapore,  $CO_2$ ,  $O_3$ )
- Assorbita e riemessa come IR
- Diretta (raggiunge la Terra)

Insolazione = energia media giornaliera ( $kWh/m^2$  al giorno o mese o anno) che colpisce una superficie piana orizzontale. Inclinazione e orientamento del pannello influenzano l'energia prodotta. L'ideale è l'incidenza perpendicolare al pannello!

Irraggiamento = Potenza istantanea (in  $kW/m^2$ ) che colpisce la superficie terrestre. É maggiore avvicinandosi all'equatore.

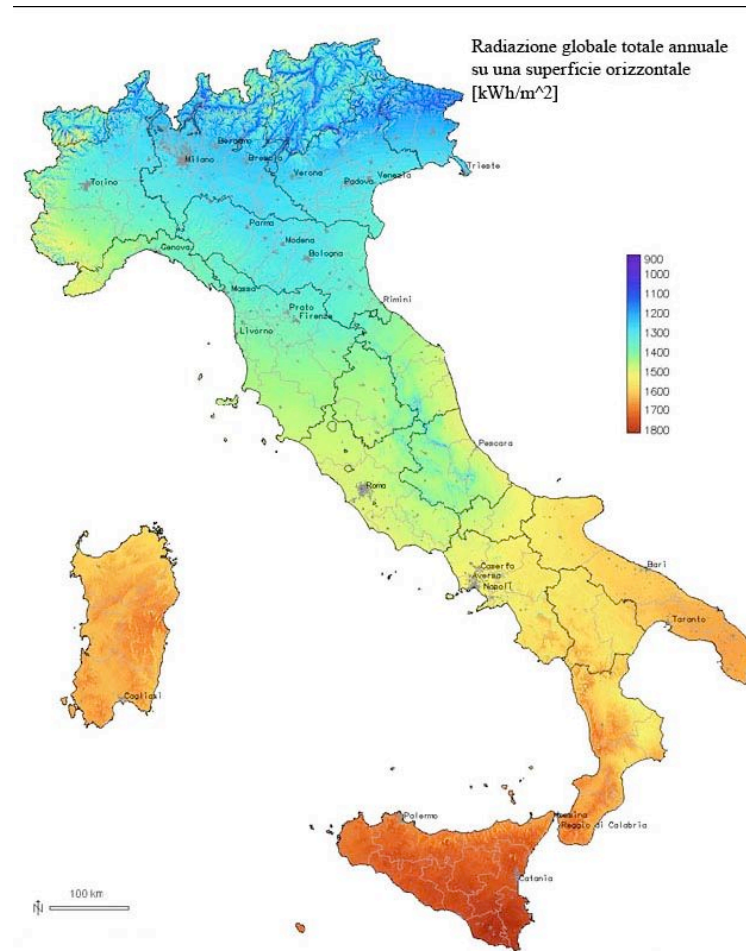


# La radiazione solare

Strumenti per la misura della radiazione solare

- Piranometro
- Piroeliometro
- Albedometro

# Diagramma di radiazione solare



La radiazione globale totale Nord Italia:  
1100kWh/m<sup>2</sup> e 1300kWh/m<sup>2</sup>

Centro italia:  
1200kWh/m<sup>2</sup> e  
1600 kWh/m<sup>2</sup>

Sud italia:  
1600kWh/m<sup>2</sup> e  
1800kWh/m<sup>2</sup>

## Grafico a barre

# Declinazione e Angolo solare

## Declinazione

- Posizione angolare del sole all'apice (mezzogiorno solare) rispetto al piano dell'Equatore. Varia tra  $-23.45^\circ$  (il 21/12) e  $+23.45^\circ$  (il 21/6).

Equazione di Cooper (espressa in  $^\circ$ )

$$\delta = 23.45 \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \quad n = \text{giorno dell'anno}$$

Solstizio d'inverno: 21/12

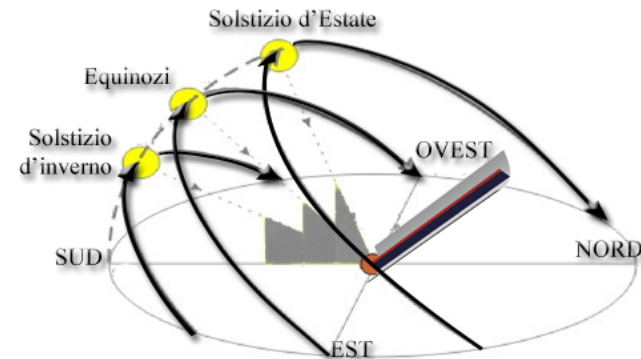
Solstizio d'estate: 21/6

Equinozio di primavera: 21/3

Equinozio d'autunno: 21/10

## Angolo di ora solare

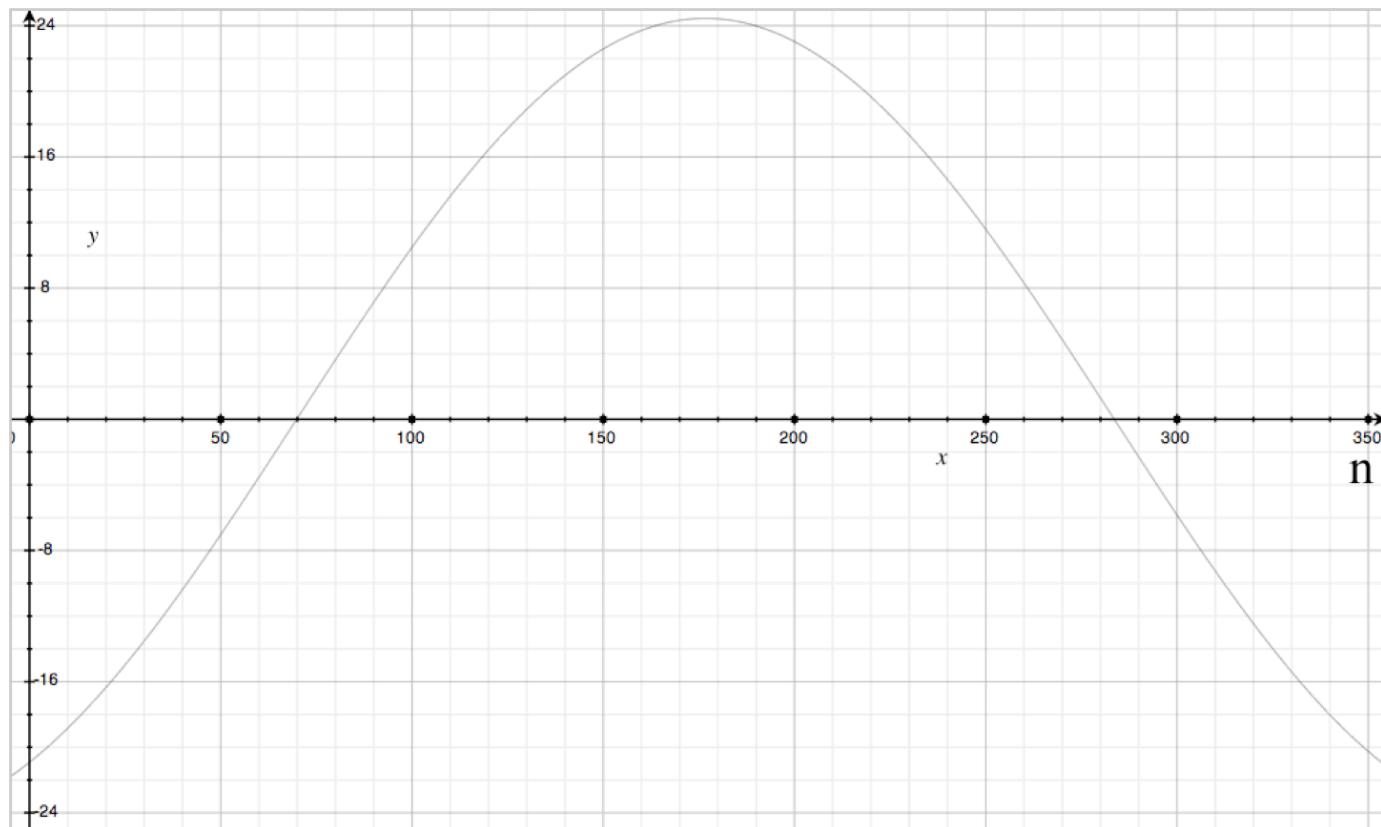
- Spostamento angolare ad Est o Ovest del Meridiano locale
- È 0 all'apice,
- Varia di  $15^\circ$  per ora



