

Laboratorio Celle Solari : dispositivi di nuova generazione

Mara Bruzzi

Dipartimento di Fisica ed Astronomia
Università di Firenze

Tecnologie costruttive delle celle solari

To date, solar cells can be classified into 4 large families:

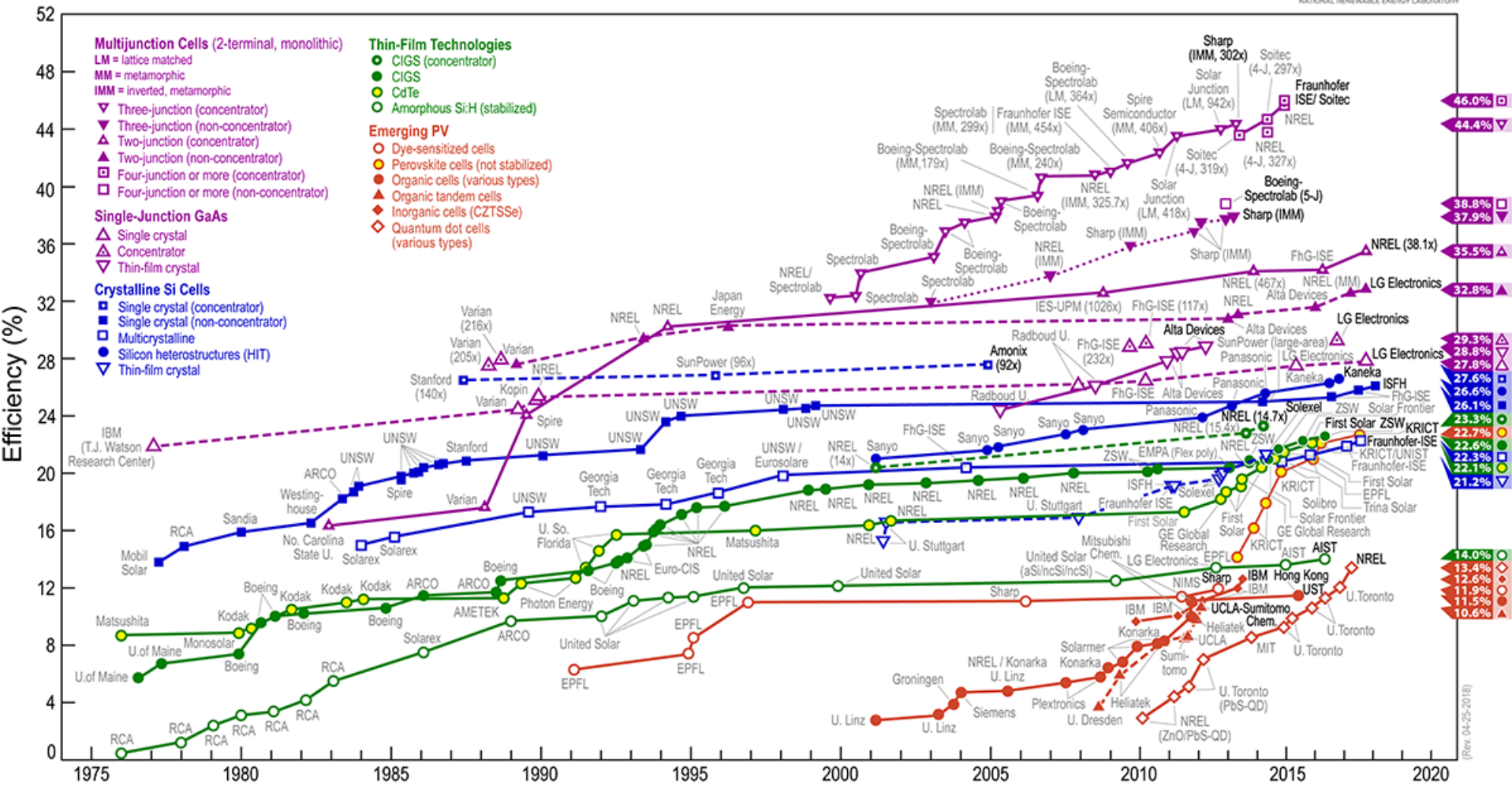
- Si single-junction cells (polycrystalline or crystalline)
- Thin-film cells (GaAs, CIGS, Si amorfo, CdTe ..) efficiency comparable with reduced costs

Multi-junction cells (eg: 3 ex .: InGaP / InGaAs / Ge) higher efficiency at high costs (more junctions with different gap semiconductors grown in epitaxial layers, exploit a wider region of the solar spectrum)

Cells of nanocomposite / organic materials (Graetzel cells ..)

lower efficiency, at very low costs

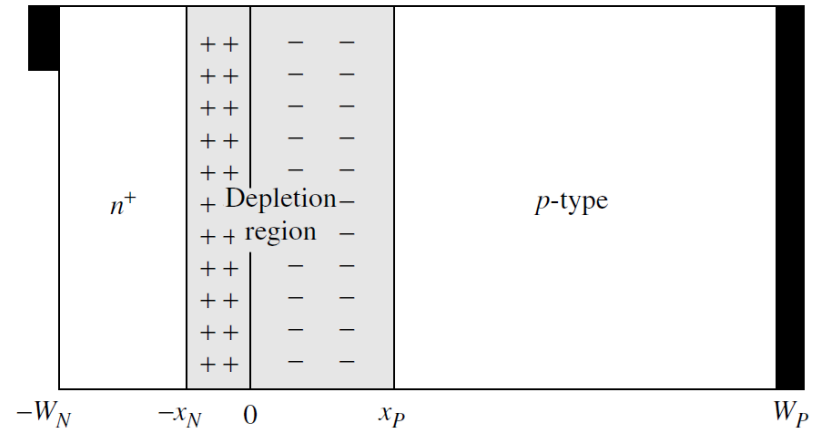
Best Research-Cell Efficiencies



This plot is courtesy of the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.

The first photovoltaic Cell : the Si pn junction

Front contact can be treated as an ideal ohmic contact. However, since it is usually a metal grid contacting the semiconductor on only a small percentage of the front surface plus an antireflective passivation layer (SiO_2 in silicon solar cells), modeling the front surface with an effective surface recombination velocity is more realistic.



Back contact could also be treated as an ideal ohmic contact. However, solar cells are often fabricated with a *back-surface field* (BSF), a thin more heavily doped region at the back of the base region. The BSF keeps minority carriers away from the back ohmic contact and increases their chances of being collected. It can be modeled by an effective, and relatively low, surface recombination velocity.

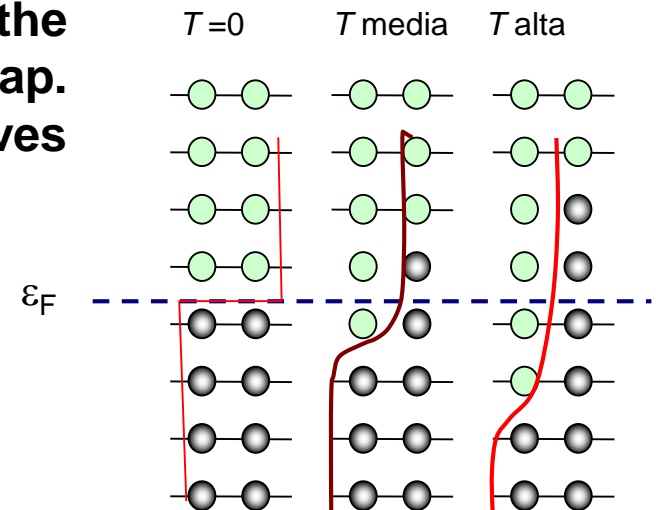
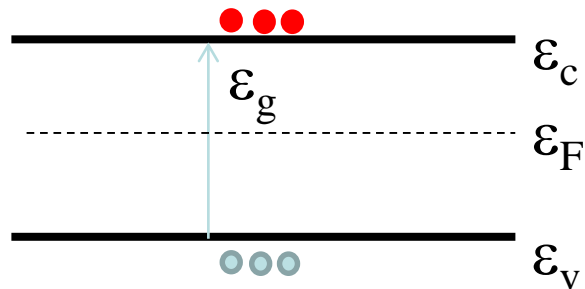
The first generation photovoltaic cell: operating principle

Che cos'è un materiale semiconduttore ?

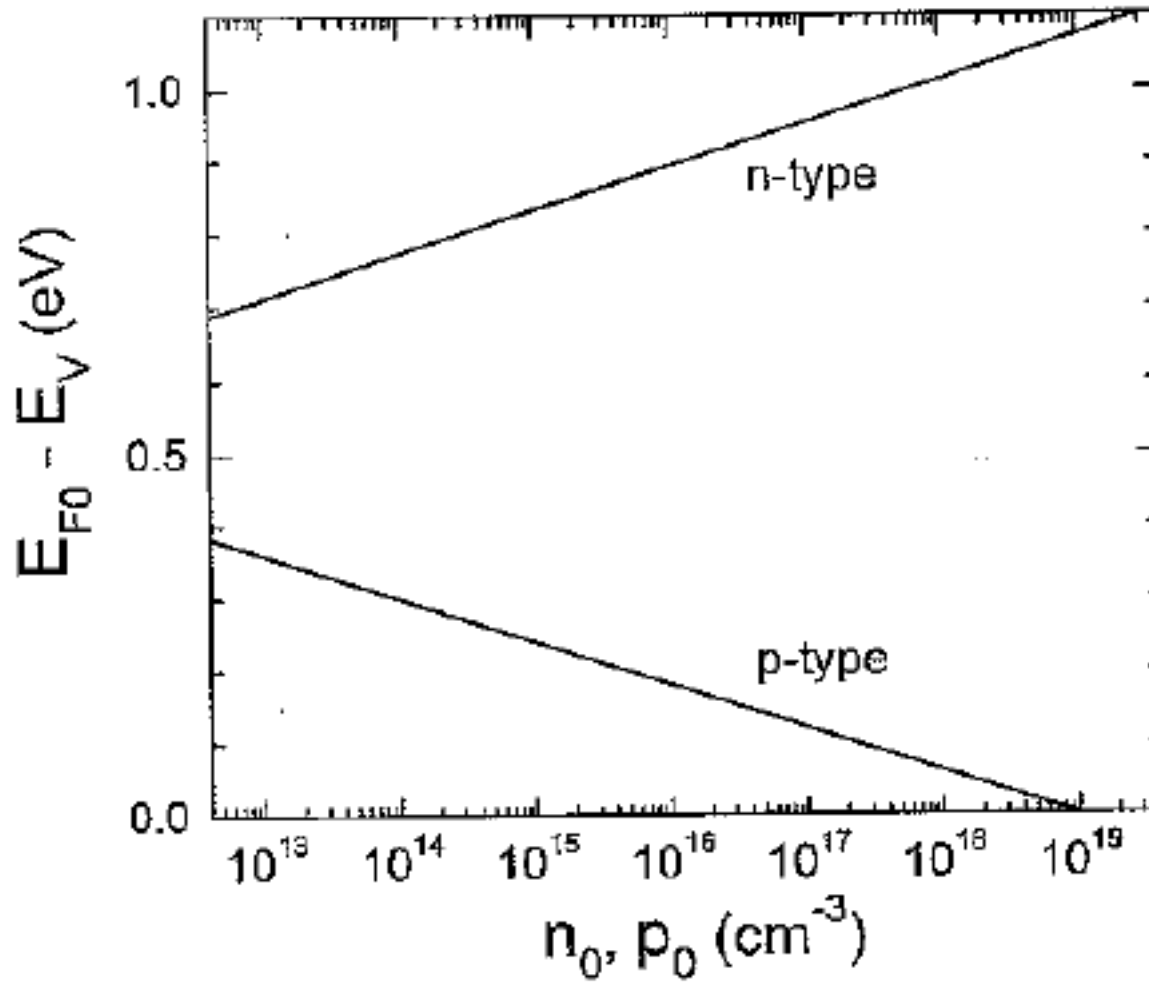
Gap = E_g forbidden energy band located between the valence band and the conduction band.

$T = 0$: all states in the valence band are occupied while those in the conduction band are empty. All states with energy below the Fermi level E_F are full while those with higher energy are empty.

$T > 0$ some valence electrons are promoted in the conduction band overcoming the forbidden gap. The electron which has become conduction leaves a hole in the valence band.



Fermi level in Si extrinsic regime



IMREFS

In non-equilibrium (e.g. illumination , external voltage applied,..) we have $n \cdot p \neq n_i^2$ and the fermi level is not defined. We consider the QUASI FERMIL LEVELS (IMREF) defined so that as:

$$np = n_i^2 e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{KT}}$$

When illuminating the sample, we generate Δn , Δp electrons and holes, IMREFS are defined as:

$$E_{Fn} = E_C - k_B \cdot T \cdot \ln \left(\frac{N_C}{n_0 + \Delta n} \right)$$

$$E_{Fp} = E_V + k_B \cdot T \cdot \ln \left(\frac{N_V}{p_0 + \Delta p} \right)$$

with n_0, p_0 equilibrium concentration of electrons and holes.

$$E_{Fn} - E_{Fp} = k_B \cdot T \cdot \ln \left(\frac{(n_0 + \Delta n) \cdot (p_0 + \Delta p)}{n_i^2} \right)$$

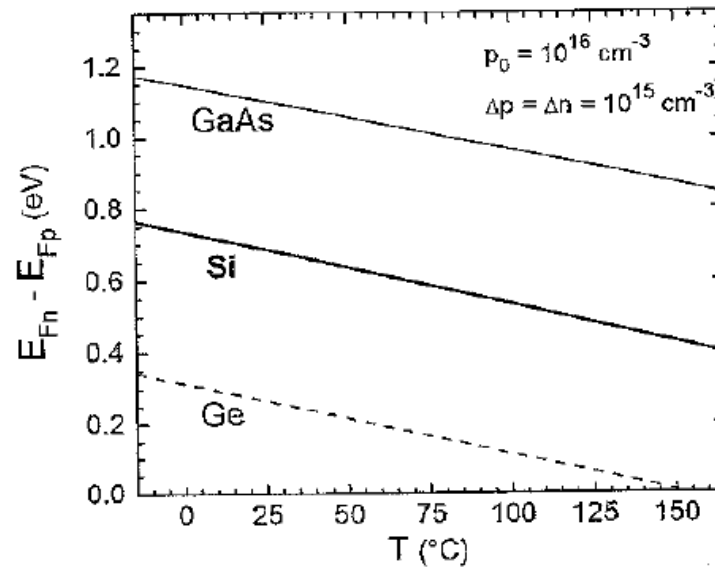
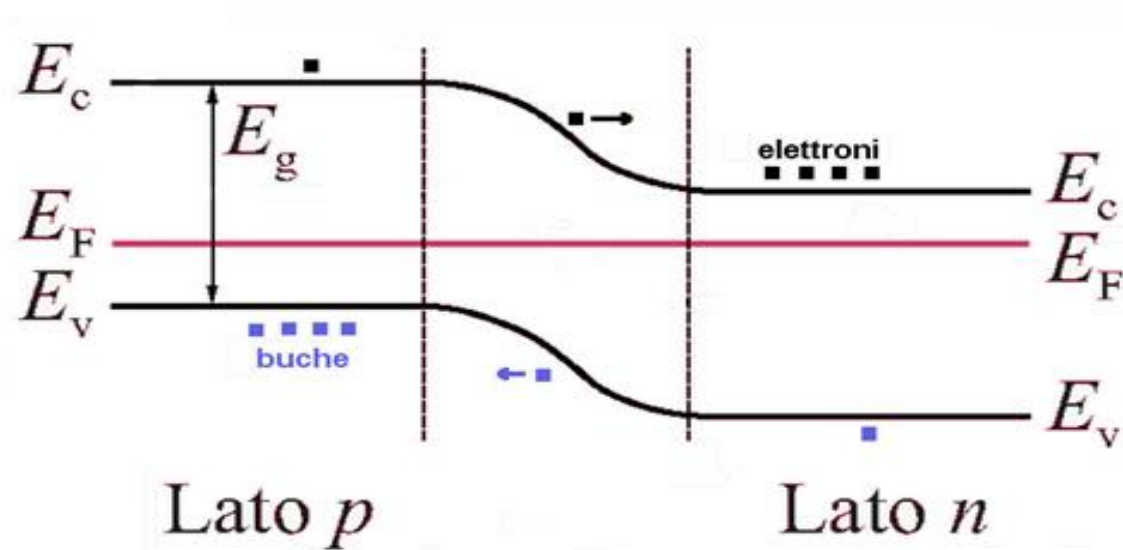


Figure 2.24. Fermi-level splitting for $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and $\Delta n = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ in photovoltaic absorbers with $E_g = 0.78, 1.1$ and 1.42 eV corresponding to the E_g of Ge, c-Si and GaAs, respectively. The temperature dependence of E_g is taken into account.

