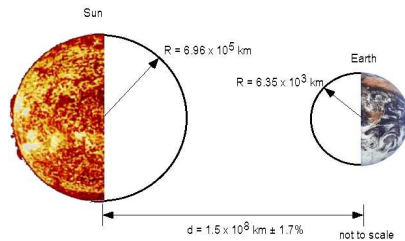


## Cap IV: Celle Fotovoltaiche



## Il Sole e le reazioni nucleari



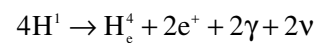
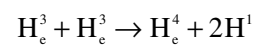
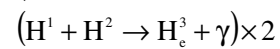
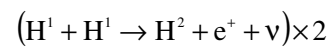
In ogni secondo, 600 milioni di tonnellate di idrogeno si trasformano in 595,5 milioni di tonnellate di elio. Le rimanenti 4,5 milioni di tonnellate di idrogeno si trasformano in energia secondo l'equazione di Einstein

$$E = mc^2$$

L'energia generata dal Sole al secondo è

$$4,05 \cdot 10^{26} \text{ W (405'000 miliardi di TW)}$$

Reazioni nucleari nel Sole  
(catena p-p):



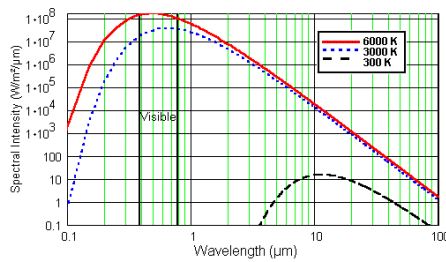
Rilascio totale di energia:

$$27,6 \text{ MeV} = 4,42 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 4,42 \text{ pJ}$$

# Energia dal sole

Il sole si comporta come un corpo nero con temperatura di 5780 K:

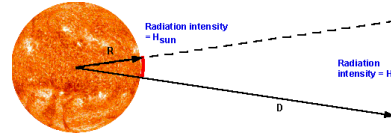
$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)}$$



Liceo Scientifico Severi

A. Di Bartolomeo

Maggio 2008



La **potenza irradiata dal Sole (L)** si può ottenere con la legge di Stefan-Boltzmann  $H = \sigma T^4$

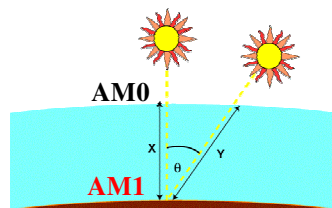
$$L = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

La **il flusso di energia dal Sole (L) che arriva sulla Terra (irradianza)** si può calcolare come:

$$\Phi = \frac{L}{4\pi D^2} \approx 1365 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

valore fuori dall'atmosfera (AM0)

# Effetto dell'atmosfera



Come riferimento per le celle solari si usa AM1.5

Con AM1.5 l'irradianza globale è circa 1 kW/m<sup>2</sup>

*AM = air mass*

Liceo Scientifico Severi

A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

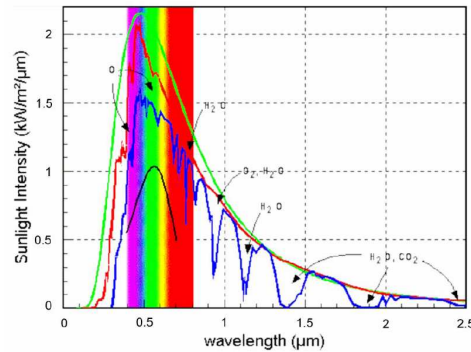
$$E = hv = hc/\lambda$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$\nu$ : frequenza della luce  
 $\lambda$ : lung. d'onda della luce

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$



## Fabbisogno energetico

L'energia dal Sole che arriva sulla superficie terrestre in un anno è circa  $1.51 \cdot 10^{17}$  kWh

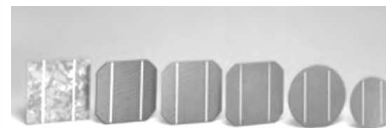
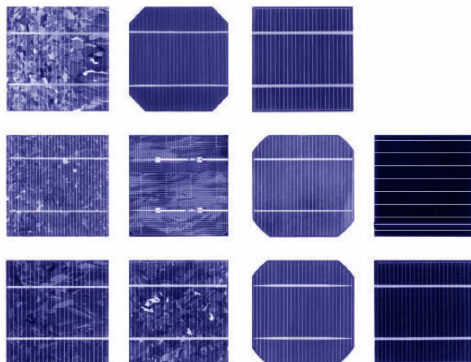
A livello mondiale:  $1.37 \cdot 10^{14}$  kWh

- $5.39 \cdot 10^{13}$  kWh dal petrolio
- $2.7 \cdot 10^{13}$  kWh dai gas naturali
- $3.1 \cdot 10^{13}$  kWh dal carbone
- $0.85 \cdot 10^{13}$  kWh dal nucleare
- $1.65 \cdot 10^{13}$  kWh valorizzazione dei rifiuti e rinnovabile

Il sole teoricamente ci fornisce più di 1000 volte dell'energia di cui abbiamo bisogno attualmente!

- L'Italia che ha una superficie di  $3 \cdot 10^5$  km<sup>2</sup>
- Con le tecnologie attuali da questa superficie, ricoprendola con impianti solari, si potrebbero ottenere  $31'500$  TWh pari a quasi 100 volte il fabbisogno energetico elettrico dell'Italia.
- Miglioramento delle tecnologie e distribuzione efficace degli impianti potrebbe rendere il solare la fonte principale dell'energia elettrica consumata nel nostro paese.