$$\alpha = 90^\circ - \text{Latitudine} + \text{declinazione}$$

Latitudine di Firenze:  $43^\circ 47' 14''\text{N}$

# Declinazione e Angolo solare

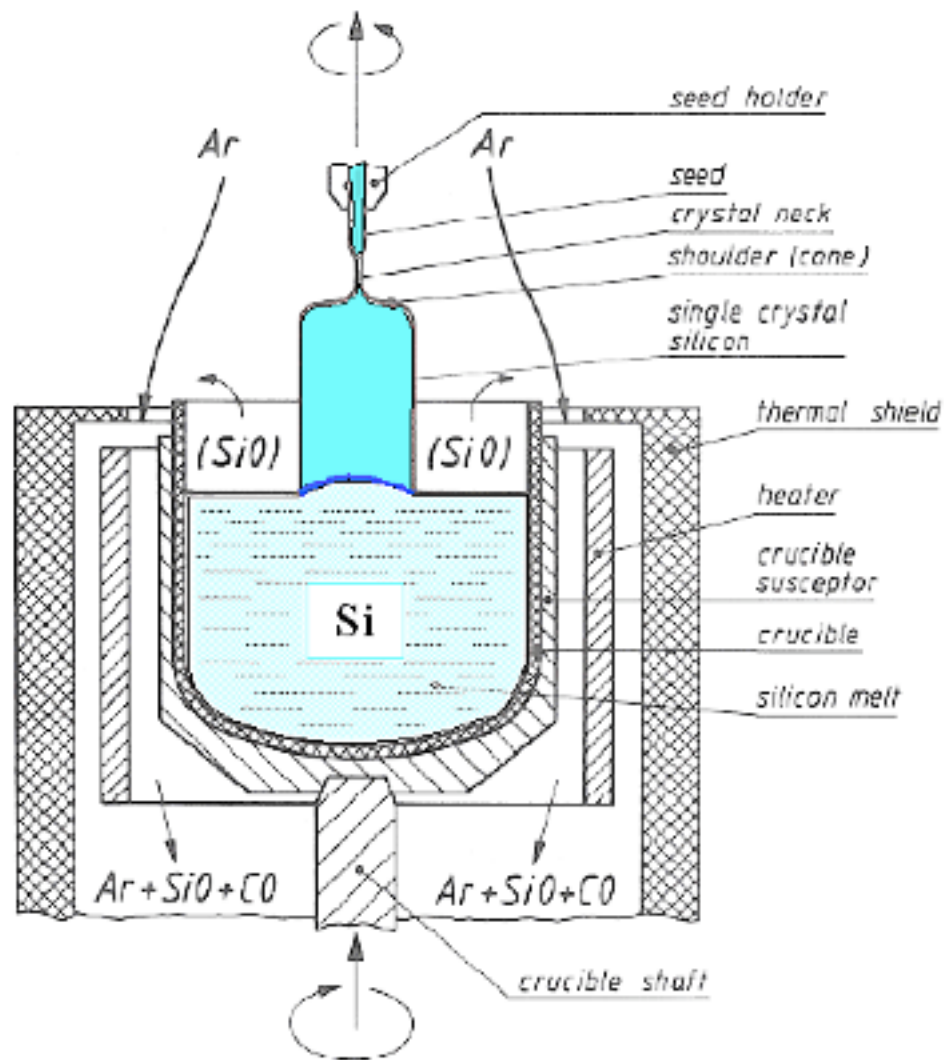


# Tecniche di realizzazione della cella fotovoltaica

- Metodo *Czochralski* = crescita epitassiale

Il processo consiste nel sollevamento verticale a bassissima velocità di un *seme monocristallino di silicio*, immerso inizialmente per pochi millimetri in un crogiolo contenente silicio puro fuso. Il seme monocristallino è, in pratica, una bacchetta con sopra un sottile strato di silicio in forma monocristallina. Gli atomi di silicio fuso, a contatto con il seme monocristallino, si orientano secondo il reticolo atomico della struttura del silicio; La temperatura del silicio nel crogiolo è mantenuta di pochi gradi superiore a quella di fusione (1414 °C), e aderendo al seme monocristallino, che gradualmente viene estratto dalla massa fusa, si solidifica molto rapidamente conservando la struttura monocristallina del seme a cui aderisce. Il controllo rigoroso della temperatura del materiale fuso, dell'atmosfera nella camera, e della velocità di estrazione, nonché assenza assoluta di vibrazioni, consente la produzione di fusi perfettamente cilindrici e altamente puri. L'operazione successiva consiste nel tagliare il fuso tramite un disco diamantato, ottenendo i dischi con spessore di pochi decimi di millimetro chiamati wafer; i Wafer costituiranno quindi il supporto (substrato) per i diversi dispositivi elettronici. Dato che la quantità di dispositivi ricavabili da una singola fetta è proporzionale al suo diametro, col tempo si è cercato di realizzare fusi con diametro sempre maggiore. Attualmente si realizzano fusi con un diametro di circa 30 centimetri. Un cristallo di Si prodotto con il metodo Czochralski si indica con CZ