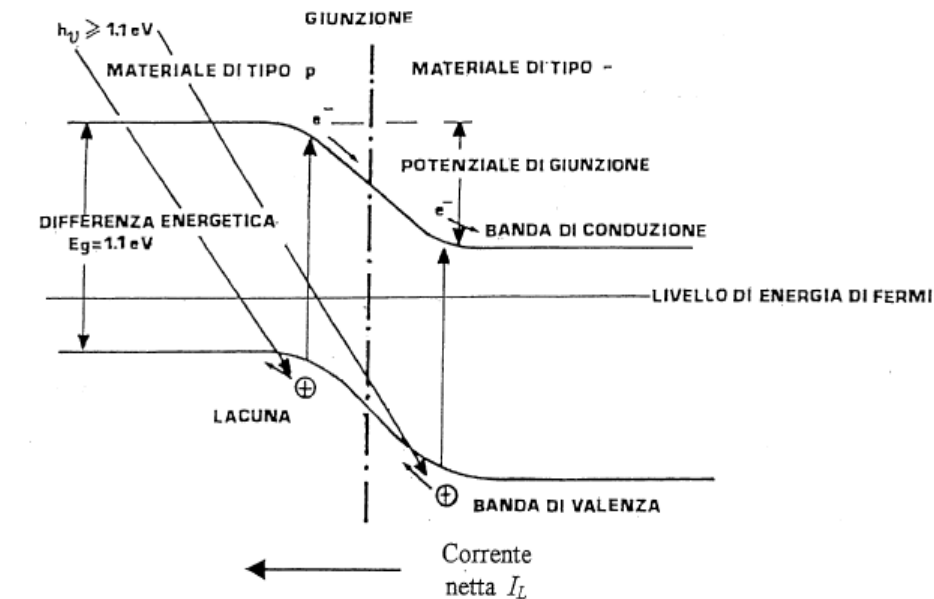
Pn-junction at equilibrium

In the interface region between two adjacent regions of the doped semiconductor, n and p, a depleted region is created at equilibrium due to the annihilation of electrons and holes, a built in potential barrier opposes to the diffusion of the majority carriers.



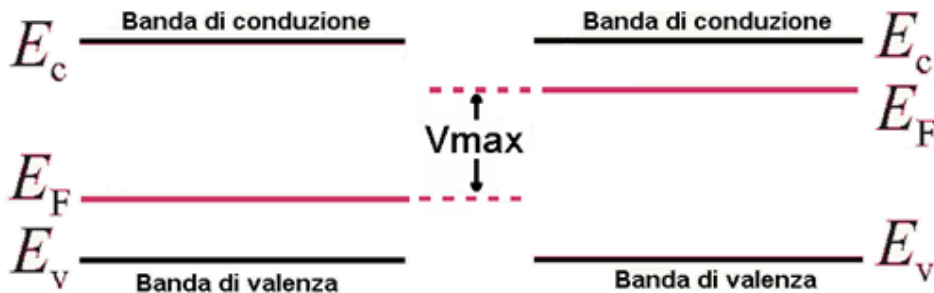
p-n junction under illumination

Electromagnetic radiation with energy higher than the gap can be absorbed by valence electrons to promote them in the conduction band. The electric field in the depleted region collects free carriers to the electrodes. Free carriers in the neutral regions within a diffusion length are also collected.

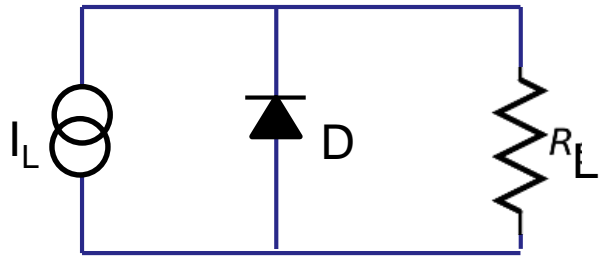


Short Circuit Current density : J_{sc}

Open circuit Voltage V_{oc} Its max value is the difference between the quasi fermi levels in the two regions of the junctions, so the superior limit is the energy gap of the material.



Equivalent circuit of the solar cell



- Ideal Current generator $I_L \approx I_{sc}$
- Ideal diode D
- Load R_L

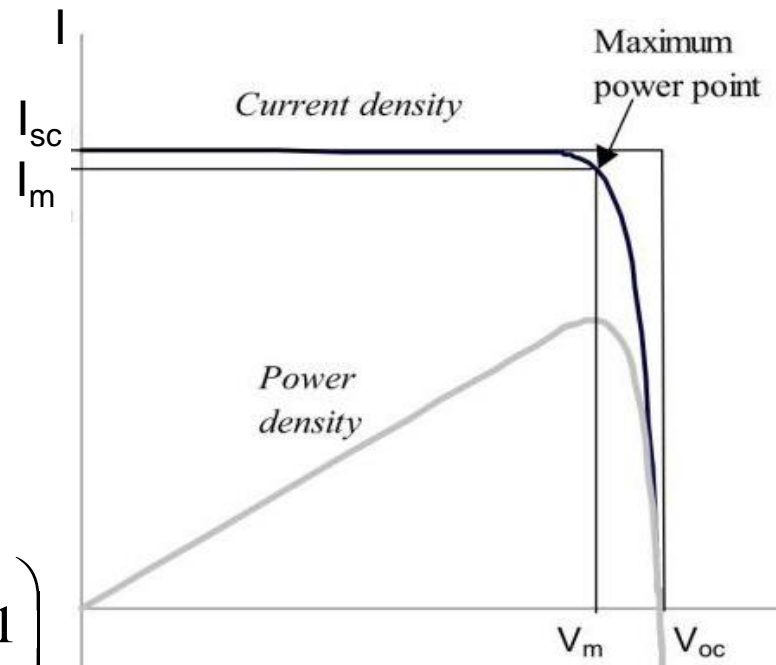
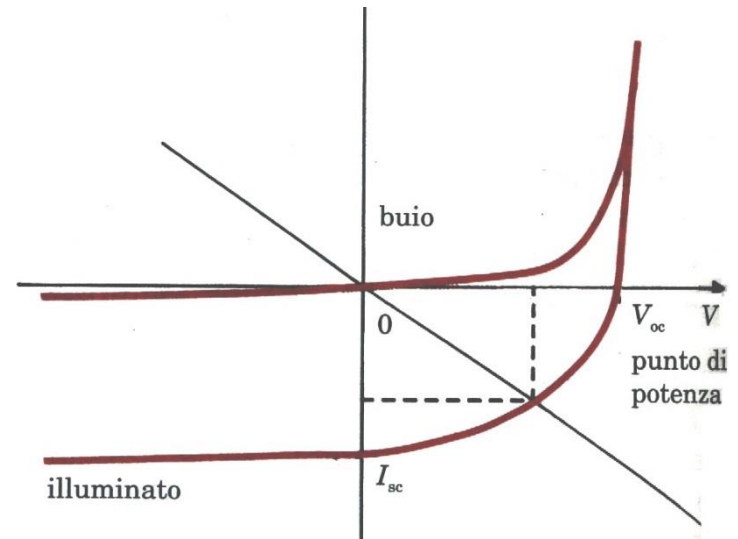
For a positive current :

$$-I = I_{buio} - I_L = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{k_b T}\right) - 1 \right] - I_{sc}$$

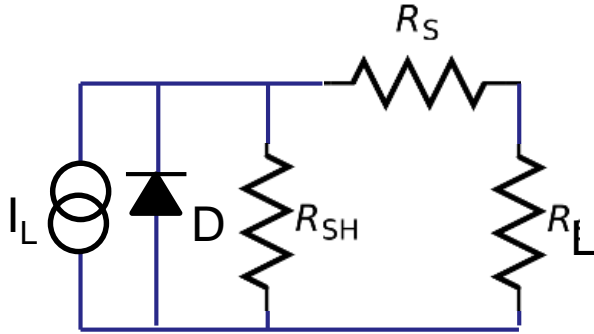
Power peak is at V_m, I_m

$$P_{peak} = I_m V_m$$

Evaluation of V_{oc} ($I = 0$)
$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right)$$



Equivalent Circuit of a real solar cell



R_{sh} e R_s parallele and series resistances

$$R_s \approx \left. \left(\frac{dI}{dV} \right)^{-1} \right|_{V_{oc}} \quad R_{sh} \approx \left. \left(\frac{dI}{dV} \right)^{-1} \right|_{V=0}$$

I-V characteristics of the real solar cell:

$$-I = -I_{sc} + I_0 \left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{nk_B T}} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}}$$

If the potential drop due to R_s is much less than V_m the power losses due to R_s and R_{sh} are:

$$P_{loss}(R_s) = I_m^2 R_s$$

$$P_{loss}(R_p) \approx \frac{V_m}{R_p^2}$$

Influence of the series and parallel resistances on the I-V characteristics

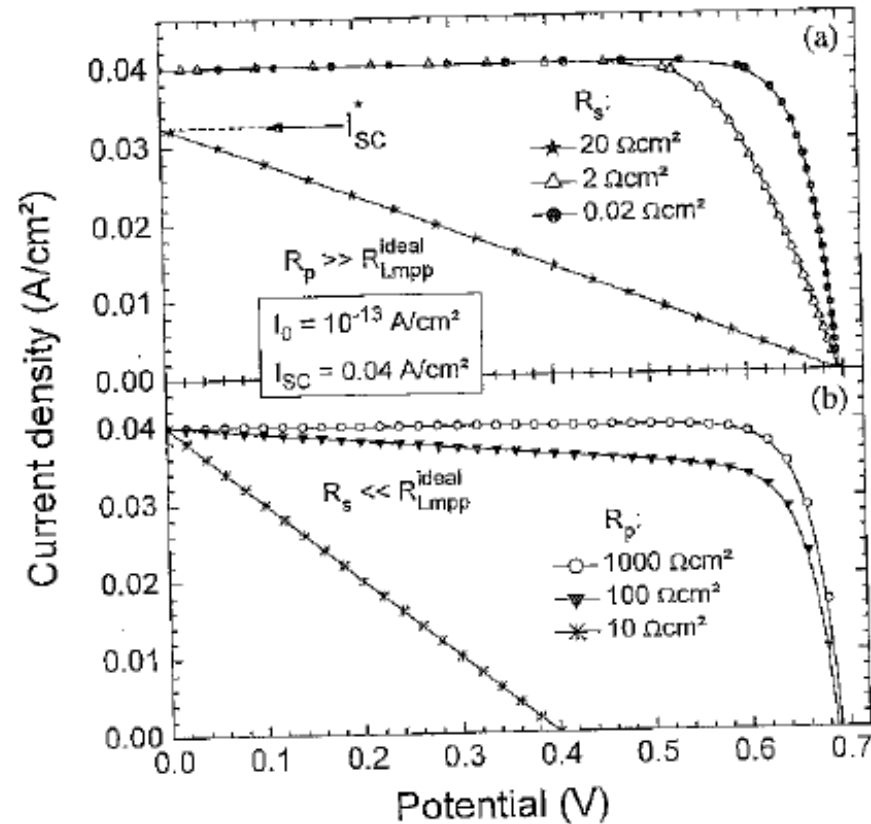


Figure 1.8. Current-voltage characteristics for a solar cell with negligible R_p (a) or R_s (b) for different values of R_s (a) and R_p (b) and $I_0 = 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ and $I_{SC} = 0.04 \text{ A/cm}^2$.

Other Important Definitions

Filling Factor of the solar Cell: $FF = \frac{V_m \cdot J_m}{V_{OC} \cdot J_{SC}}$,

efficiency η of the solar cell ratio between the surface density of power supplied to the operating point and the power of the incident radiation on the area unit:

$$\eta = \frac{(P_{gen} / S)_{max}}{P_{inc} / S} = \frac{V_m \cdot J_m}{P_{inc} / S} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot J_{SC}}{P_{inc} / S},$$

PARAMETERS TO CHARACTERIZE THE CELL :

$$J_{SC}, V_{OC}, FF \text{ e } \eta$$

In general , we measure all the solar cells in the same reference conditions (ASTM) : AM1.5G/D , 1000 W/m² irradiance and T = 25 °C.

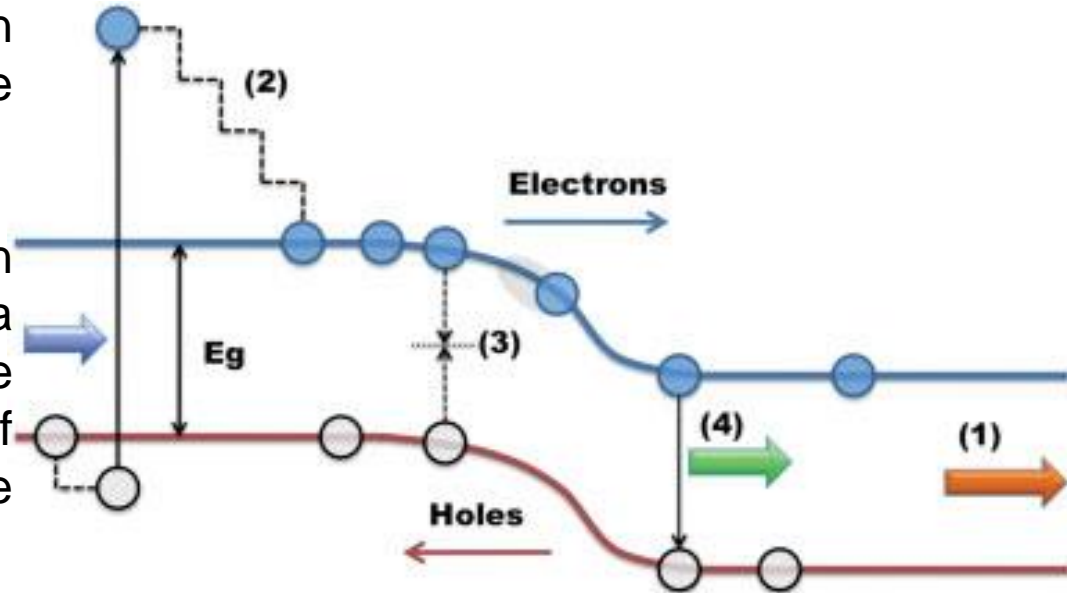
Loss of Efficiency Mechanisms

(1) Photons with $E < E_g$ are not absorbed.