## Le celle solari

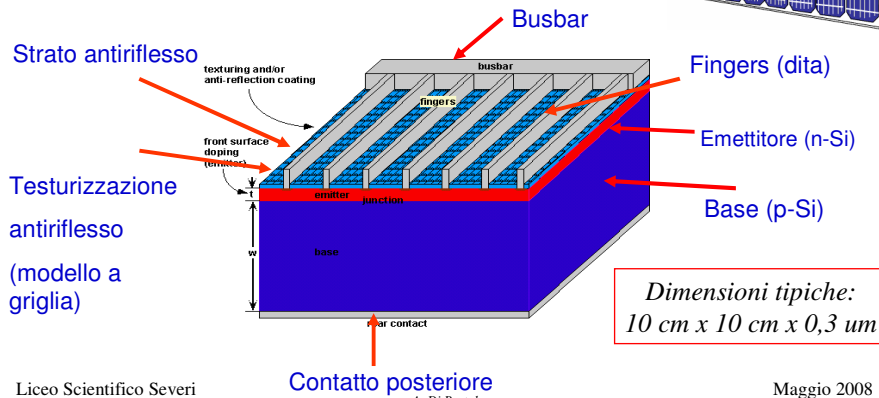
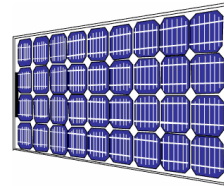


- Le **misure** più comuni sono:  
10 x 10 cm 12,5 x 12,5 cm 15 x 15 cm
- Le **forme** più comuni sono:  
quadrate, quadrate con smussatura sugli angoli, circolari
- Lo **spessore** tipico è compreso tra 0.25 e 0.35 mm
- La **potenza** tipica è di ca. 1,5 Watt

# Struttura della cella solare: Terminologia

7

- Una cella solare è un dispositivo a giunzione P-N
- La luce su una cella solare produce sia una corrente che una tensione
- che una tensione, quindi genera una corrente elettrica



Liceo Scientifico Severi

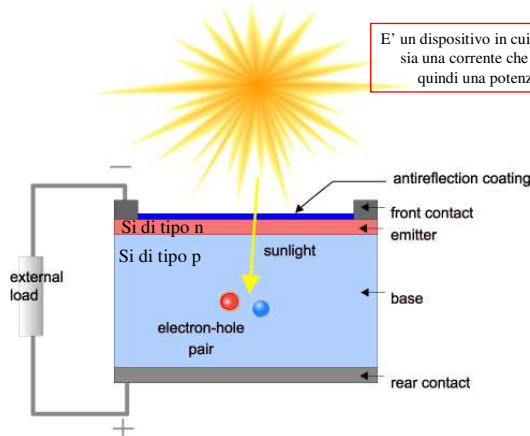
A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

# Principio di funzionamento della cella solare a semiconduttore

8

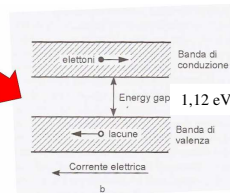
E' un dispositivo in cui la luce produce sia una corrente che una tensione, quindi una potenza elettrica.



Cella solare: semiconduttore dove la luce solare produce coppie elettrone-lacuna che vengono separate da un campo elettrico interno al semiconduttore.

Flusso luminoso

Serve energia per passare elettrone da banda di valenza a conduzione

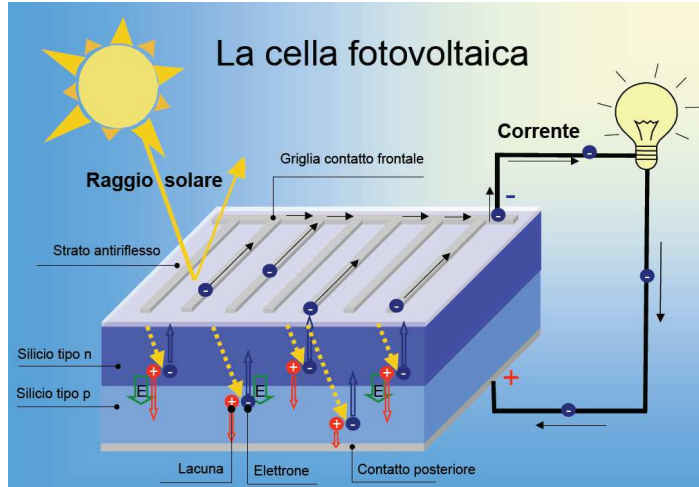


Liceo Scientifico Severi

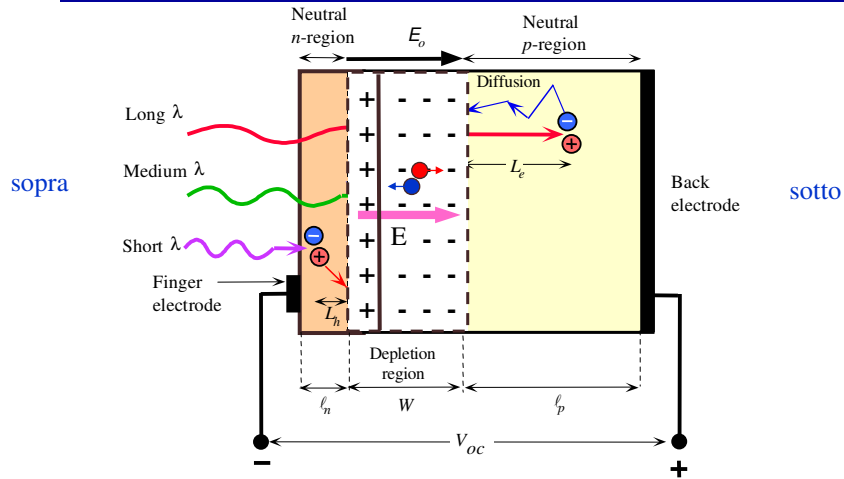
A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