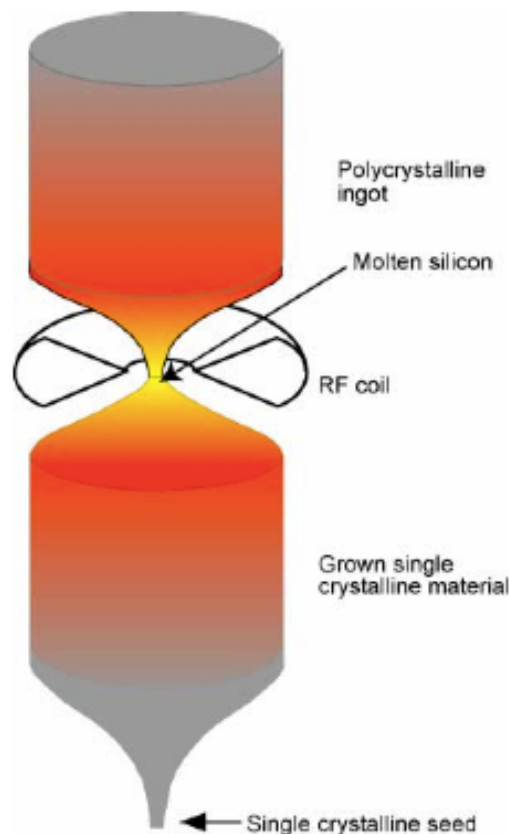
# Metodo Czochralski



- Controllo della temperatura del silicio fuso
- Controllo della velocità di estrazione della bacchetta contenente il seme di silicio puro

# Tecniche di realizzazione della cella fotovoltaica

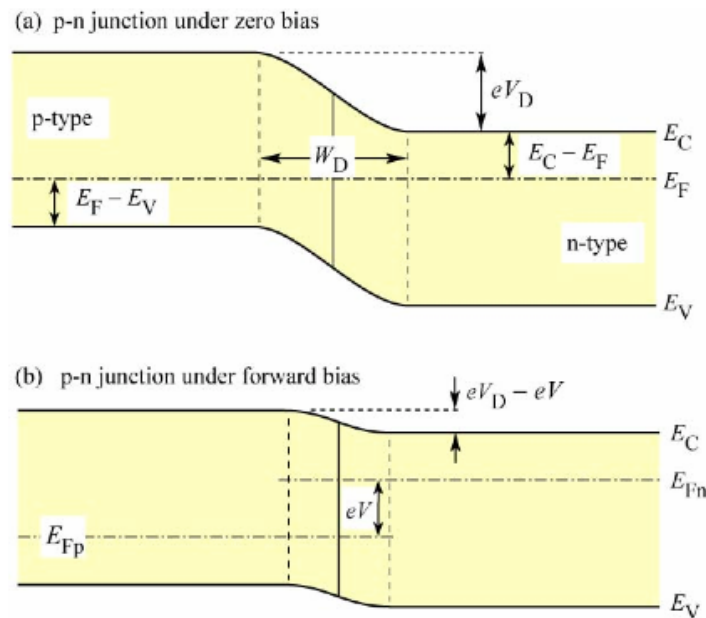
- Metodo floating zone



Nel metodo di float zone (FZ) un cristallo con struttura e composizione spuria si muove attraverso una zona ove il materiale è liquido partendo da un seme cristallino che, come nel metodo Czochralski, ne orienta gli atomi nella zona fusa. Questo metodo è stato usato inizialmente per purificare i CZ sfruttando gli effetti di segregazione delle impurezze e di riassetamento della struttura nella zona fusa in forma di mono cristallo. Questo metodo permette di ottenere monocristalli di alta purezza e cristallinità. Nel metodo FZ la fusione viene effettuata in vuoto o in gas inerte ed è ad impurezze zero perché la zona di fusione non è a contatto diretto con il crogiolo come nel processo CZ. I problemi del metodo FZ sono quelli correlati al collasso della zona fusa che rimane compatta e solidale al solido grazie unicamente alle forze di tensione superficiale del fuso. I diametro massimo per pani ottenuti con il metodo FZ sono di 20 mm. Con metodi molto sofisticati si possono però raggiungere diametri 150 mm.

# Diagramma a bande e verifica del salto energetico

- Livelli energetici
- Salto in banda di conduzione
- Costante di planck

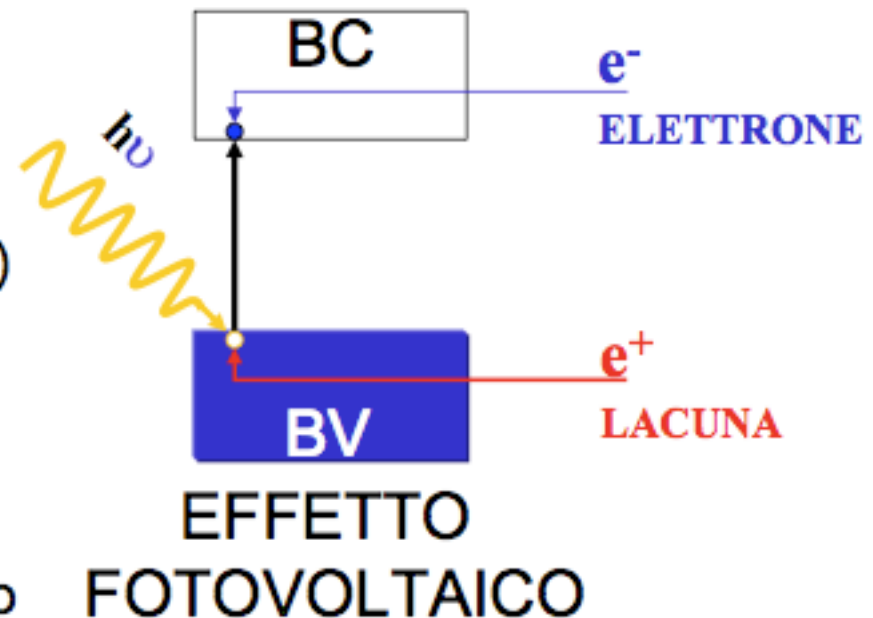


Impurità del III gruppo come il Boro  
Impurità del V gruppo come il fosforo  
Il silicio è un elemento del IV gruppo della tabella degli elementi ed ha una struttura tetraedrica