(2) Photons with energy $E \gg E_g$ are absorbed and produce electrons / holes that relax with the crystal lattice: excess energy dissipated in heat.

(3) Electrons and holes can recombine non-radiatively before being collected at the electrodes;

4) Electrons and holes can recombine radiatively, producing a photon of energy equal to e_g . The photons emitted from the front of the cell back to the light source are lost



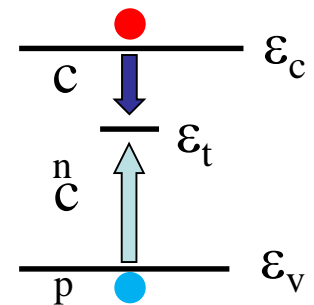
Osservazione sulle perdite per ricombinazione

Una volta che la coppia elettrone-lacuna è stata generata dall'assorbimento di un fotone, elettrone e lacuna sono liberi di muoversi in maniera indipendente all'interno del reticolo cristallino. Esse diffondono nel materiale neutro fino a raggiungere la regione dove è presente campo elettrico, vengono quindi raccolte agli elettrodi. La diffusione è limitata dalla ricombinazione, promossa dai difetti nel materiale, che agiscono come centri di ricombinazione.

$$W_D = W_0 + L = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon \cdot V_{bi}}{q \cdot N_{eff}}\right)} + \sqrt{D \cdot \tau}$$

Lunghezza di diffusione per i portatori minoritari

$$D = \mu K \cdot T/e$$

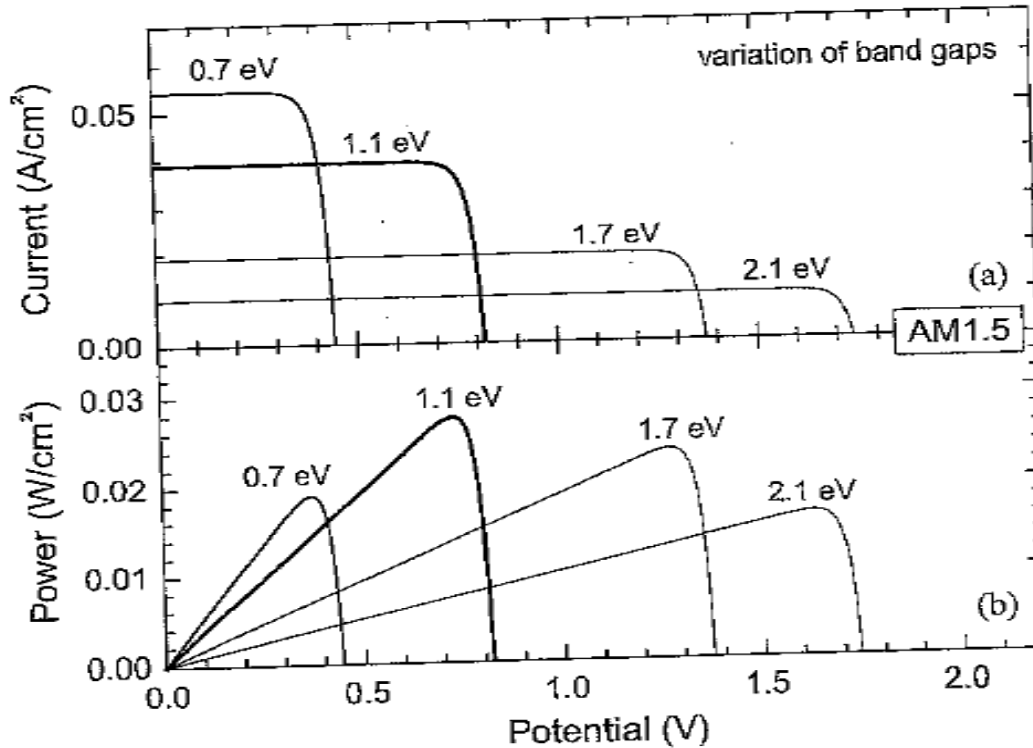


τ = tempo di vita media del portatore minoritario

E' quindi **importante avere lunghezze di diffusione elevate** (reticolo cristallino il piu' possibile privo di difetti) per limitare le perdite per ricombinazione .

Rendimento della cella p-n funzione del gap di banda

Sia gap molto piccoli che molto grandi implicano un basso rendimento: nel primo caso perché il valore della tensione è troppo basso (V_m , come V_{OC} , è sempre minore di E_g/q) e nel secondo caso perché la fotocorrente è piccola.

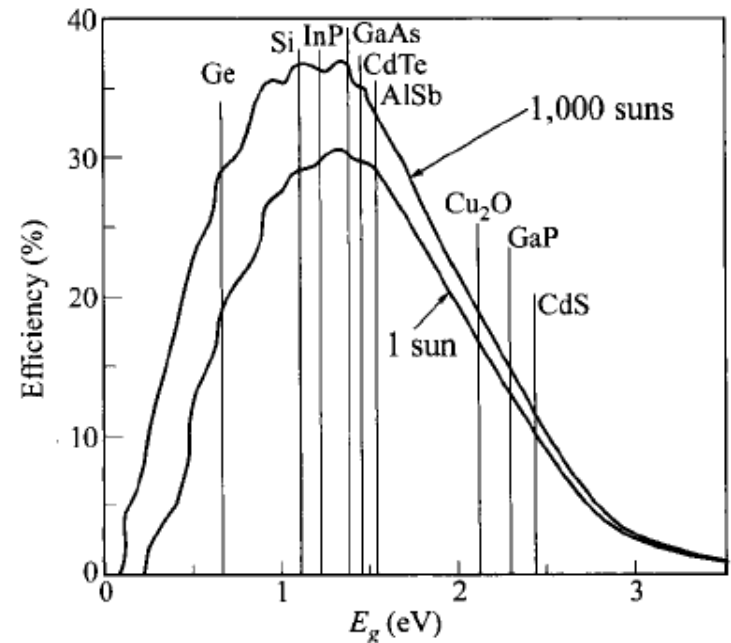


Efficienza al variare
dei materiali e del loro
gap

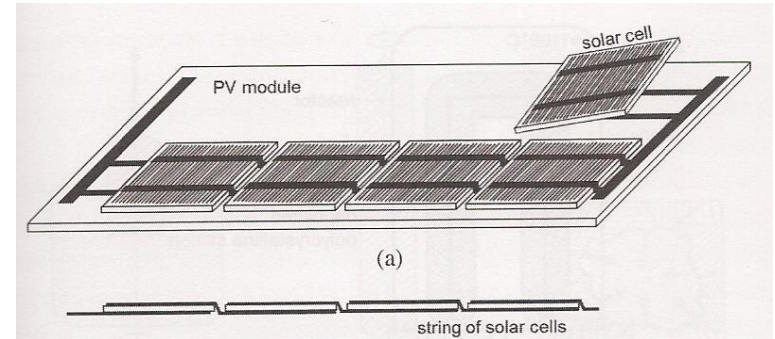
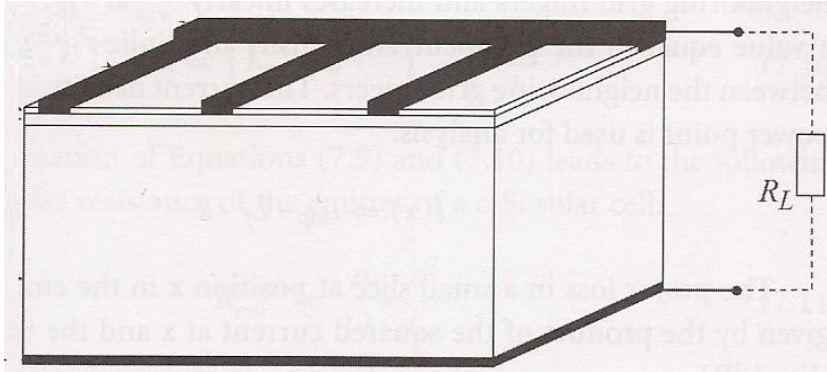
Rendimento massimo delle cella solari a giunzione singola

Nel caso dello spettro solare standard, il rendimento massimo $\eta \sim 30\%$ si ottiene per $E_g \approx 1.4$ eV, valore prossimo a quello dell'arseniuro di gallio a temperatura ambiente.

(Shockley-Queisser 1961)



Celle solari a silicio



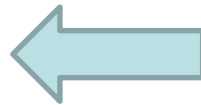
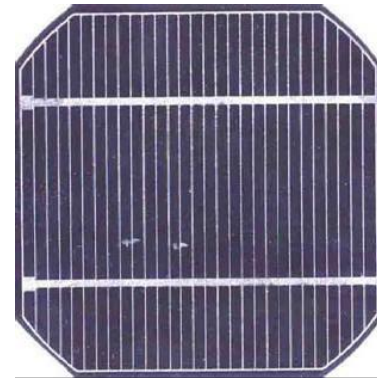
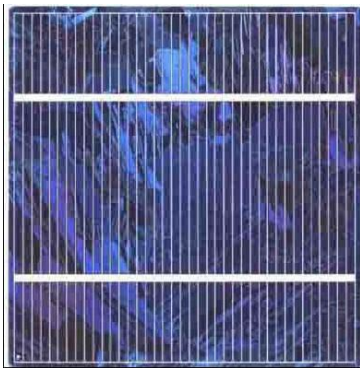
Il contatto metallico frontale, minimizzato per permettere alla luce di penetrare verso la base, consiste in una griglia metallica (*fingers*) sottile per raccogliere gli elettroni dall'emettitore che viene poi connessa al carico esterno. Tale configurazione presenta un'elevata riflessione, ridotta applicando uno strato di rivestimento antiriflettente.

Singoli moduli sono connessi in serie tramite un *bus* frontale e uno posteriore contenenti argento saldate su contatti in alluminio, generando una *stringa*. In un modulo fotovoltaico più stringhe sono quindi connesse in parallelo.

Limiti della tecnologia a silicio

1. Il limite maggiore della tecnologia al silicio è il **costo del materiale, che ammonta a più del 60% del costo finale delle celle solari**, dovuto al processo di purificazione e quello della produzione del cristallo.

Cella a Si monocristallino

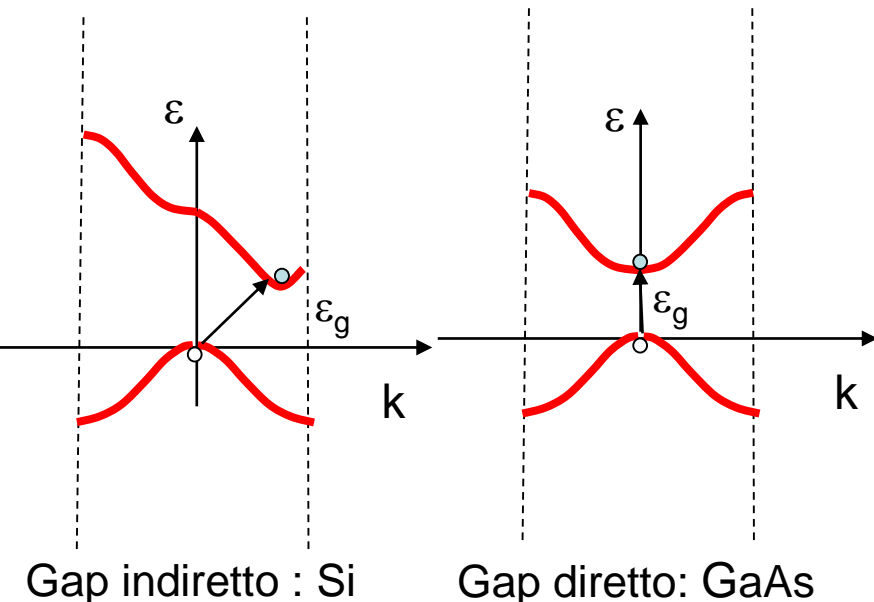


Per ridurre i costi si può utilizzare silicio policristallino, costituito da un insieme di monocristalli con diversa orientazione: l'interfaccia fra i grani disturba l'ordine, ovvero introduce stati trappola che aumentano la ricombinazione dei portatori e riducono l'efficienza.

2. Gap indiretto

Se il semiconduttore è a gap diretto, un fotone di energia $E = E_g$ o superiore può promuovere un elettrone nella banda di conduzione. Nel caso di un semiconduttore a gap indiretto è necessario che l'elettrone, oltre all'energia, vari il suo momento e quindi il suo numero d'onda k . Facciamo l'esempio del silicio. Un fotone di energia E_g nel silicio ha momento pari a $p = \hbar k = E/v$ con $v = c/\epsilon_r$, quindi:

$$k_{\text{fotone}} = \frac{E_g \epsilon_r}{\hbar c} = \frac{1.12 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 12}{1.054 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 6.8 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$



Per passare dal massimo della banda di valenza al minimo della banda di conduzione l'elettrone deve variare k da 0 a $k' \sim \pi/a$, $a =$ costante reticolare $= 5.43 \text{ \AA}$. Perciò il salto di gap richiede $\Delta k \sim 5.8 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$. Il fotone di energia E_g è in grado di trasferire solo circa l'1.2% della variazione di k necessaria all'elettrone, per questo senza un altro "agente" (fonone o quanto di vibrazione reticolare) in grado di fornire il Δk richiesto la transizione non ha luogo.

Il gap indiretto del silicio provoca perciò un'inefficiente assorbimento ottico: è necessario uno spessore maggiore di materiale per ottenere la stessa frazione di luce assorbita. il Si non è quindi il materiale ideale per la conversione fotovoltaica.