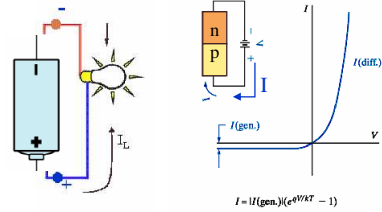
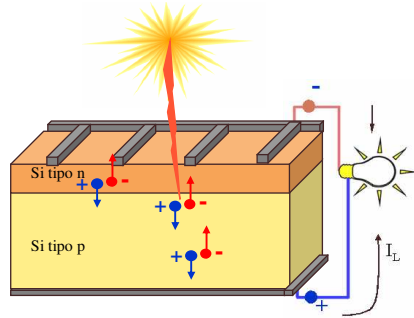
# La cella fotovoltaica



# Assorbimento della luce nella cella solare



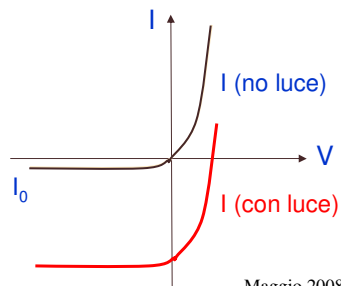
# La cella fotovoltaica



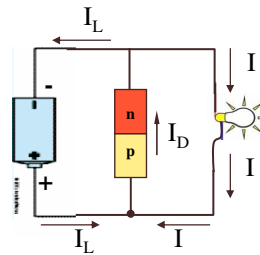
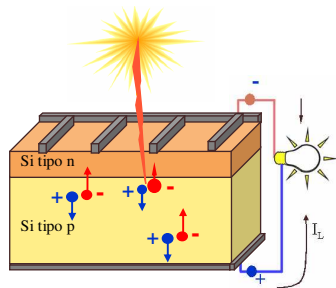
La corrente fotogenerata è una corrente inversa (va dal lato n verso il lato p) e si sottrae alla corrente  $I_D$  del diodo p/n:

$$I = I_D - I_L$$

dando origine alla caratteristica rossa in figura

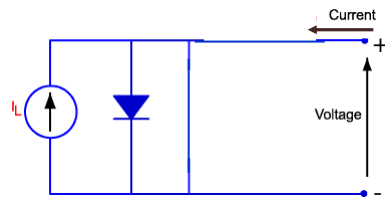


# Comportamento elettrico della cella solare



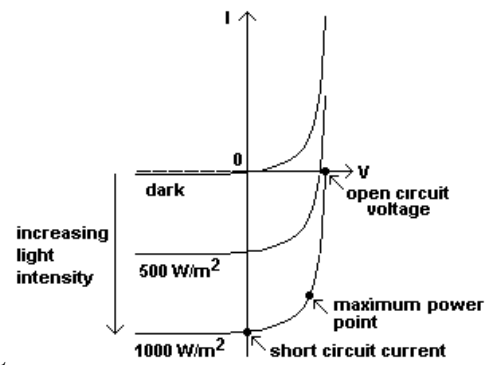
Applicando la legge di Kirchhoff dei nodi:  $I = I_D - I_L$

## Circuito equivalente della cella



$$I_{\text{total}} = I_D - I_L$$

$$I_{\text{total}} = I_0 (e^{qV/kT} - 1) - I_L$$



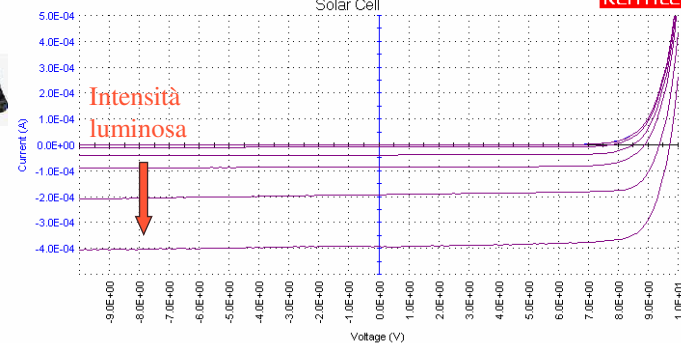
## Caratteristica I-V di una cella solare



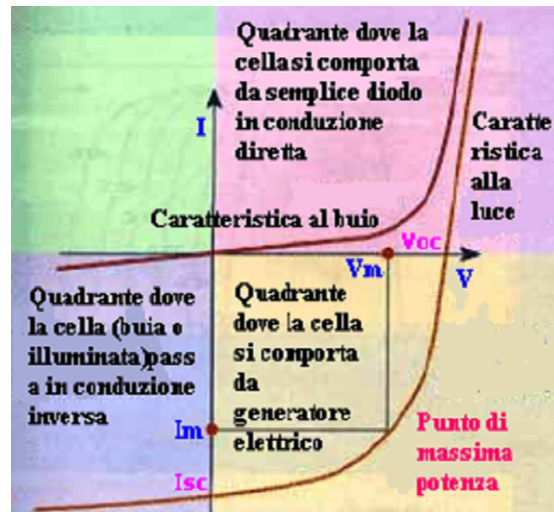
3/19/2008 12:09:43

Solar Cell

KEITHLEY

Resistance [Ohm]  
Data.RES = 1.94447e+008

## Caratteristica I-V della cella solare



## Parametri della cella solare: dettagli

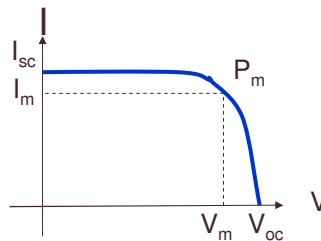
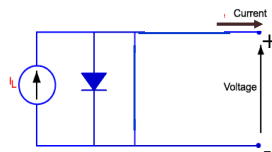


Grafico I-V solito di una cella solare – La corrente è mostrata positiva sull'asse y