# Effetto fotovoltaico

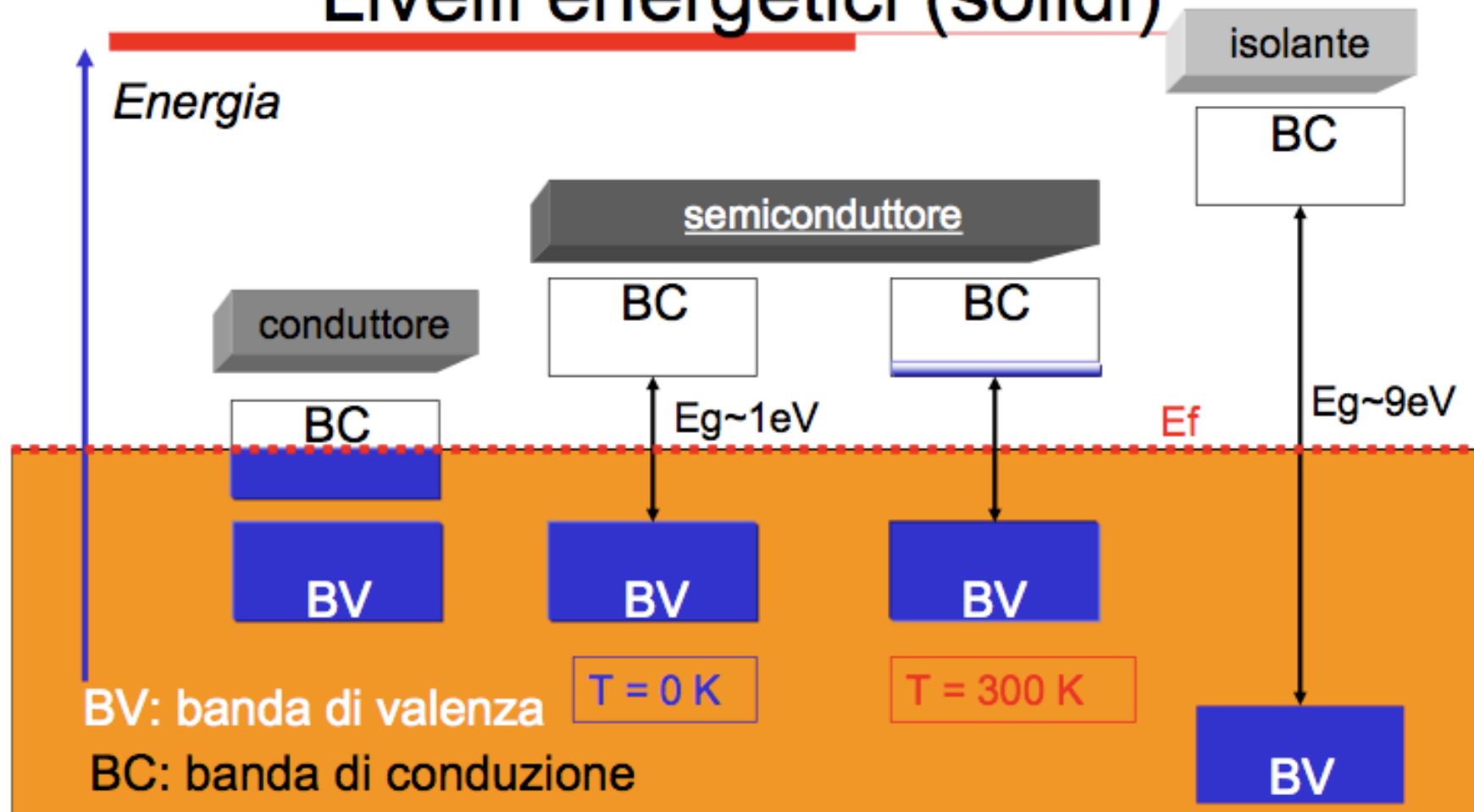
- Osservato per la prima volta da A. Edmond Becquerel (1839)
- Teoria effetto fotoelettrico: 1905 A. Einstein
- Prima cella FV: 1954 Laboratori Bell (Stati Uniti)
- Effetto fotovoltaico: **elettrone** nella **banda di valenza** di un materiale (generalmente semiconduttore) passa alla **banda di conduzione** a seguito dell'assorbimento di un **fotone**