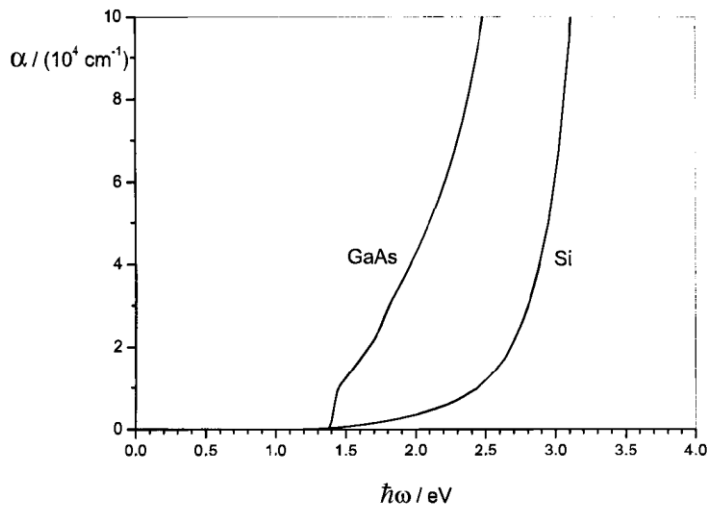
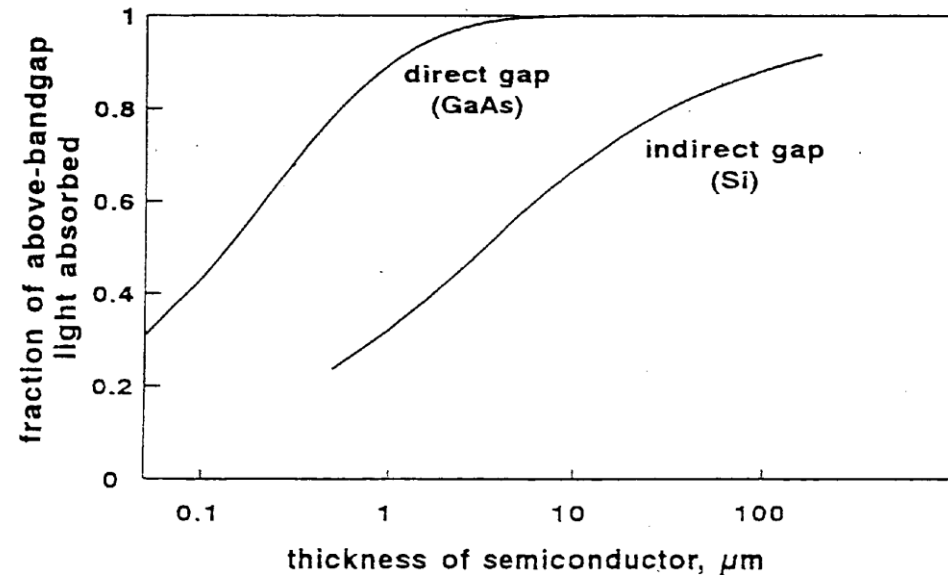


Figure 3.17: Absorption coefficient α of the “direct” semiconductor gallium arsenide and indirect semiconductor silicon.



Celle di seconda generazione: celle solari a film sottile

Nelle celle solari a film sottile, in generale a gap diretto, la quantità di materiale usata è circa 100 volte inferiore a quella usata per i moduli cristallini ed è una parte trascurabile del costo totale.

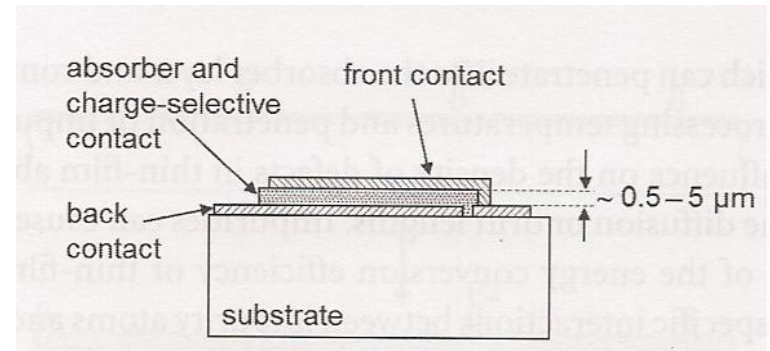
Coefficienti di assorbimento nel visibile

Materiale	CuInSe ₂	CdTe	Si amorfo	Si cristallino
α (cm ⁻¹) ($\lambda = 0,6$ micron)	$1,2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$

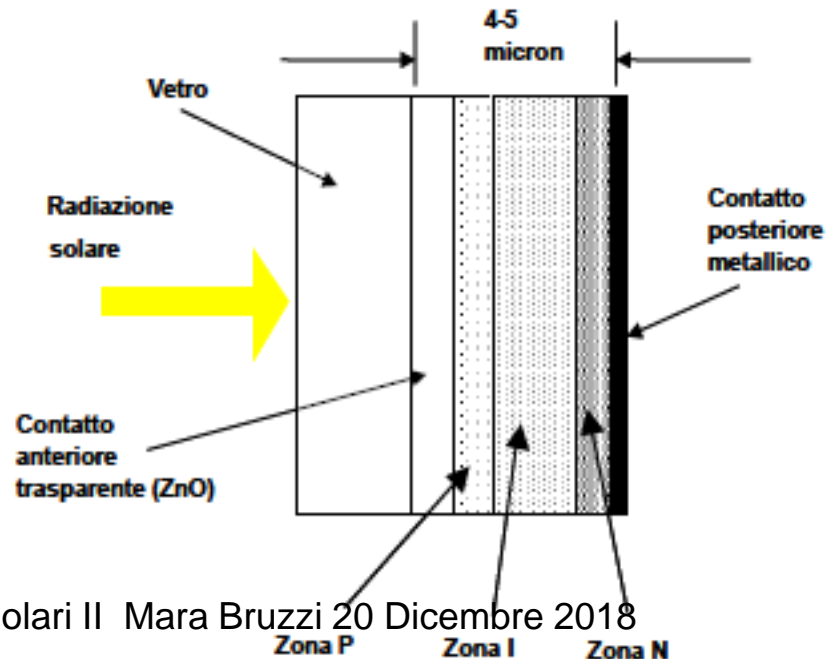
Per materiali come diseleniuro di rame ed indio, tellururo di cadmio, silicio amorfo sono sufficienti spessori di circa 1 – 4 micron per assorbire completamente la luce, al contrario del silicio cristallino ove il coefficiente di assorbimento è circa due ordini di grandezza più basso.

Le celle solari a **film sottile** sono prodotte per deposizione di uno o più strati di materiale su opportuno substrato.

Omogiunzione pin. Sulla faccia interna di un supporto di vetro è deposto uno strato di ossido conduttore e trasparente, che funziona da contatto ohmico anteriore .



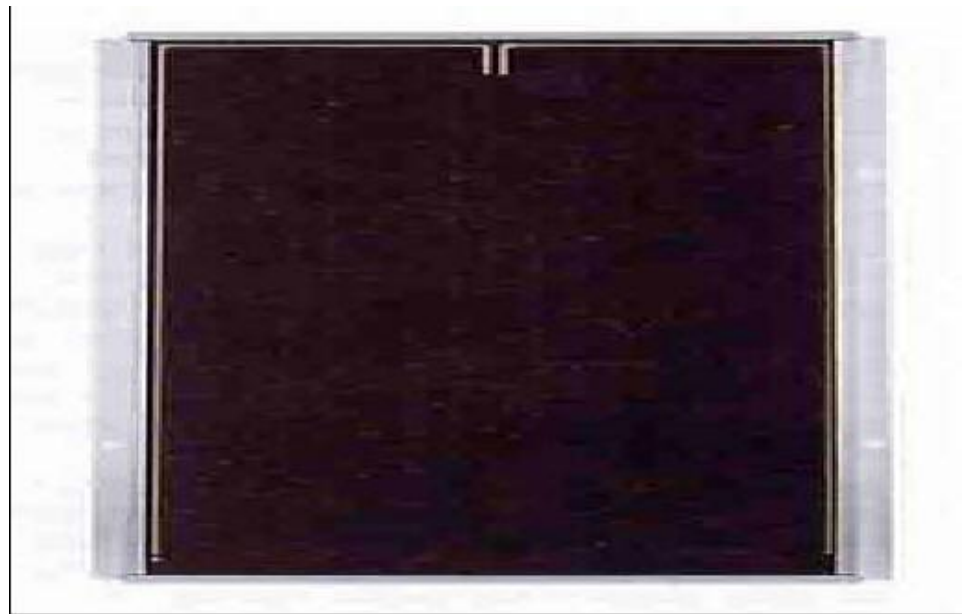
Su questo strato è deposto il materiale semiconduttore fotosensibile che costituisce la cella fotovoltaica in **tre strati drogato p, intrinseco e drogato n**. Il contatto posteriore della cella è dato da uno strato metallico conduttore.



Celle a silicio amorfo

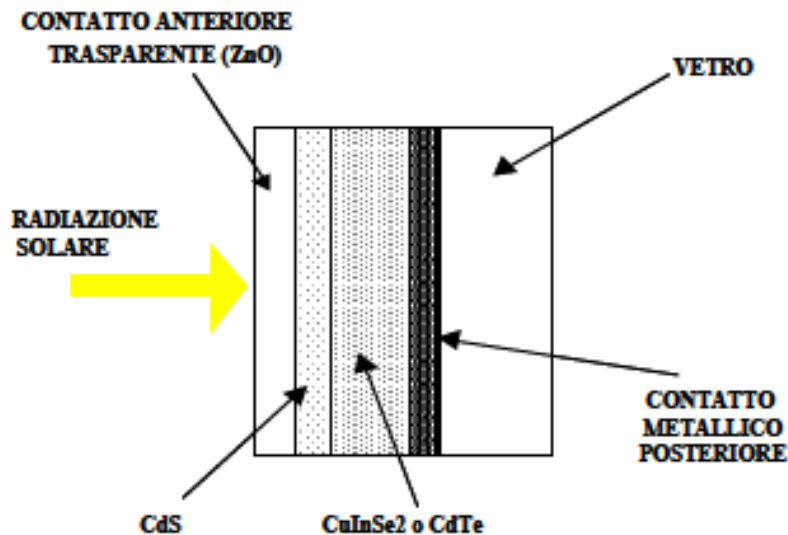
Nel silicio amorfo gli **atomi sono privi di ordinamento a lungo raggio e formano un reticolo casuale**: molti atomi non hanno quattro legami, originando numerosi difetti. Per passivare i legami rotti viene **introdotto dell'idrogeno**. Il silicio amorfo idrogenato (a-Si:H) è molto economico e ha coefficiente di assorbimento molto maggiore del mono o policristallino; può essere prodotto a basse temperature e quindi depositato su substrati plastici dal basso costo e bassa temperatura di transizione.

Rimangono da risolvere problemi legati alla stabilità delle prestazioni nel tempo: effetto Staebler–Wronski. La potenza di conversione della cella si riduce verso un valore stabile dopo esposizione iniziale (1000 h). Effetto dovuto a creazione di difetti che agiscono come centri di ricombinazione non radiativa.

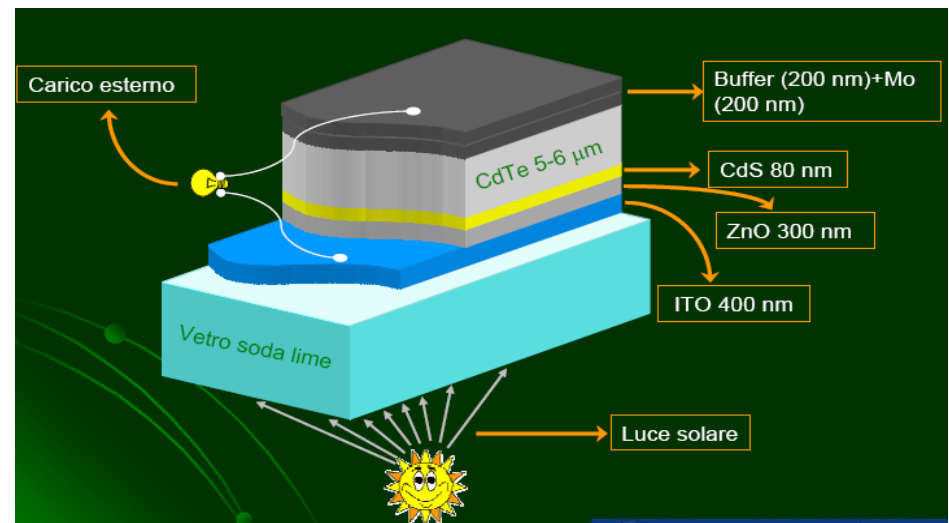


Eterogiunzioni: celle solari prodotte per deposizione di strati di materiali diversi. Rientrano in questa categoria le celle a: tellururo di cadmio (CdTe/CdS) e seleniuro di rame indio gallio ($\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ o CIGS).

Gli strati sono deposti su vetro a partire dal contatto metallico posteriore fino ad arrivare al contatto anteriore trasparente, per uno spessore globale di 4-5 micron.



Esempio CdTe/CdS



Il sistema di deposizione permette, in una sola operazione, la copertura di un'area grande come quella di un intero modulo, cioè circa 0,5 – 1m². **L'intero processo di fabbricazione può essere reso continuo in linee industriali completamente automatizzate.**

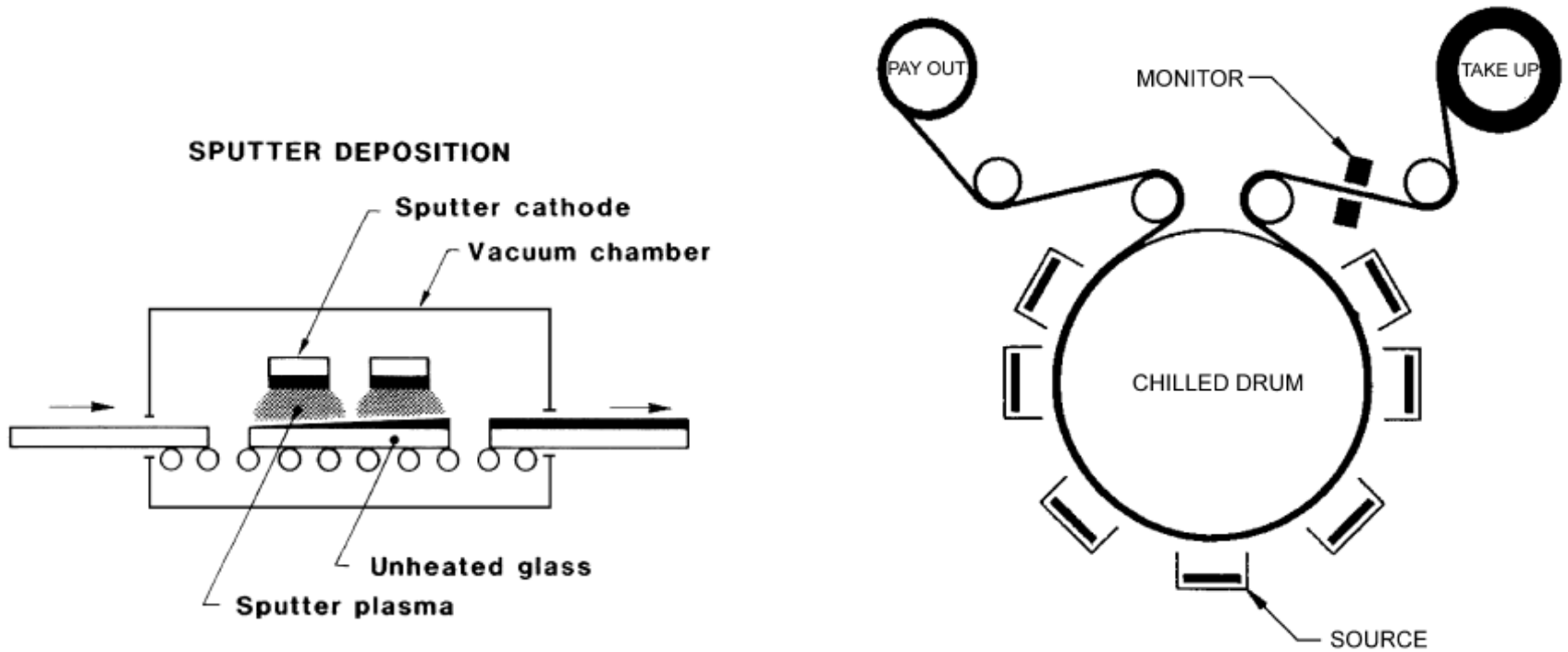


Fig. 3. Schematic diagram of the internal components of a roll-to-roll coater with several sputter cathodes. From Meyer [73].