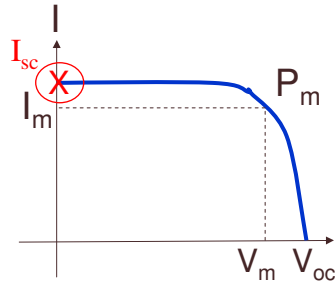


Parametri della cella solare

- $V_{oc}$  – voltaggio a circuito aperto,
- $I_{sc}$  - corrente a circuito chiuso,
- $P_m$  - punto di massima potenza
- $I_m, V_m$  – corrente e tensione nel punto di massima potenza
- **FF** – Fattore di riempimento (Fill factor)
- $\eta$  – Efficienza
- $R_s$  – resistenza in serie
- $R_{sh}$  – resistenza shunt (parallelo)



## Corrente di corto circuito, $I_{sc}$



$$I_{\text{total}} = I_0(e^{qV/kT} - 1) - I_L$$

$$\text{a } V=0 \quad I_{\text{total}} = -I_L = I_{sc}$$

• La corrente di corto circuito è la corrente attraverso la cella solare quando la tensione ai capi della cella è zero (cioè quando la cella solare è cortocircuitata).

• **La corrente di corto circuito è dovuta alla generazione ed alla raccolta di portatori generati dalla luce.**

• La corrente di corto circuito è la più grande corrente che può essere tirata dalla cella solare.

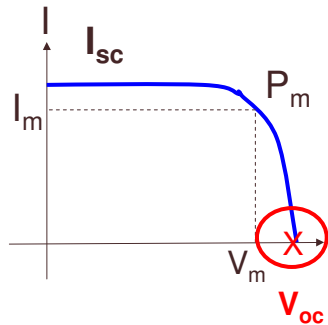
$$J_{sc} (\text{max}) = 42 \text{ mA/cm}^2$$

## Corrente di corto circuito, $I_{sc}$

La corrente di corto circuito dipende da:

- **area** della cella solare
- **numero di fotoni incidenti** (cioè la potenza incidente)
- **spettro della luce incidente.** Per la maggior parte delle misure sulle celle solari, lo spettro è standardizzato allo spettro AM1.5.
- **probabilità di raccolta** della cella solare che dipende principalmente dalla passivazione della superficie e dalla vita media dei portatori minoritari nella base.
- **proprietà ottiche** (assorbimento e riflessione) della cella solare

## Tensione di circuito aperto: $V_{oc}$



- La tensione di circuito aperto,  $V_{oc}$ , è la tensione massima disponibile da una cella solare e si ha quando la corrente è zero.

- La tensione di circuito aperto corrisponde alla quantità di polarizzazione diretta sulla giunzione della cella solare dovuta all'illuminazione.

- La dipendenza logaritmica significa che non c'è grande dipendenza dall'intensità della luce.

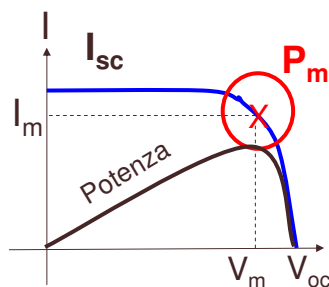
$$I_{total} = I_0(e^{qV/kT} - 1) - I_L$$

ponendo  $I_{total} = 0$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{(N_A + \Delta n)\Delta n}{n_i^2}\right)$$

## Potenza massima: $P_m$

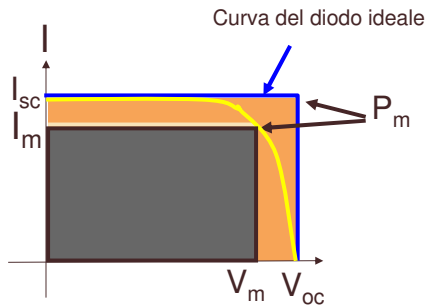


- Power La potenza prodotta da una cella solare aumenta con la tensione, raggiunge un massimo ( $P_m$ ) e poi decresce nuovamente.

$$P_m = I_m \times V_m$$

- Una cella solare fornisce una potenza DC.

## Fill Factor: FF



- The FF è definito come il rapporto tra la potenza massima dalla cella solare e quella della cella solare ideale.

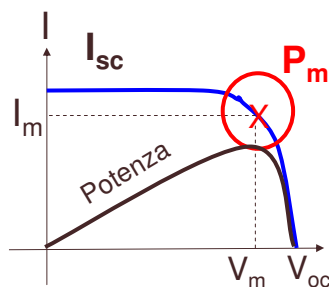
- Graficamente, l' FF è una misura della "squadatura" della caratteristica della cella solare.

$$FF = \frac{\text{Potenza massima della cella reale}}{\text{Potenza massima della cella ideale}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

## Efficienza: $\eta$

L'**efficienza** è definita come il rapporto tra l'energia di uscita dalla cella solare e l'energia solare in ingresso.

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}}$$



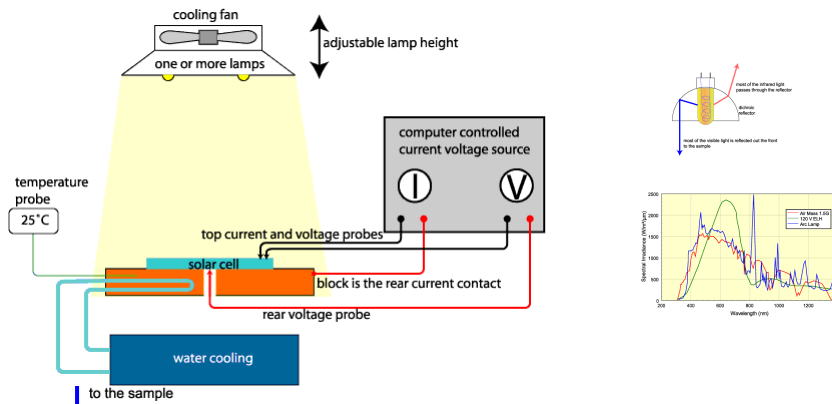
$$\eta = \frac{\text{Potenza Max. Cella}}{\text{Intensità luce incidente}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}}$$

- L'efficienza è il parametro più comunemente usato per confrontare le caratteristiche di una cella con quelle di un'altra.