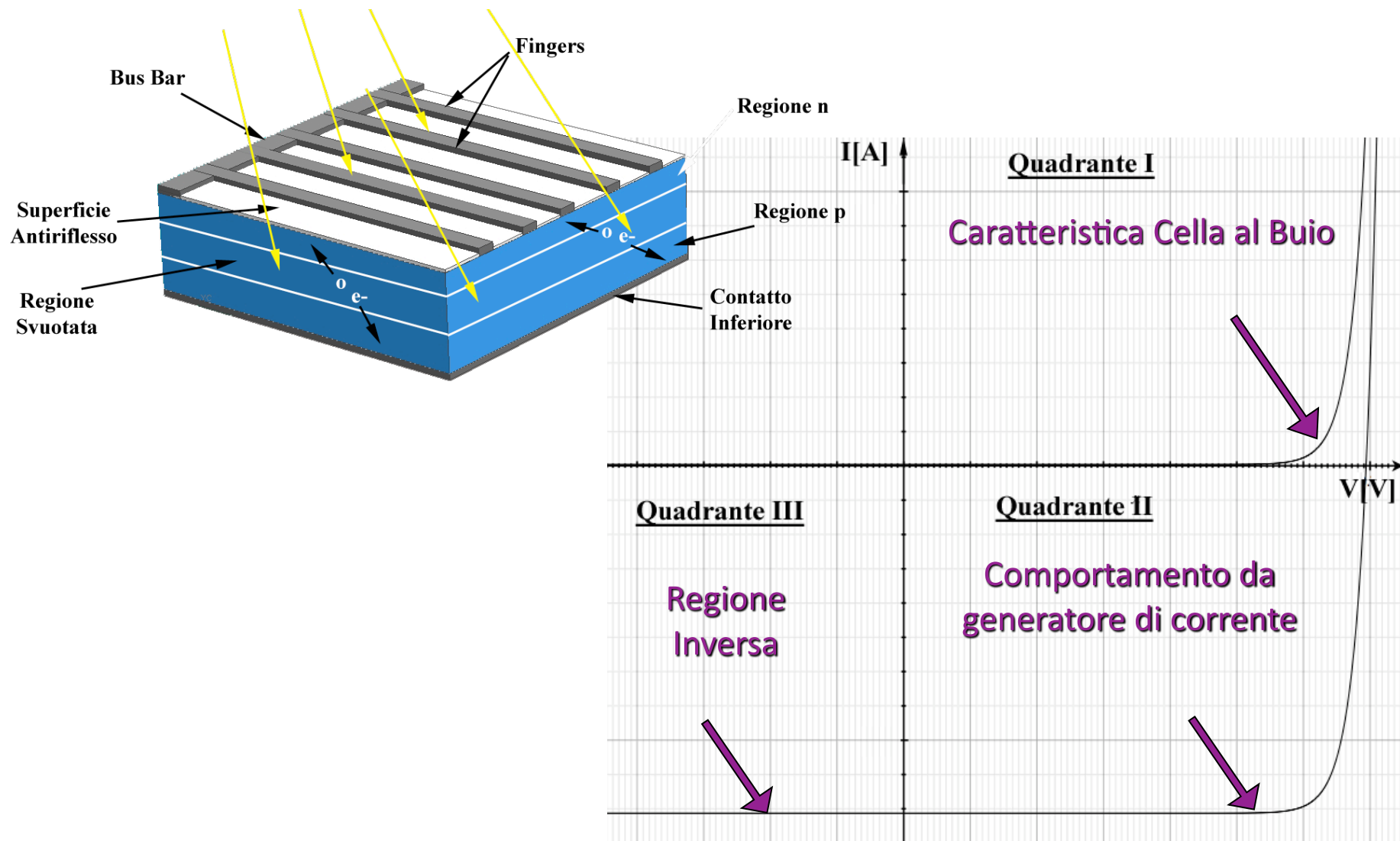
# Livelli energetici del silicio

Costante di Plack:  $h=4.135 \times 10^{-15} \text{ eV}$

## Livelli energetici (solidi)



# Le celle fotovoltaiche



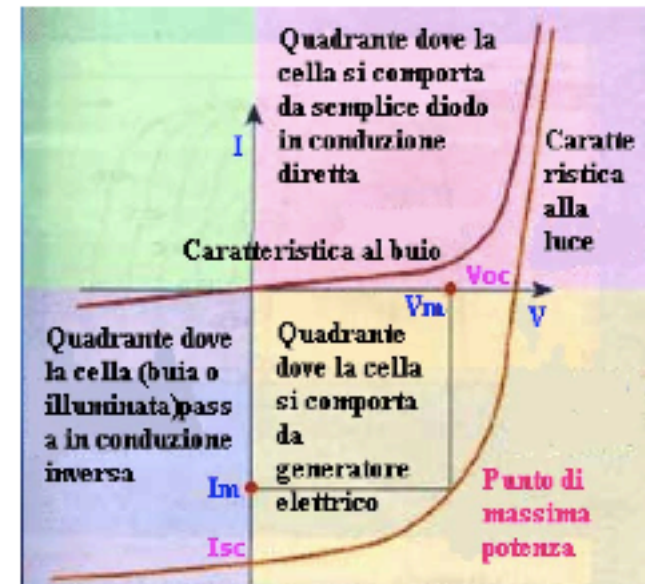
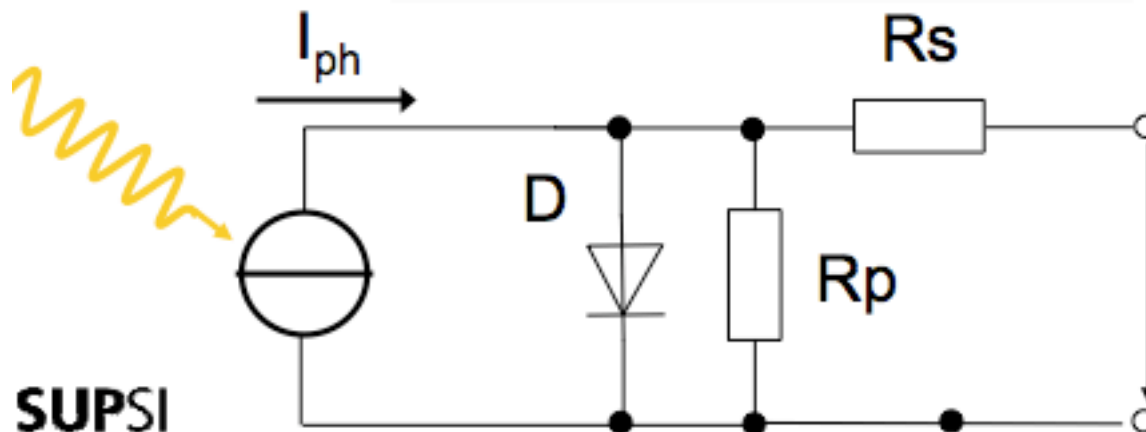
# Modello equivalente della cella fotovoltaica

Modello semplificato:

$$I(V) = I_{sc} - I_{dark}(V)$$

caso diodo ideale:

$$I(V) = I_{sc} - I_0(e^{qV/KT} - 1)$$



source: [www.antonio.licciulli.unile.it/tesine2003](http://www.antonio.licciulli.unile.it/tesine2003)

$I_{ph}$ : corrente fotogenerata

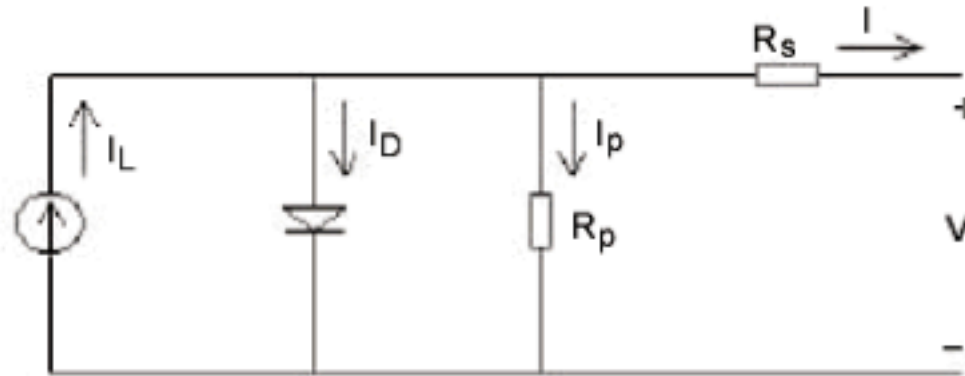
$V$   $R_s$ : resistenza di serie

$R_p$ : resistenza parallela

# Modello equivalente della cella con resistenze di perdita

$$K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{C}$$

$$K = 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV}$$



$$I = I_L - I_D - I_p = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + IR_s)}{NmKT_{cel}} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

$I$  corrente in uscita

$I_L$  fotocorrente

$I_D$  corrente del diodo

$I_p$  corrente di perdita

$I_0$  corrente inversa di saturazione

$N$  numero di celle in serie (30-36 ad unità)

$m$  fattore di idealità del diodo (tra 1 e 2)