CIGS: seleniuro di rame indio gallio ($\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$)

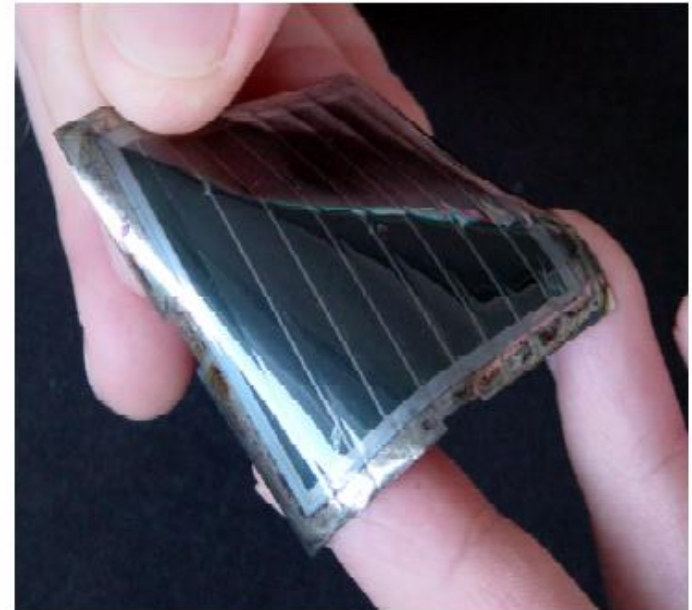
Il CIGS è un **semiconduttore a gap diretto variabile da 1.0 eV (CuInSe₂ o CIS) a 1.65 eV (CuGaSe₂ o CGS)** con coefficiente d'assorbimento molto maggiore di ogni altro semiconduttore utilizzato nei pannelli solari: più di 10^7 m^{-1} per fotoni di energia superiore a 1.5 eV.

Il film può essere depositato su substrati economici come vetro o plastica.

Prototipo di mini-modulo CIGS di su foglio polimerico



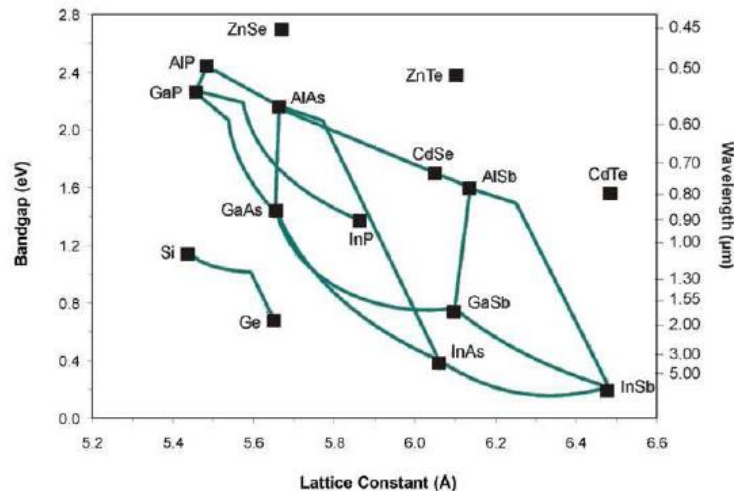
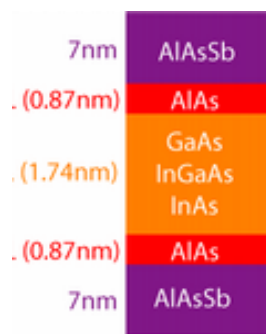
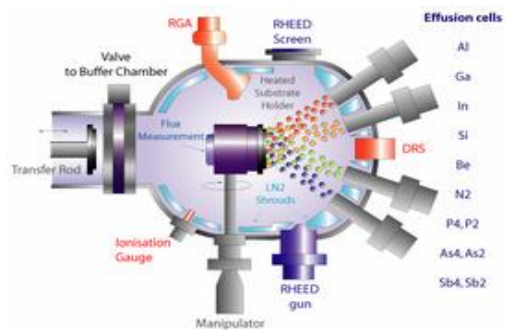
(Source: Goswami)



Celle di terza generazione: le celle a multigiunzione

Considerando il Sole come corpo nero a 5760K e la cella come un altro corpo nero a 300K il limite di efficienza è dell'ordine dell'80-90%. Come avvicinarsi a questa efficienza? **Usando una cella ideale in grado di utilizzare tutta la radiazione solare .**

Le celle fotovoltaiche a multigiunzione sono ottenute per crescita epitassiale di strati di diversi semiconduttori III-V con gap ottimizzati e analogo costante reticolare.

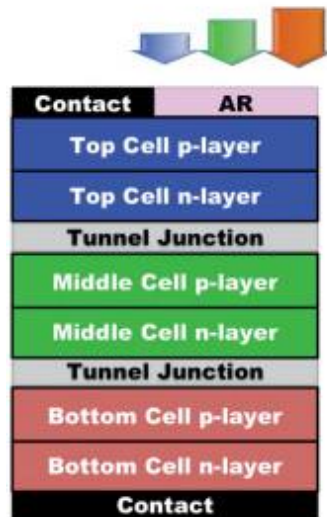


Reattore MBE per la crescita dell'eterostruttura InGaAs/AlAsSb.

Le sorgenti a stato solido utilizzate sono: Al, Ga, In del III gruppo, più Si utilizzato come drogante. Come materiali del gruppo V: P₂, As₂ and Sb₂. A sinistra un tipico risultato del metodo di crescita epitassiale MBE.

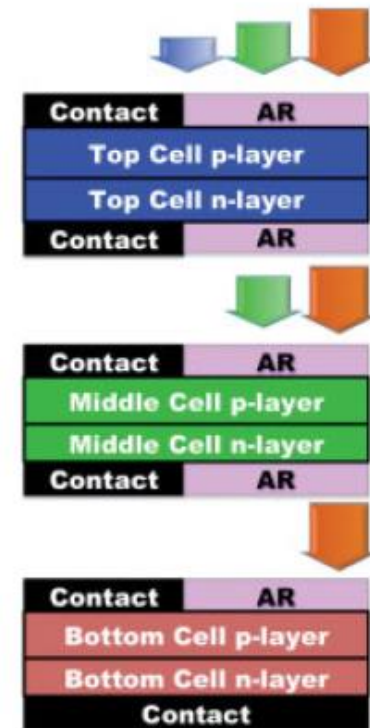
Principio costruttivo delle celle solari a multigiunzione

Il materiale a gap maggiore è posto in cima, assorbe i fotoni a $\varepsilon > \varepsilon_g$ e lascia passare gli altri, che vengono assorbiti nei sottostanti strati a gap progressivamente inferiore.



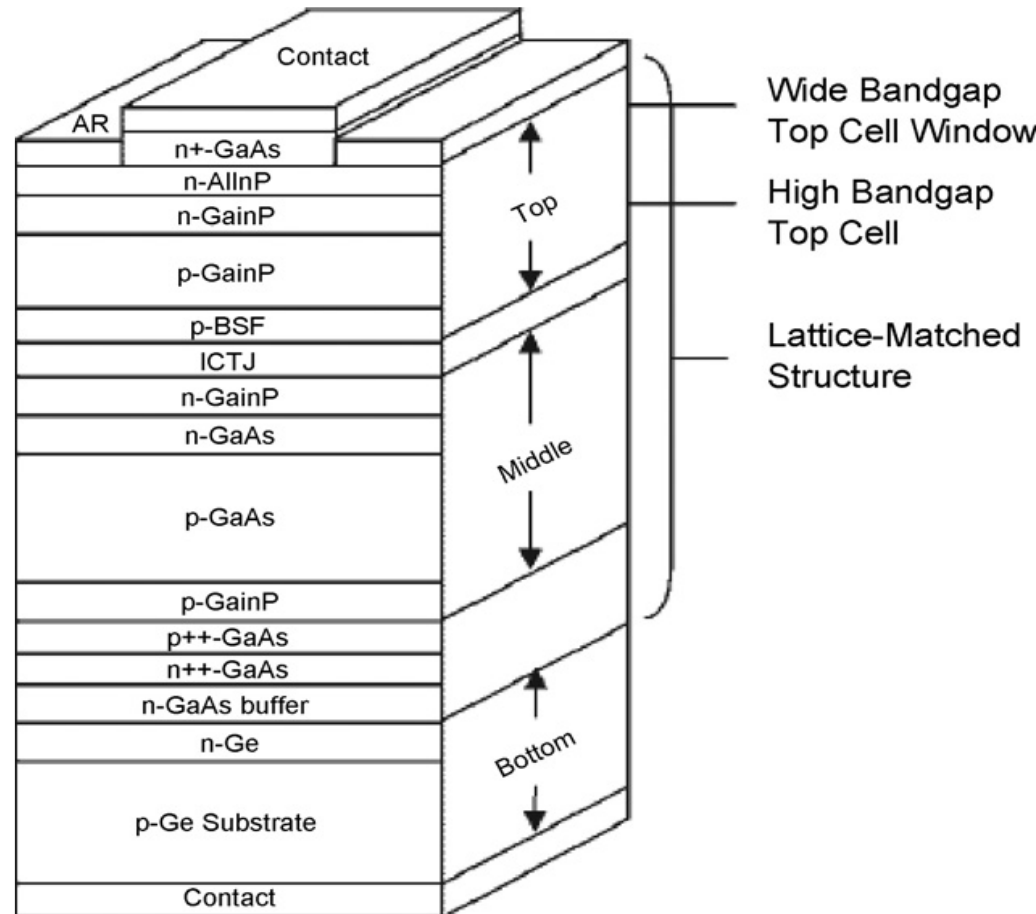
Cella solare a 3 giunzioni e due contatti

I tre materiali a diverso gap sono cresciuti uno sull'altro. Dato che le giunzioni sono poste in serie la corrente è limitata dalla giunzione che produce la corrente minore.

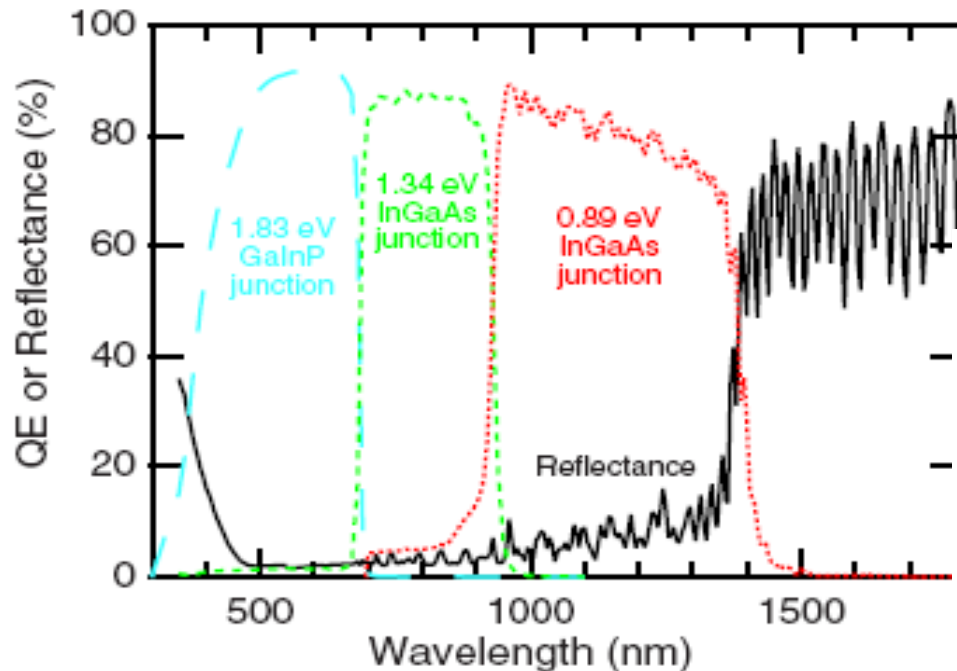


Multi-giunzione con contatti per ogni cella individuale. Elimina la restrizione sulla corrente, pero' ogni cella richiede il suo substrato e la tecnica di produzione è più complicata e costosa.