- L'efficienza di una cella dipende anche dallo spettro solare, dall'intensità della luce solare e dalla temperatura della cella.

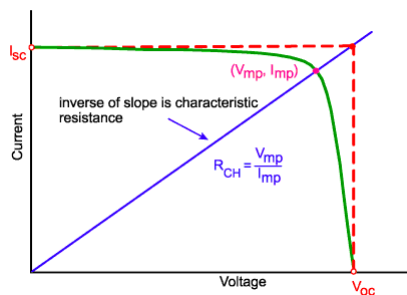
|                               |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| Silicio monocristallino       | $\eta = 13-17 \%$ |
| Silicio policristallino       | $\eta = 12-14 \%$ |
| Film sottili (silicio amorfo) | $\eta = 6-10 \%$  |

## Misura dell'efficienza della cella



- Air mass 1.5 spectrum (AM1.5) for terrestrial cells and Air Mass 0 (AM0) for space cells.
- Intensity of 100 mW/cm<sup>2</sup> (1 kW/m<sup>2</sup>, one-sun of illumination)
- Cell temperature of 25 °C (not 300 K)
- Four point probe to remove the effect of probe/cell contact resistance

## Resistenza caratteristica cella, $R_{ch}$

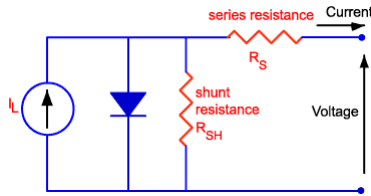


$$\bullet R_{CH} = \frac{V_{MP}}{I_{MP}} \quad \text{o} \quad R_{CH} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$

- Se la resistenza di carico è uguale alla resistenza caratteristica della cella, il trasferimento di potenza è massimo

## Effetto di resistenza in serie ed in parallelo

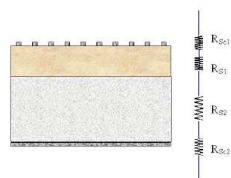
25



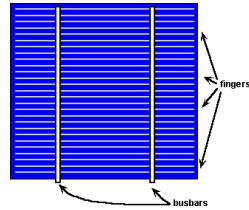
$$I = I_L - I_0 \left( \exp \frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Per aumentare la corrente fotogenerata, occorre che siano:

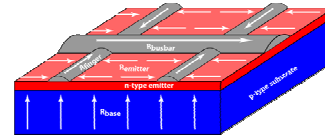
- $R_s$  molto piccola
- $R_{sh}$  molto grande



Liceo Scientifico Severi



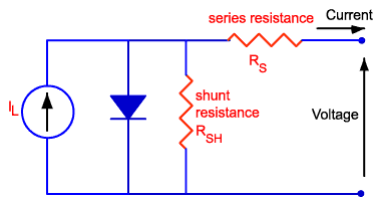
A. Di Bartolomeo



Maggio 2008

## Resistenza in serie ed in parallelo

26



Le resistenze riducono il FF

$$I_{total} = I_L - I_0 (e^{qV/kT} - 1)$$

$$I = I_L - I_0 \exp \left[ \frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - \frac{V + IR_s}{R_{SH}}$$

- Resistenza in serie dovuta attraversamento dell'emettitore e della base, alla resistenza di contatto tra i contatti metallici ed il silicio, alla resistenza dei contatti metallici sopra e sotto.

- **La resistenza in serie  $R_s$  riduce la corrente.**

- La resistenza in parallelo è dovuta a difetti di fabbricazione (giunzioni non perfette)

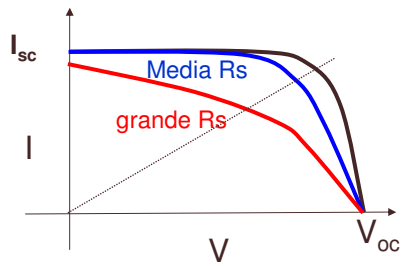
- **La resistenza in parallelo  $R_{sh}$  riduce il voltaggio di uscita**

Liceo Scientifico Severi

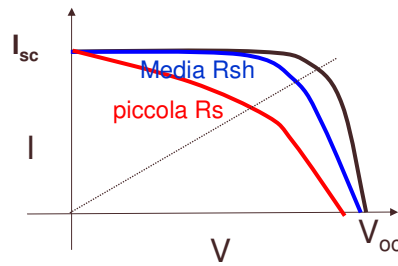
A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