$K$  costante di Boltzman

$T_{cel}$  temperatura della cella  
e carica dell'elettrone

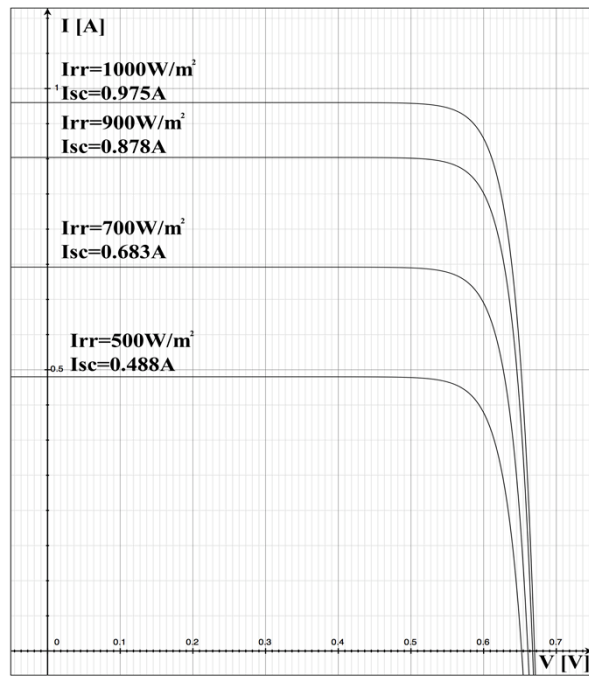
$V$  tensione della cella

$R_s$  resistenza in serie

$R_p$  resistenza di scambio

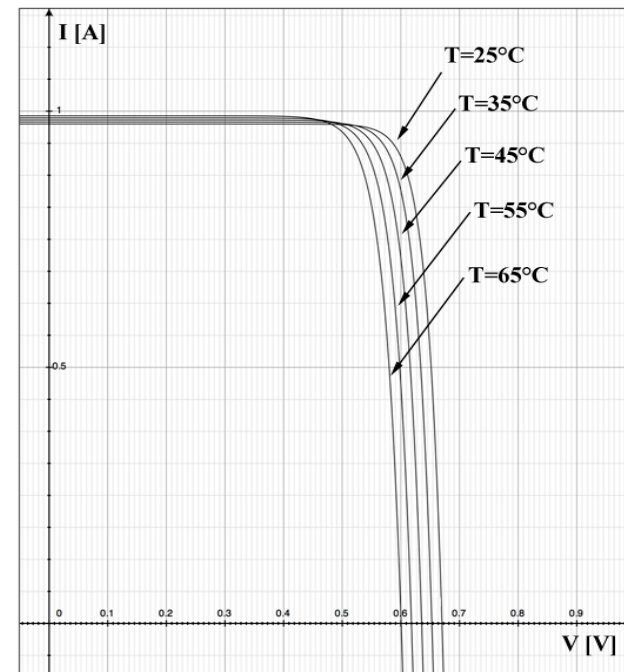
# Le celle fotovoltaiche

## Variazione dell'Irraggiamento



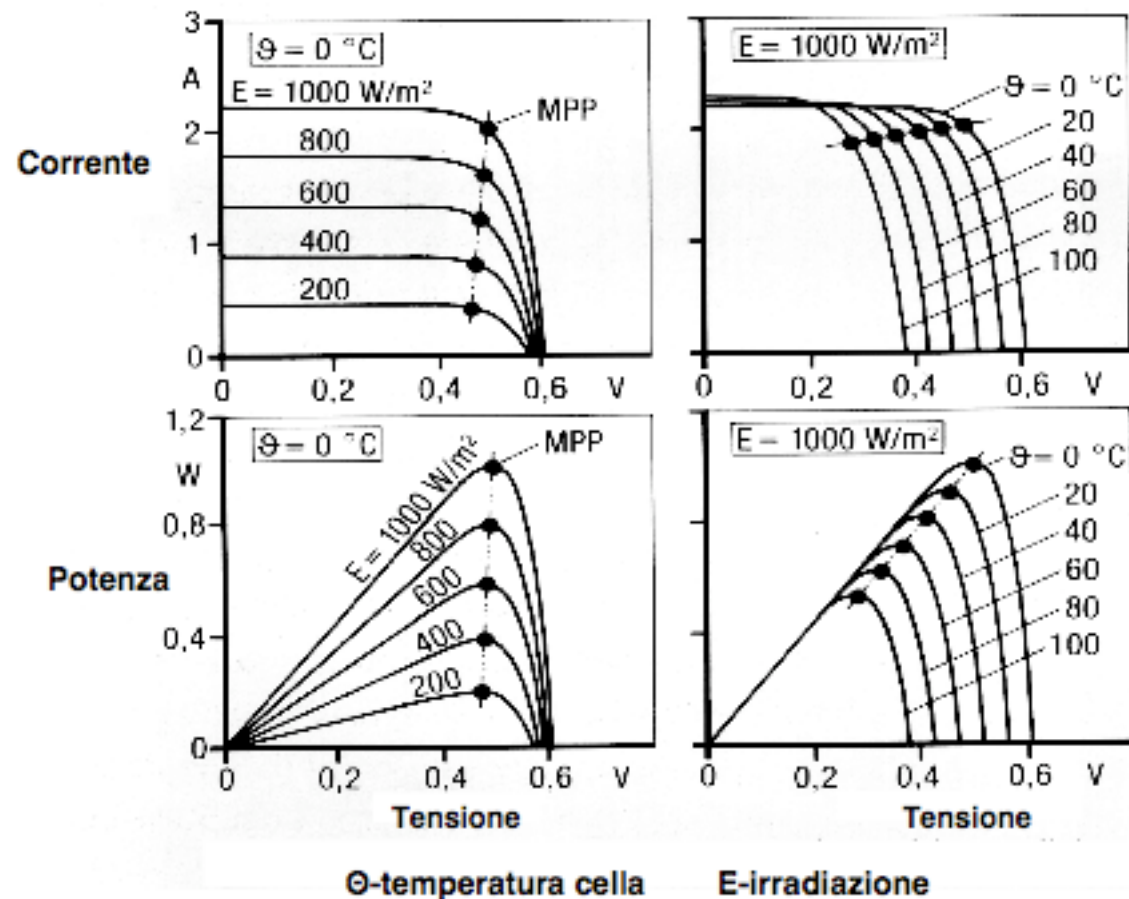
Relazione di proporzionalità diretta tra la variazione dell'irraggiamento e la corrente fotogenerata

## Variazione della Temperatura



Variazione della tensione in funzione della temperatura  
 $-0.4\%/^\circ\text{C}$

# Punto di massima potenza



# Le celle fotovoltaiche

- Fill Factor

E' il fattore di riempimento. Consiste matematicamente nel rapporto tra il prodotto Tensione e corrente nel punto di massima potenza e tensione e corrente di corto circuito