Esempio :
Sezione di una cella solare a
multigiunzione che utilizza tre
bandgap (InGaP, GaAs e Ge)

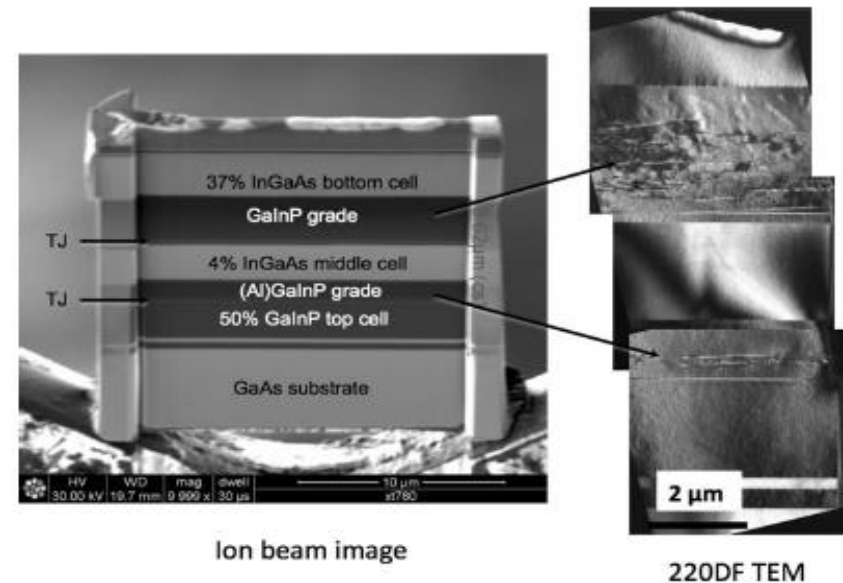


Efficienza massima ottenuta con prototipi a multigiunzione tripla 40.3% già nel 2008

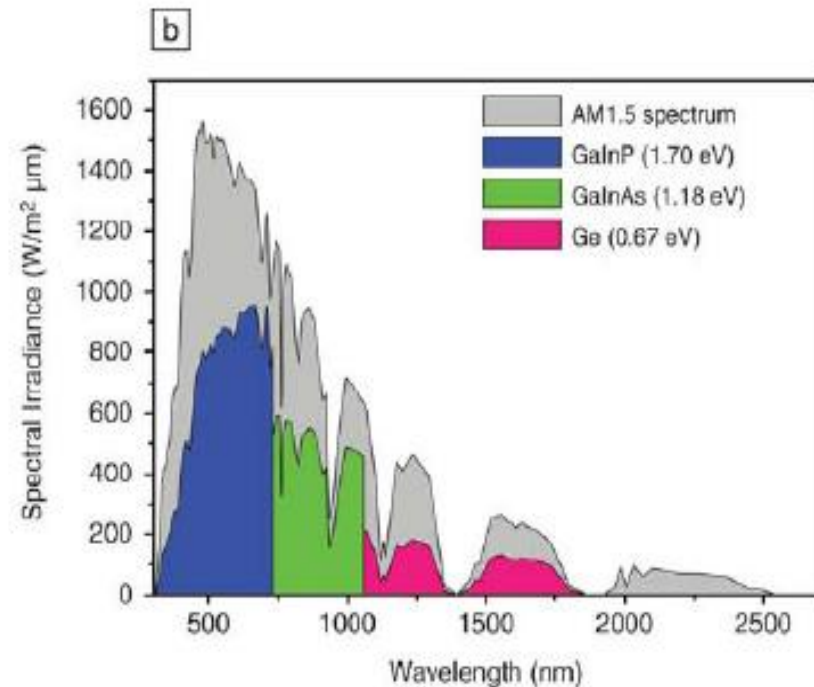
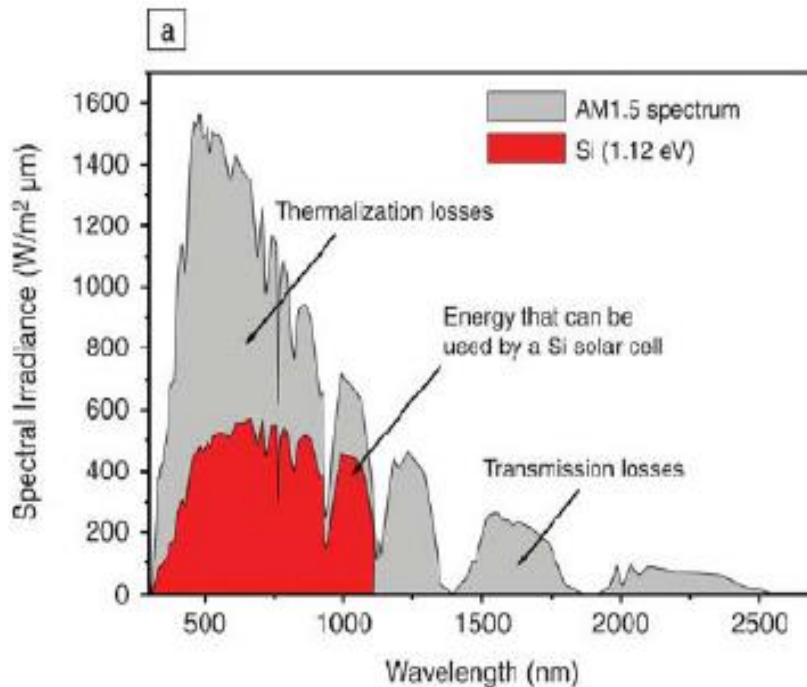


E' stato mostrato **teoricamente** che con quattro giunzioni si può raggiungere un rendimento di $\sim 71\%$ [A. Marti, G.L. Araujo, Sol. Energy Mater. Sol. Cell 43 (1996) 203.].

APPLIED PHYSICS LETTERS 93, 123505 (2008)



Confronto tra la porzione di spettro solare utilizzabile da parte della cella a tripla giunzione e da quella a giunzione singola di Si



APPLIED PHYSICS LETTERS 93, 123505 (2008)

A causa dell'area ridotta dei sistemi a multigiunzione è **necessario utilizzare sistemi a concentrazione delle luce solare**. Il primo concentratore solare è stato sviluppato nella metà degli anni 70 dai Sandia Labs. I sistemi a concentrazione comportano una maggiore complessità con problemi di **focalizzazione , inseguimento solare e raffreddamento**.

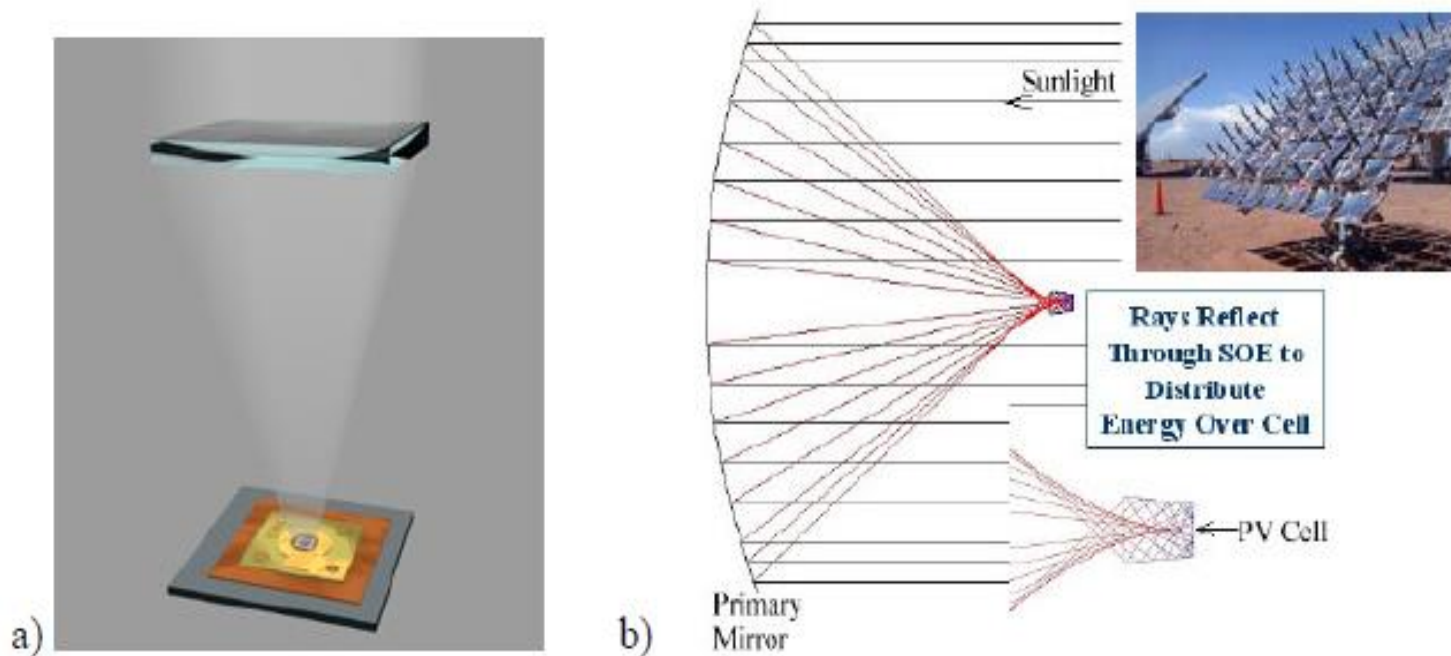
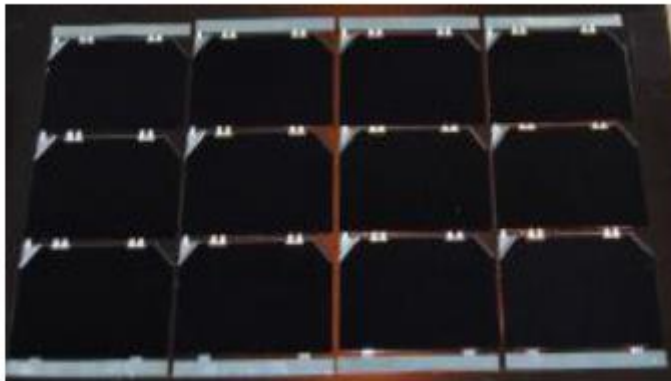
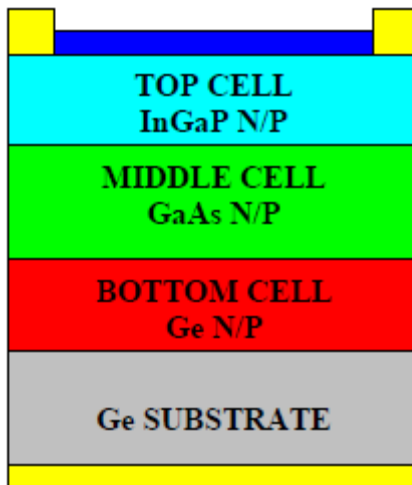


Figure 12: a) Concentrix concentrator using Fresnel lenses [65];
b) Spectrolab's reflective-optics concentrator module [64].

Product code: CTJ-30

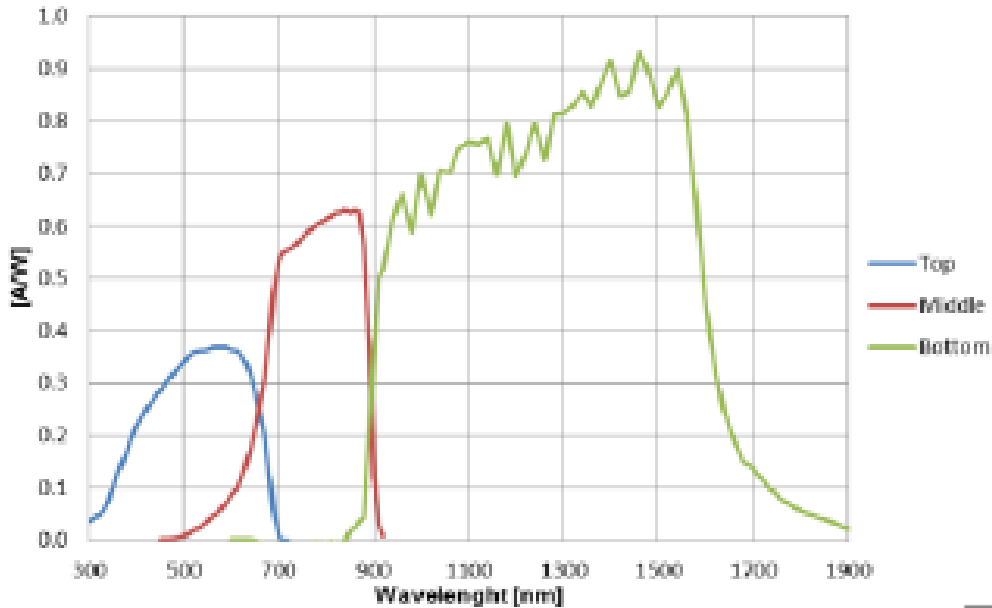
Triple-Junction Solar Cell for Space Applications



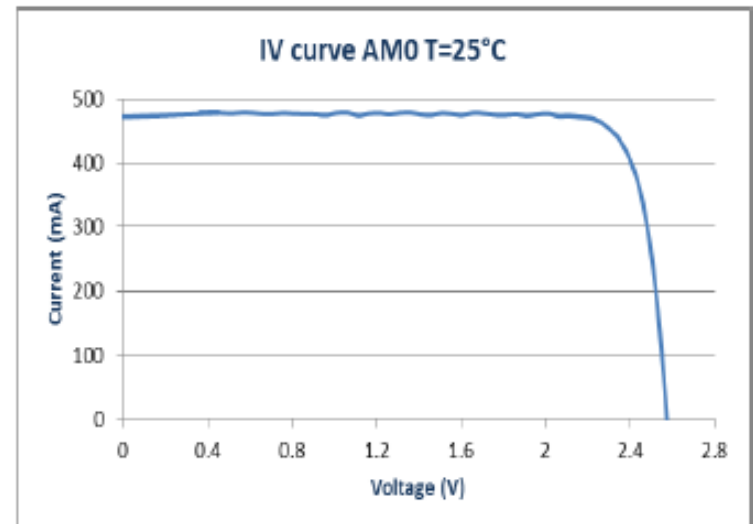
FEATURES & CHARACTERISTICS

- Triple Junction Solar Cells InGaP/GaAs/Ge for Space Applications
- Polarity N on P
- Very low solar cell mass (81-89 mg/cm²)
- Thickness 160 μm ±20 μm.
- Average efficiency 29%
- Fully qualified under ESA Standard ECSS E ST20-08C for LEO and GEO orbit
- External By-pass diode for reverse bias protection
- Weldable or Solderable Contacts, Front and Back, based on gold coated silver layers.
- Standard Dimensions available 8cm², 26.5 cm², 27.5 cm² and 30.15 cm²
- Customer Specific Sizes Available
- Good mechanical strength





Typical Current-Voltage Characteristic
(cell size 26.5cm², efficiency 29.5%)



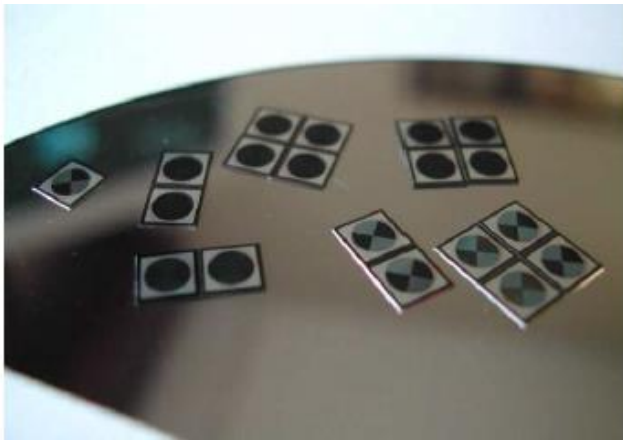
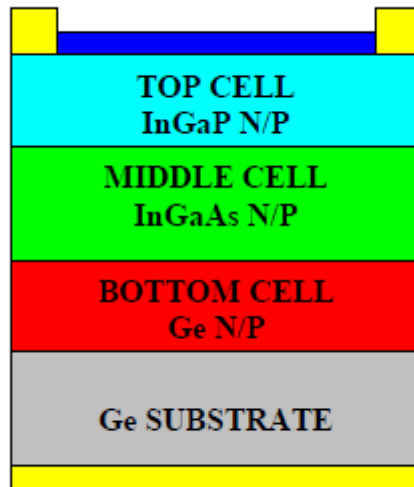
PERFORMANCE DATA