## Effetto delle resistenze in serie e in parallelo

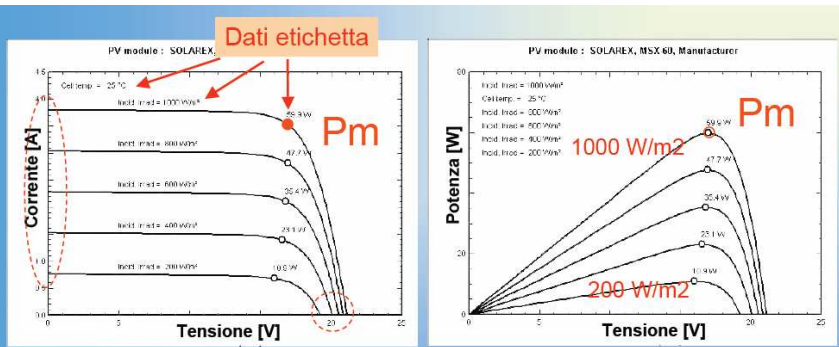


Effetto della resistenza in serie  
Rs



Effetto della resistenza in parallelo  
Rsh

## Variazioni di irraggiamento

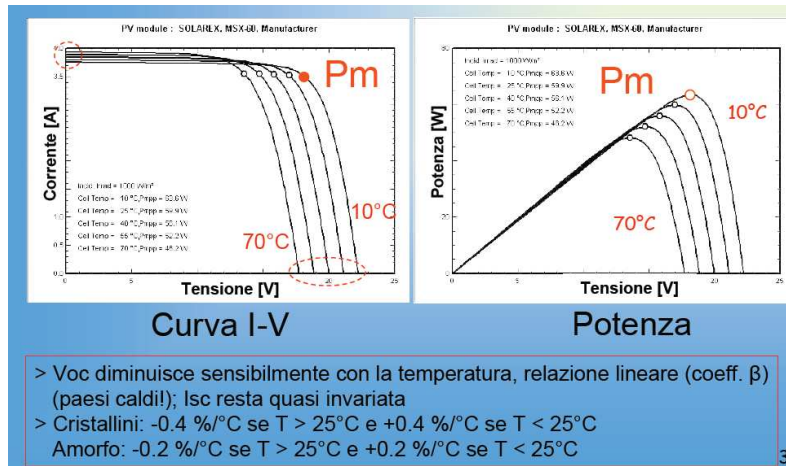


Curva I-V

Potenza

- > Isc direttamente proporzionale all'irraggiamento G; Voc influenzata minimamente
- > Voc già elevata a piccoli irraggiamenti (!)
- > Risultato: se G cresce anche Pm aumenta

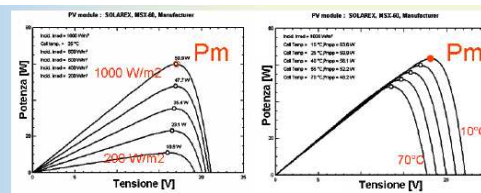
## Variazioni della temperatura (c-Si)



31

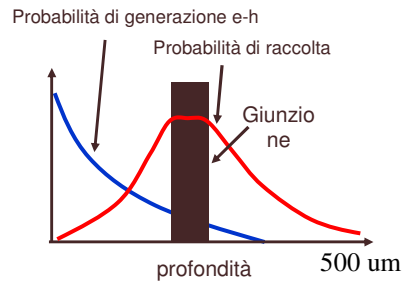
## Fattori che influenzano il funzionamento di una cella solare

- Irraggiamento
- Temperatura (!)
- Area
- Spettro della radiazione solare
- Angolo d'incidenza, riflessioni
- ...



# Dove deve essere la giunzione?

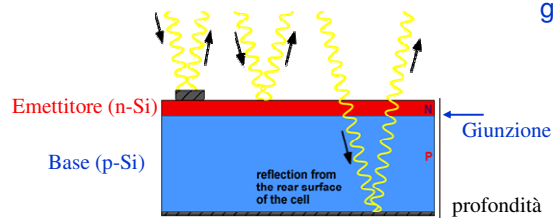
31



Dove deve essere collocata la giunzione in una cella solare?

Risposta:

la giunzione deve essere vicino alla superficie dove entra la luce (in genere meno di 1 um).



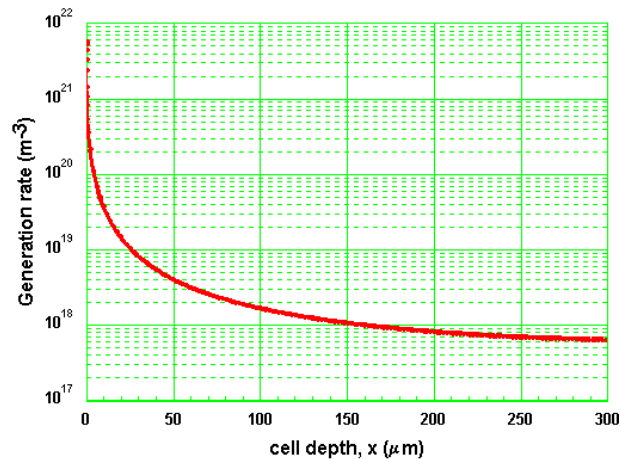
Liceo Scientifico Severi

A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

# Generazione in funzione della profondità

32



Il rate di generazione è più elevato vicino alla superficie, nelle celle solari al Si.

Liceo Scientifico Severi

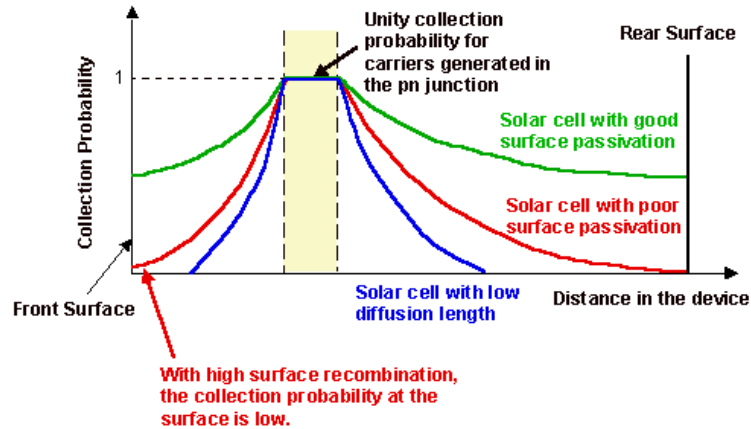
A. Di Bartolomeo

Maggio 2008



## Probabilità di raccolta della carica fotogenerata

33

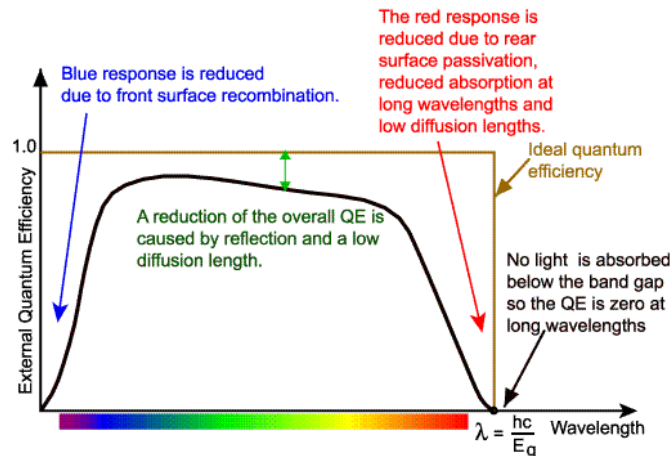


La probabilità di raccolta della carica fotogenerata dipende principalmente da:

- stato delle superfici (passivate o meno)
- lunghezza di diffusione nella base

## Efficienza Quantica (EQ)

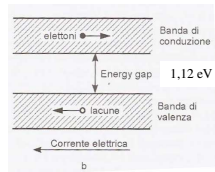
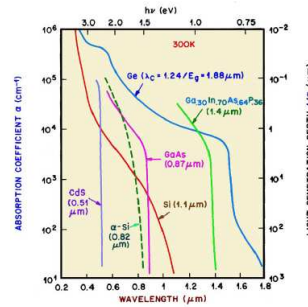
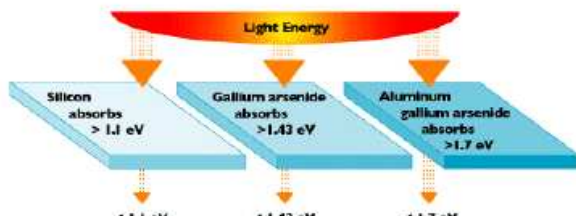
34



L'efficienza quantica (QE) è il rapporto tra il numero di elettroni forniti dalla cella e il numero di fotoni di una data energia incidenti di essa.

# Assorbimento di luce da parte di diversi semiconduttori

35



Se  $h\nu < 1,12 \text{ eV}$  il fotone non viene assorbito, quindi non produce coppie; il Si è trasparente.

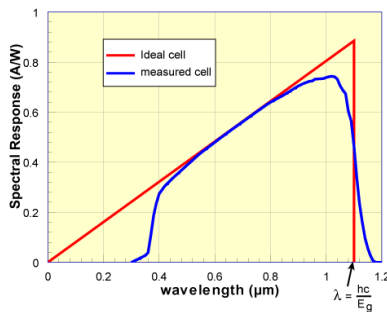
$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$   
 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$   
 $\nu$ : frequenza della luce  
 $\lambda$ : lung. d'onda della luce

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

# Risposta spettrale (SR)

36

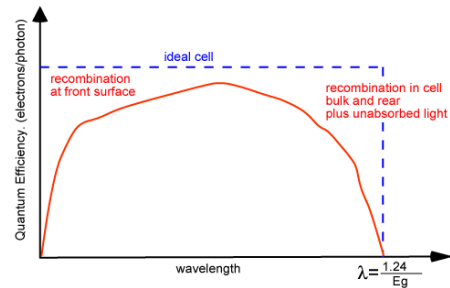


- E' il rapporto tra la corrente generata e la potenza incidente sulla cella in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente.
- Fotoni di grande energia producono una coppia e-h; il surplus di energia (quella oltre il gap) non viene utilizzata per produrre corrente ma contribuisce a scaldare la cella ed è energia persa.
- $SR = QE (q\lambda/hc)$

## Perdite di corrente e tensione dovute alla ricombinazione

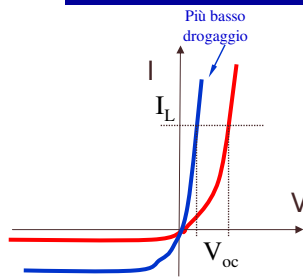
37

- I portatori devono essere generati entro una lunghezza di diffusione dalla giunzione per essere in grado di diffondere fino alla giunzione senza ricombinarsi
- Nel caso di un sito di elevata ricombinazione localizzato (come una superficie non passivata o il confine di un grano nei device policristallini), i portatori devono essere generati più vicini alla giunzione del sito di ricombinazione.
- Poiché la luce blu ha un alto coefficiente di assorbimento ed è assorbita vicino alla superficie, è improbabile che la luce blu generi portatori minoritari che possono essere raccolti alla giunzione a meno che la superficie non sia passivata
- Similmente una elevata ricombinazione alla superficie posteriore, riduce il numero di portatori generati dalla luce infrarossa

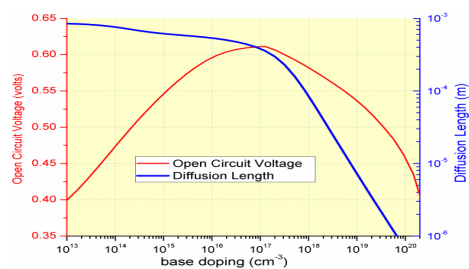


## Drogaggio delle celle solari

38



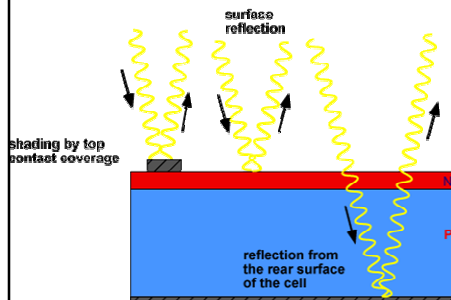
Il diodo corrispondente alla linea blu ha una maggiore corrente di saturazione inversa, ciò può essere dovuto a un diverso materiale o a un più basso livello di drogaggio.