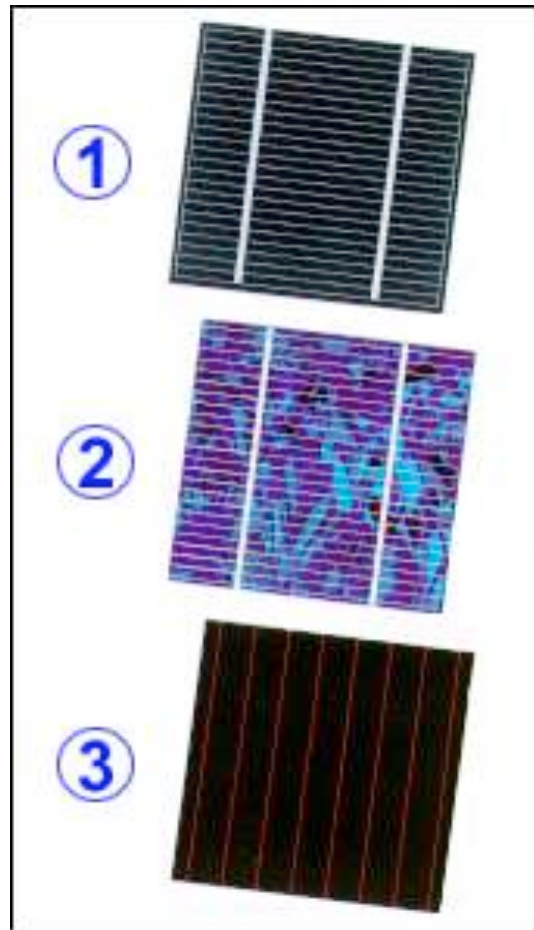
$$FF = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{SC} \cdot I_{SC}}$$

E' un parametro che tiene conto della qualità realizzativa della cella fotovoltaica, e di come le resistenze serie(dovute ai contatti) influenzano la caratteristica I-V della cella



# Le celle fotovoltaiche

## TIPOLOGIA



1-Monocristallina

(grigio scuro uniforme)

2-Policristallina

(blu scura variegata)

3-Amorfa

(marrone scura uniforme)

# Le celle fotovoltaiche

<b>Tecnologia FV di riferimento</b>	<b>Superficie m<sup>2</sup>/kWp</b>
Silicio cristallino	6 ÷ 10
Silicio amorfo	15 ÷ 20
CIS (Rame – Indio – diselenio)	11 ÷ 13
Altre tecnologie thin-film	12 ÷ 16

L'efficienza di conversione delle celle raggiunge un valore limite per la tecnologia pari al 25% (dovuto alla regione di svuotamento)

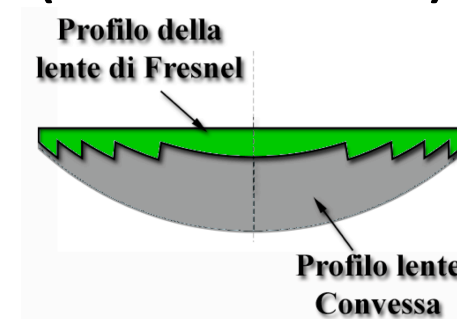
# Le celle fotovoltaiche

- Celle a film sottile (silicio amorfo – tellurio di cadmio)
- Celle organiche
- Celle in tripla giunzione (40%) (InGaP – GaAs - Ge)
- Celle a concentrazione

$$I = J_{sc} \cdot A \cdot FF \cdot CF$$

# Sistemi a concentrazione

- Concentratori a torre (con specchi concentratori)
- Concentratori a profilo parabolico (riflessione)
- Concentratori a lenti di fresnel (diffrazione)



- Differenti tipologie di celle
- Calcolo della corrente in funzione del fattore di concentrazione

# Le celle fotovoltaiche

- Potenza di picco (W)
- Tensione MPP ( $V_{MPP}$ )
- Tensione a vuoto ( $V_{OC}$ )
- Corrente MPP ( $I_{MPP}$ )
- Corrente di corto circuito ( $I_{SC}$ )
- Tensione massima di sistema ( $V_{MAX}$ )
- Coefficiente di variazione della tensione a vuoto (  $\%/^{\circ}C$ ,  $mV/^{\circ}C$  )
- Coefficiente di variazione della corrente di corto circuito (  $\%/^{\circ}C$  ,  $mA/^{\circ}C$  )
- Tolleranza ( tensioni e correnti )
- Certificazione (IEC 61215)
- Classe di protezione (Classe II)

# Standard Test Condition

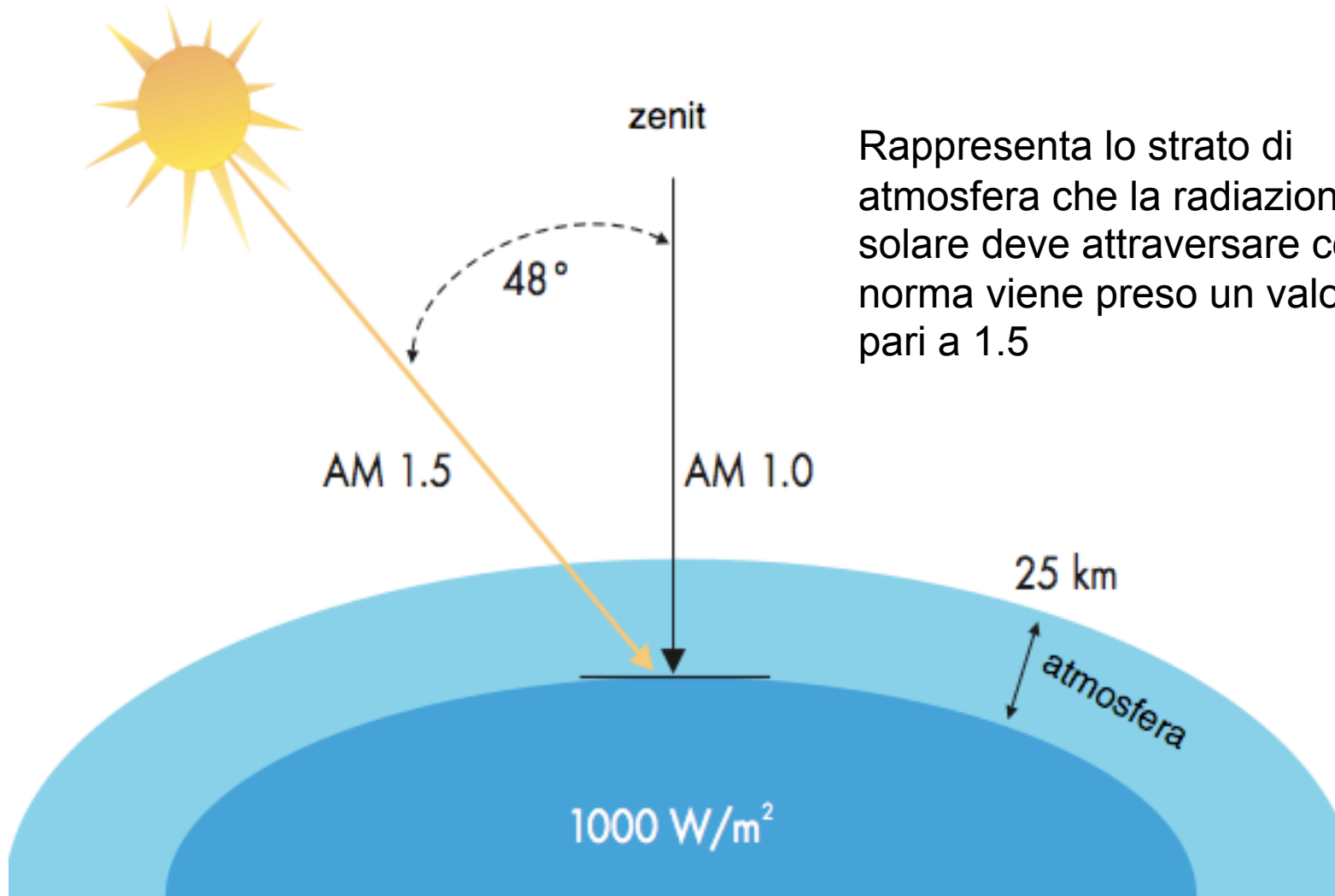
Per poter valutare correttamente le caratteristiche tecniche di un modulo fotovoltaico e poter effettuare un confronto fra questi, è necessario creare una situazione standard alla quale vengono effettuate tutte le misure elettriche e meccaniche che lo caratterizzeranno.