Solar cell average electrical output parameters
@AM0, T=25°C

Area (cm ²)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (V)	I _m (mA)	V _m (V)
26.5	473	2.6	455	2.32
30.15	538	2.61	517	2.33

Product code: CCTJ-40

Triple-Junction Solar Cell for Terrestrial Applications

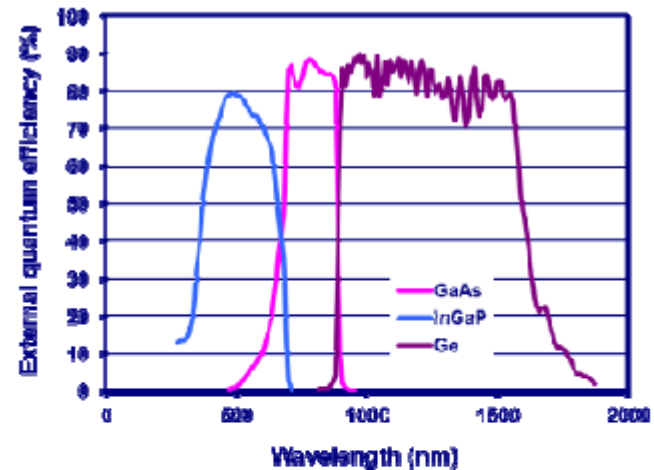
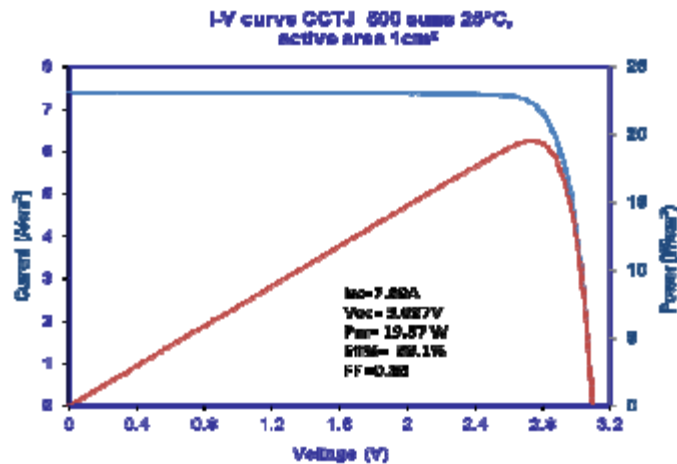


- Triple Junction Solar Cells
InGaP/GaAs/Ge for CPV systems
- Polarity N on P
- Multi-layer antireflective coating matched with incident spectrum
- Characterized for terrestrial applications under concentrated illumination (over 1000 suns)
- Front and back contacts based on gold coated silver layers, weldable or solderable or bondable.
- Dimensions from 1 mm² up to 2 cm²
- Customized dimensions available
- Thickness 170 μm ± 30 μm.
- Minimum average efficiency 39%
- Operating temperature < 100°C
- Maximum temperature < 350°C
- Meet ESA ECSS Standard ECSS E20-08 for thermal cycling and humidity.
- External by-pass diode for reverse bias protection

Typical solar cell electrical parameters
@AM1.5D, low AOD, T=25°C

Suns	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_m (W/cm ²)	FF	Eff (%)
200	3.0	2.9	7.6	0.89	38.1
500	7.4	3.1	19.6	0.86	39.1
1000	14.8	3.15	39.1	0.84	39.1

Current-Voltage Characteristic @ 500 suns



TEMPERATURE COEFFICIENTS

Temperature Dependence at 500 suns
(20°-70°C)

$\Delta J_{sc}/\Delta T$	$\Delta V_{oc}/\Delta T$	$\Delta \eta/\Delta T$
$\mu\text{A}/\text{cm}^2/\text{°C}$	mV/°C	%abs/°C
6.9	-3.99	-0.05

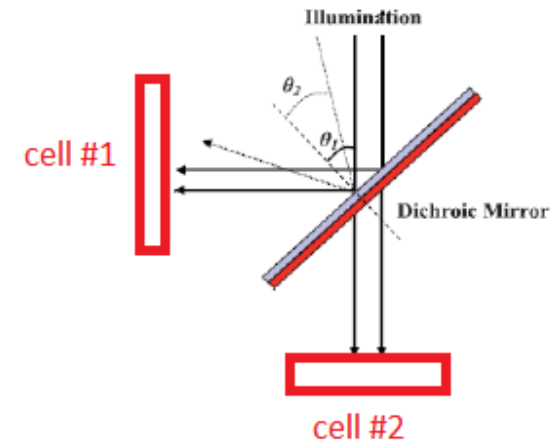
Metodo “Lateral solar spectral beam splitting”

Permette di dividere la radiazione solare in bande spettrali mediante divisori ottici di fascio (specchi dicroici) e di direzionarle verso regioni diverse, coinvolgendo anche zone dello spazio usualmente non attive nella struttura.

Ogni banda spettrale è direzionata verso un dispositivo a giunzione (singola, doppia) con gap ottimizzato per la conversione fotovoltaica di quella stessa banda.

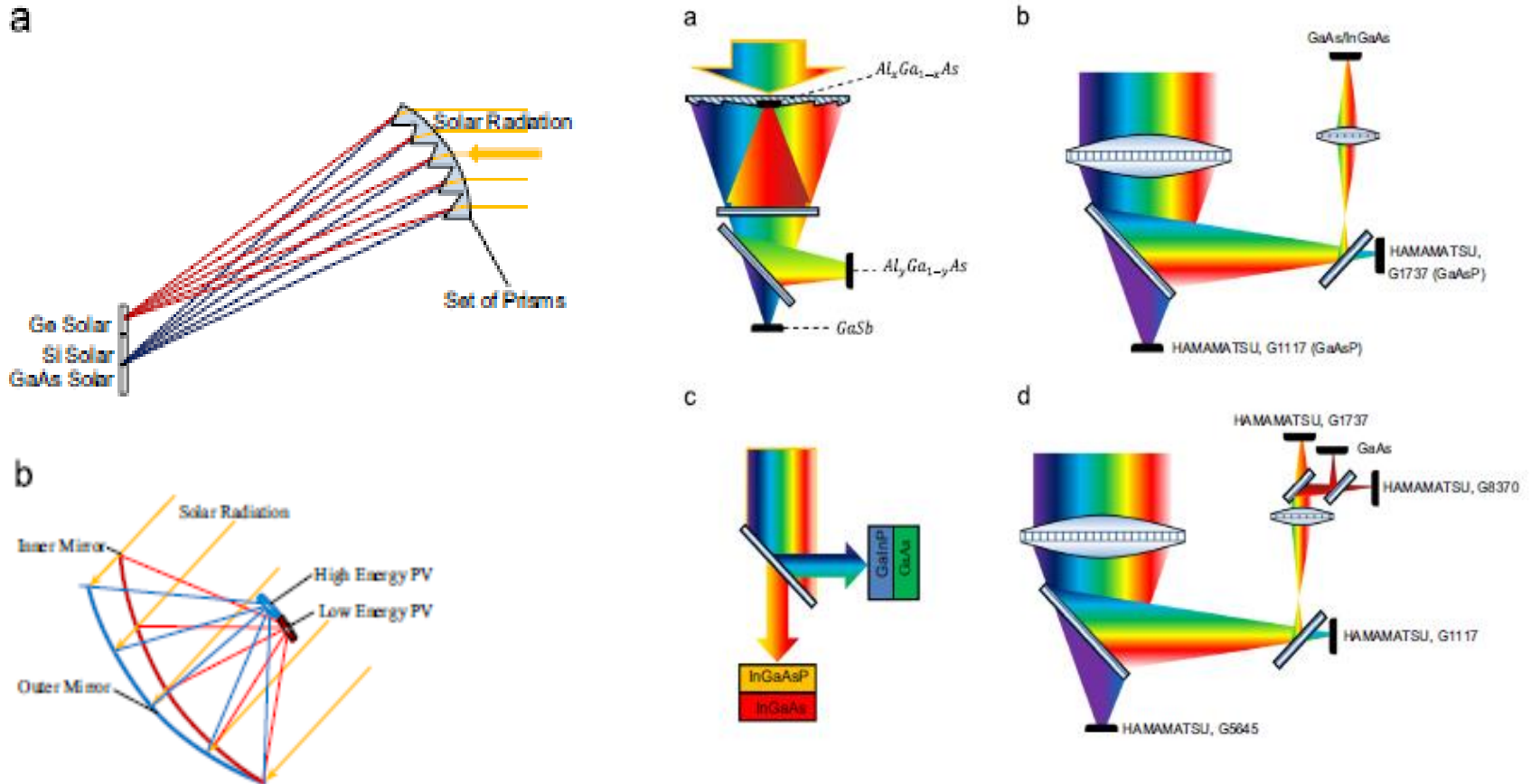
Vantaggi rispetto alla multigiunzione a crescita epitassiale:

- Dispositivo di più semplice realizzazione → Costi minori
- Non soffre delle limitazioni legate al lattice mismatch
- utilizzo di giunzioni sia in serie che in parallelo



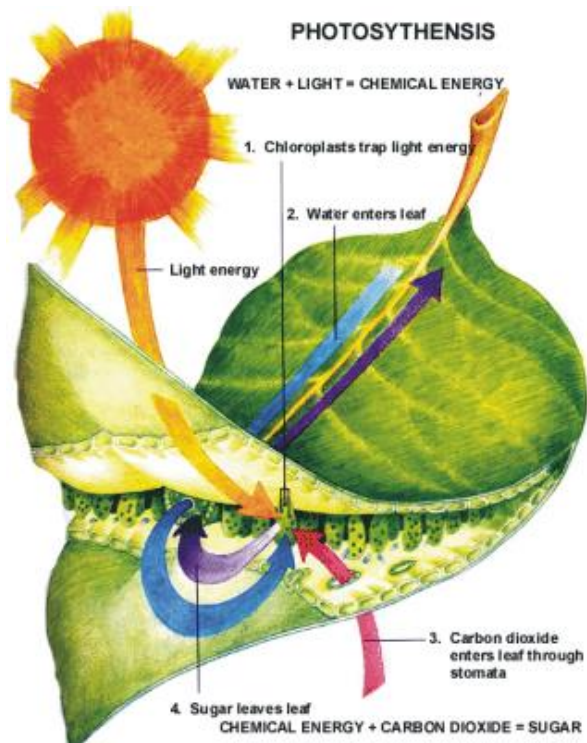
Spectral Splitting

Alcuni esempi di approccio per divisione laterale in bande della radiazione solare



Celle solari di III generazione: DSSC

La foglia è un esempio di cella solare: un dispositivo in grado di trasformare la radiazione solare in una forma di energia facilmente accumulabile.



Attraverso la fotosintesi la radiazione solare viene trasformata in energia chimica, in una forma così stabile da poter essere immagazzinata e riutilizzata milioni di anni dopo (combustibili fossili).

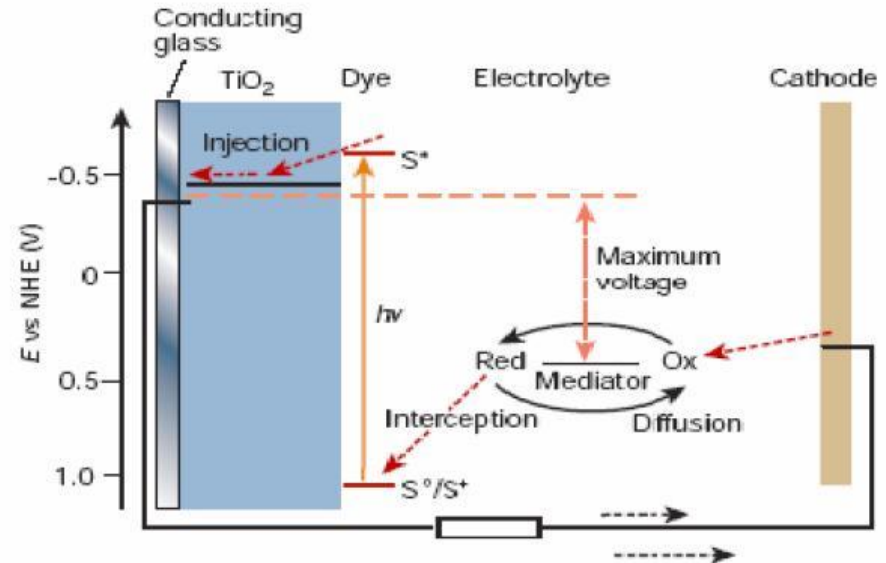
Lo stesso principio di funzionamento è adottato dalle celle DSSC: **Dye-Sensitized Solar Cells**. Si tratta di celle solari foto-elettrochimiche di basso costo prodotte con materiali sottili **nanostrutturati**.

Principio di funzionamento

Proposte negli anni 90 da **M. Grätzel (Politecnico di Losanna)** utilizzano **semiconduttore nanocristallino di basso costo (TiO_2) opportunamente**

“sensibilizzato” con particolari sistemi chimici (dye-sensitizer) + elettrolita (liquido, gel o solido organico).