- Potenza di irraggiamento :  $1.000\text{W/m}^2$
- Spettro elettromagnetico: AM : 1,5
- Temperatura della cella solare:  $25^{\circ}\text{C}$ .

NOCT ( $800\text{ W/m}^2$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ , AM 1,5 , WS:  $1\text{m/s}$ )

Misura della temperatura nominale di lavoro di cella – Conoscere tale valore permette di ottenere una caratteristica sul reale funzionamento della cella

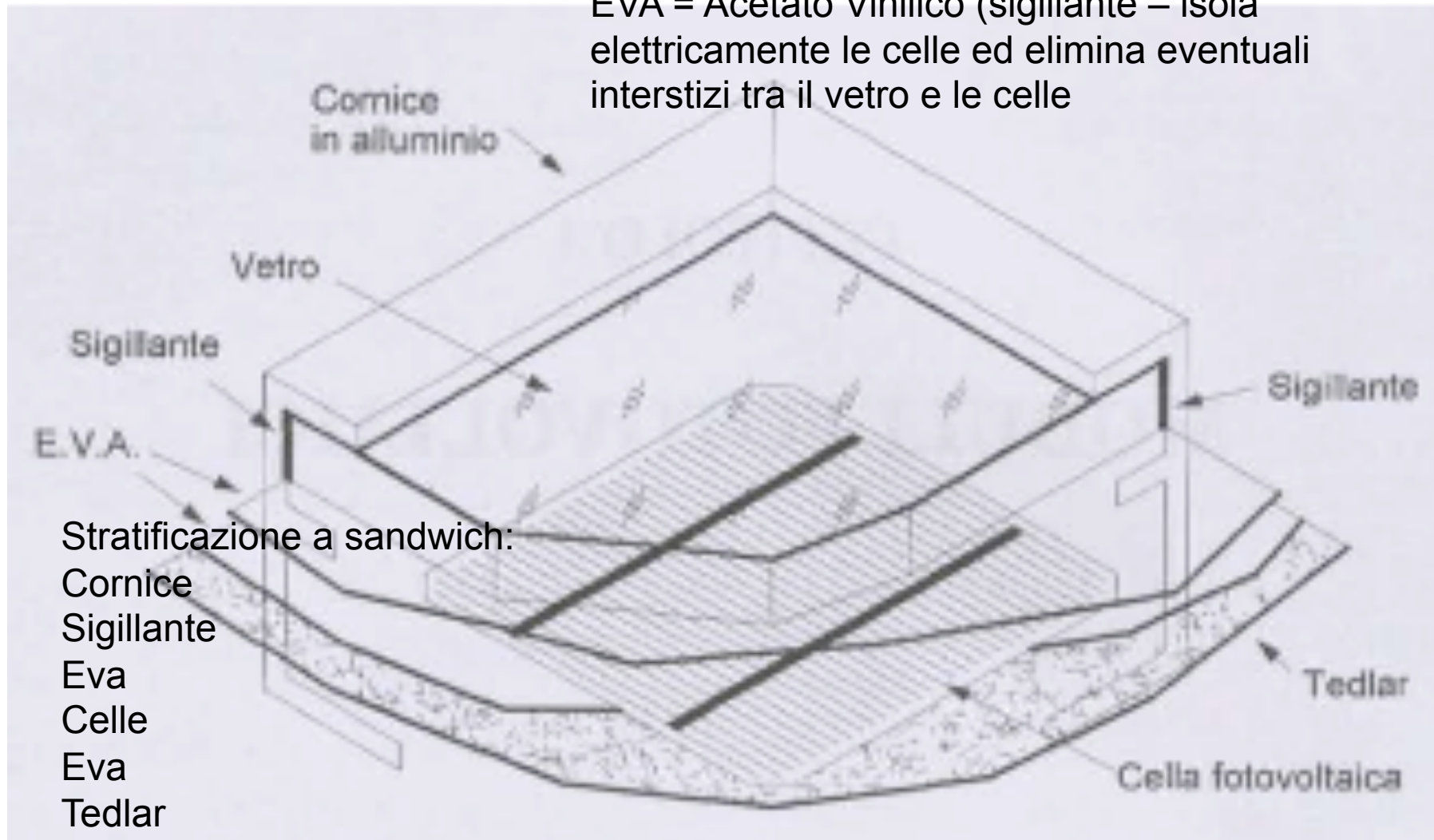
# Air Mass



Rappresenta lo strato di atmosfera che la radiazione solare deve attraversare come norma viene preso un valore pari a 1.5

# Dalla cella fotovoltaica al modulo fotovoltaico

EVA = Acetato Vinilico (sigillante – isola elettricamente le celle ed elimina eventuali interstizi tra il vetro e le celle)





# Connessioni elettriche nei moduli fotovoltaiche

- I moduli fotovoltaici sono contraddistinti da un numero di celle FV che risulta essere un multiplo di 18 celle:
- 18-36-54-72 celle connesse tra loro in serie con un numero di tre diodi di bypass

# La scatola di giunzione