- La radiazione luminosa cede energia ad un elettrone del colorante portandolo in uno stato eccitato
- L'elettrone viene iniettato nella banda di conduzione del TiO_2 e trasportato fino all'anodo
- Sul catodo viene prelevato un elettrone dal circuito e grazie alle reazioni redox nell'elettrolita viene riportato fino al colorante permettendo la sua riduzione. Viene richiuso così il circuito.
- Il catalizzatore sul catodo permette di velocizzare le reazioni redox di alcuni ordini di grandezza



Potenzialità del sistema

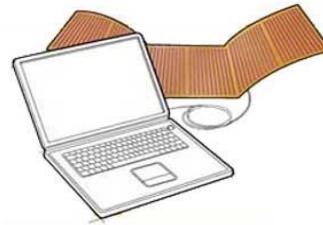
- (a) se realizzato con materiali di natura e dimensioni appropriati, **può essere reso trasparente**, e quindi **utilizzato, per esempio, per i vetri delle abitazioni, aprendo la strada al possibile sviluppo di elementi strutturali per edilizia in grado di produrre energia;**
- (b) si presenta in **configurazione bi-facciale** permettendo la cattura di luce su ampi angoli solidi;
- (c) **può essere usato su substrati flessibili ed essere conformato in modo da ben inserirsi come elemento architettonico/strutturale, anche di grandi dimensioni, in un edificio.**

L'efficienza massima raggiunta per il momento da questi dispositivi si attesta intorno al **10-11%** ed i **costi di produzione sono circa 1/5 di quelli delle celle a silicio amorfo.**

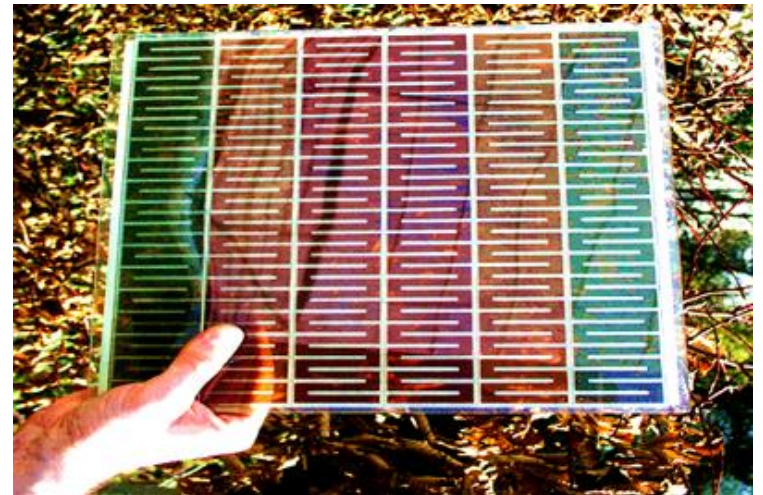
Produzione su scala industriale :

- Soloronix, Losanna - Svizzera
- DyeSol– Australia
- Konarka Technologies– USA

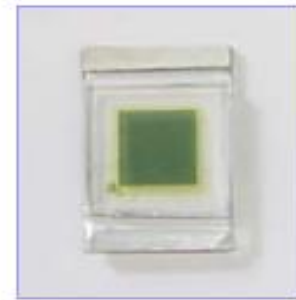
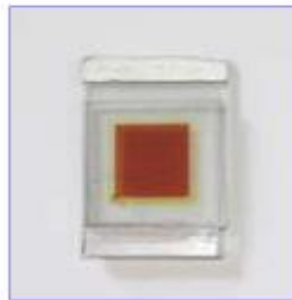
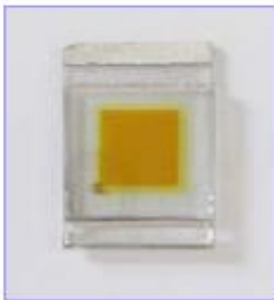
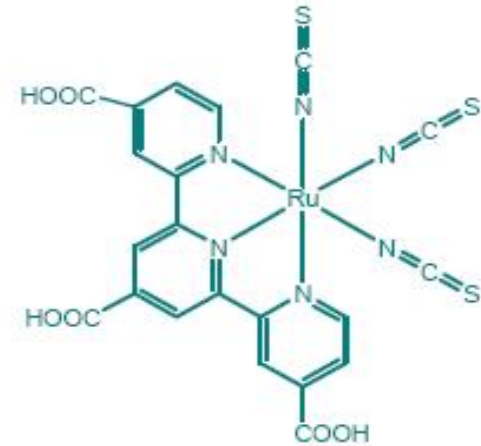
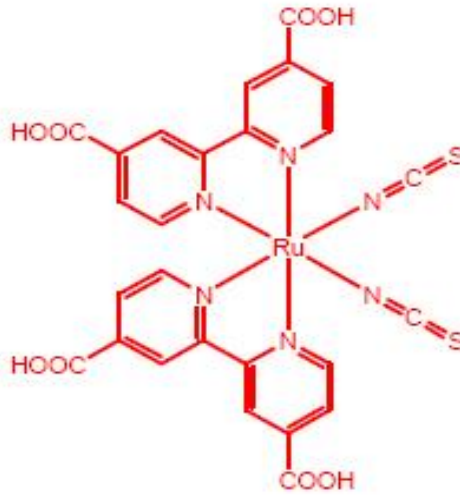
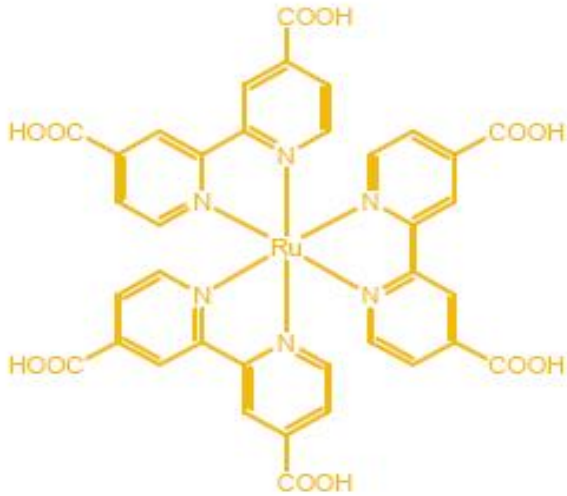
Esempi di celle solari a TiO_2 nanostrutturato



Dyesol BIPV Panel
(registered design)

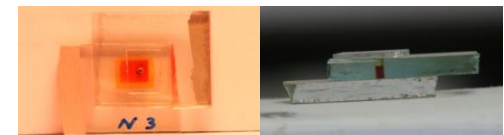
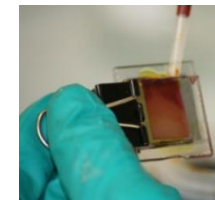
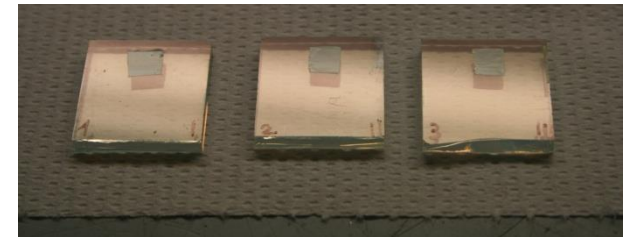
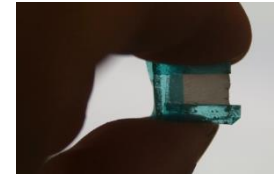
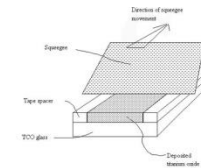


Possibilità di varie colorazioni a seconda del dye selezionato



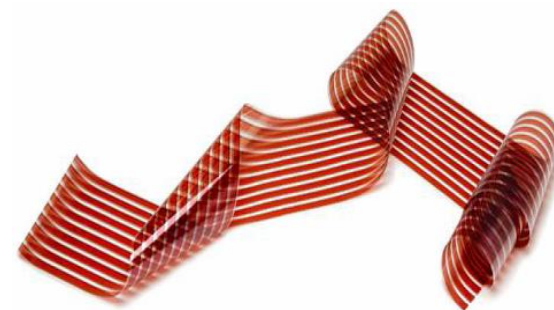
Realizzazione

- Si stende un composto di TiO_2 in nanoparticelle e materiale organico sul vetrino dell'anodo
- Si “sinterizza” in forno a 450°C .
- Si immerge nel colorante che si lega al TiO_2
- Si cosparge il vetrino che farà da catodo di un materiale catalizzatore
- Si richiude il tutto e si introduce l'elettrolita per capillarità
- Come ultima fase si può sigillare la cella.

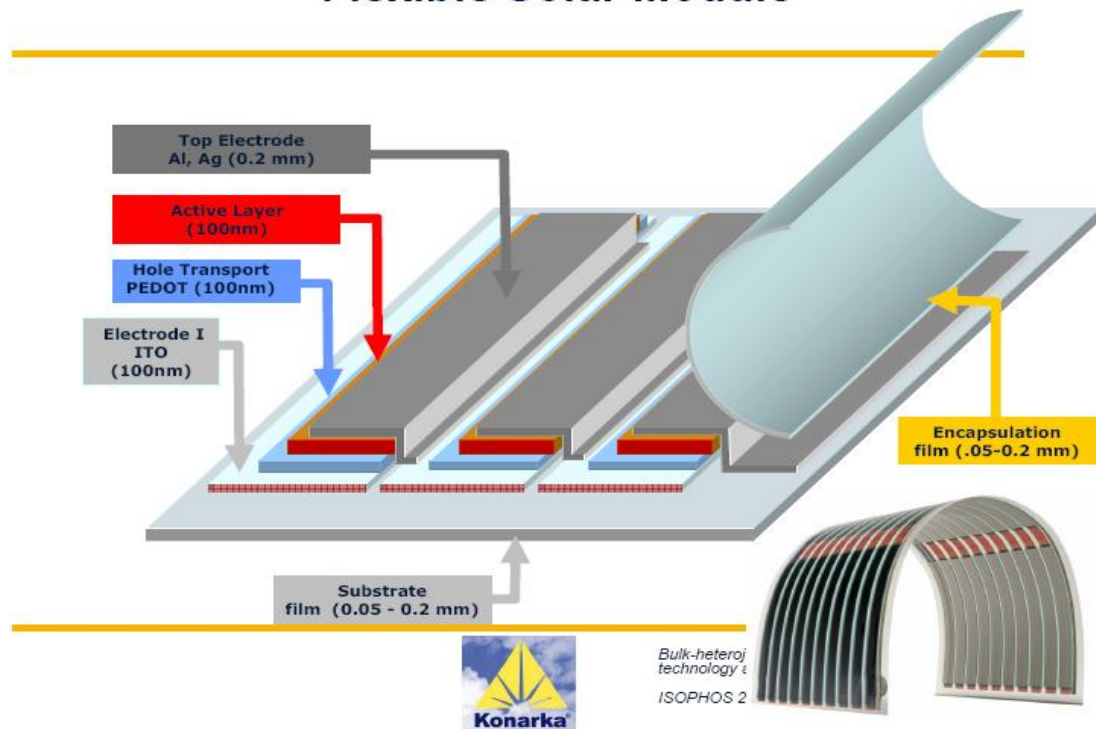


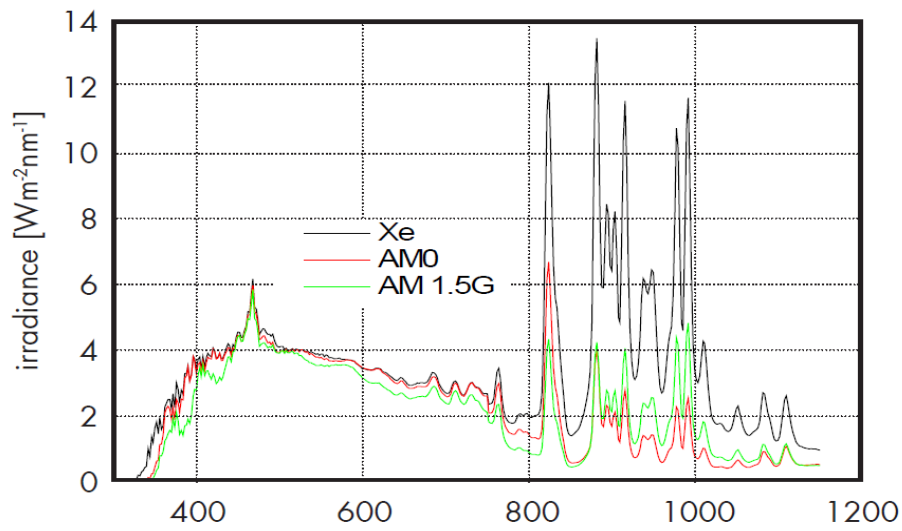


Produzione di elementi leggeri e flessibili



Flexible Solar Module

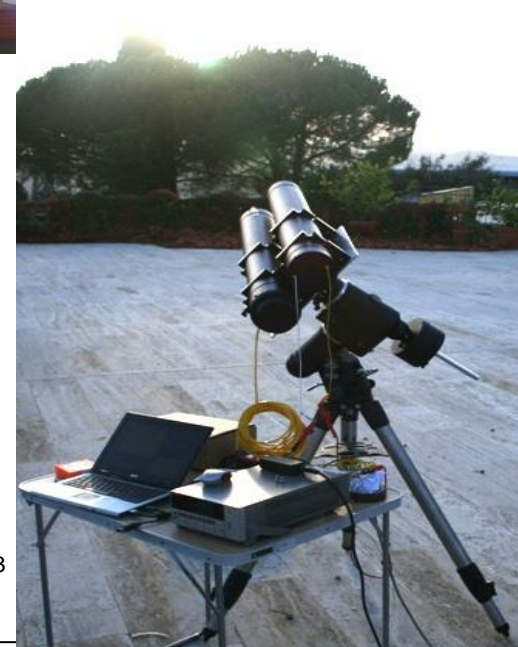
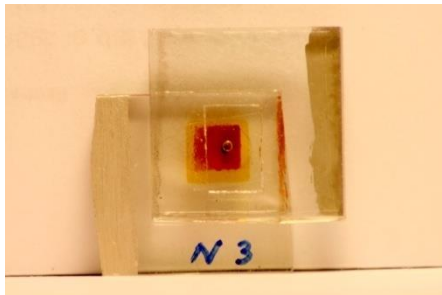
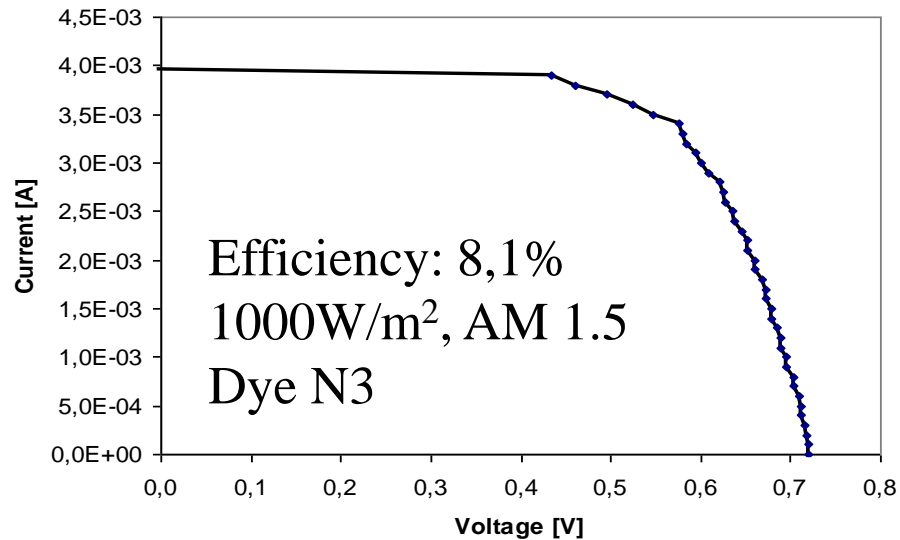




Misure di efficienza cella di Graetzel



I-V DSSC



Conclusioni

La domanda di energia primaria sulla Terra è in crescita ed è di vitale importanza la ricerca di fonti energetiche alternative a quelle attuali. A questo riguardo ci si aspetta che il fotovoltaico contribuisca in modo significativo, fino a circa il 65% del totale nel 2100.

Anche se a tutt'oggi i sistemi fotovoltaici maggiormente usati sono prodotti con Si mono- e policristallino, la ricerca è diretta verso lo studio di sistemi innovativi con altri materiali e sistemi, in quanto il **Si non è il materiale ideale per la conversione energetica della radiazione solare in elettricità.**

Multigiunzioni ottenute per crescita epitassiale di più strati semiconduttori **con gap energetici in grado di assorbire una larga parte della radiazione solare** e celle solari a film sottile a gap diretto rappresentano un'alternativa concreta e promettente, anche se non completamente matura.

Le celle solari a materiali nanocompositi rappresentano l'ultima frontiera della tecnologia; il **grande potenziale delle nanotecnologie** risulta a tutt'oggi in gran parte inesplorato.