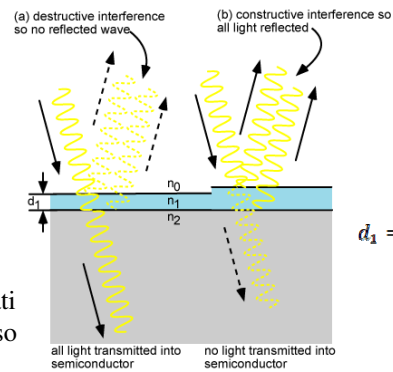
Compromesso per la concentrazione di drogaggio:

- Elevato drogaggio riduce la corrente di ricombinazione (corrente del diodo) e quindi aumenta  $V_{oc}$
- Elevato drogaggio riduce la lunghezza di diffusione per i portatori fotogenerati e quindi riduce la corrente fotogenerata e di conseguenza  $V_{oc}$

## Perdite ottiche della cella solare



Stessa cella con strati antiriflesso di diverso spessore

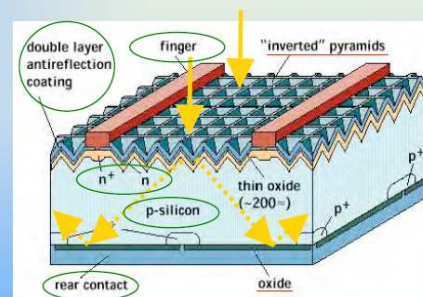


$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1}$$

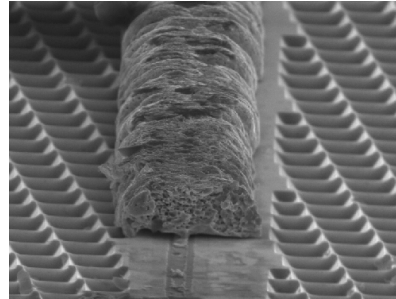
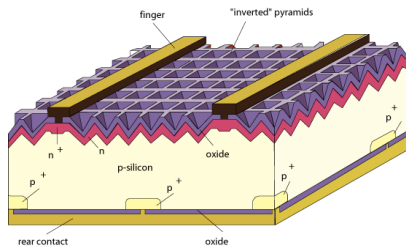
## Esempio di cella ad alta efficienza

- Struttura piramidale (fronte della cella)
- Strato riflettente (retro della cella)
- Assorbenza e Riflettanza  $\uparrow$

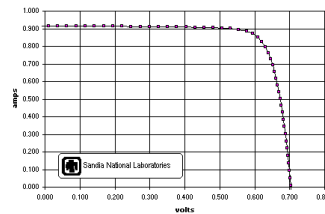
=>  $\uparrow$  efficienza cella FV



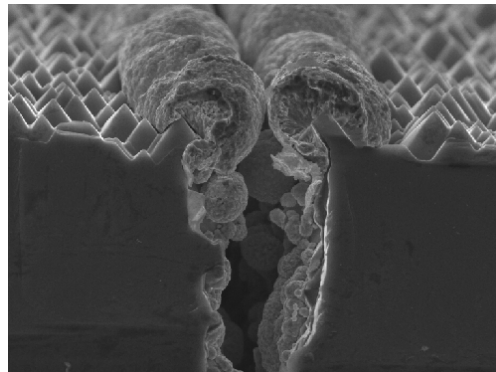
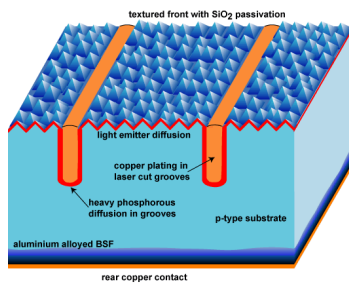
## Cella solare testurizzata



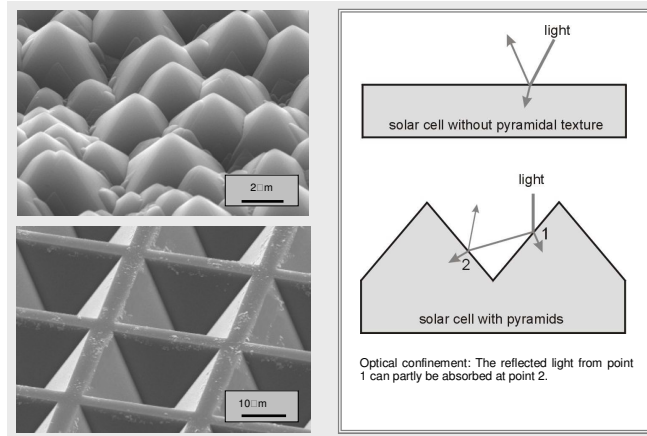
|             |                   |
|-------------|-------------------|
| Area:       | 22cm <sup>2</sup> |
| Efficiency: | 23.5%             |
| Voc:        | 703 mV            |
| Isc:        | 914mA             |
| Jsc:        | 41.3mA            |
| Vmp:        | 600mV             |
| FF:         | 0.81              |
| Imp:        | 868 mA            |



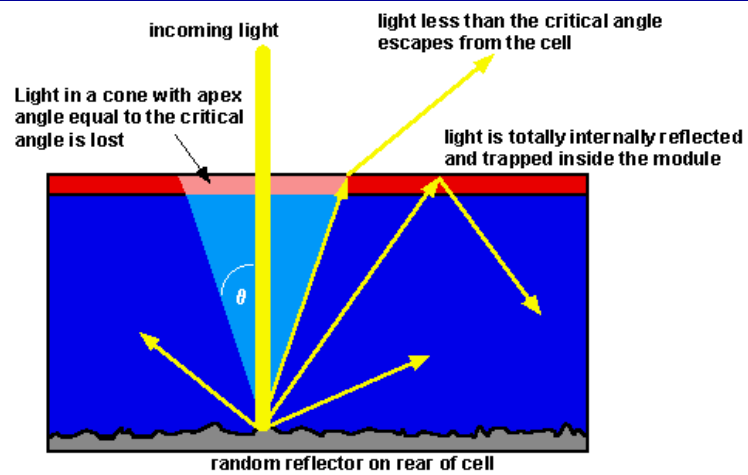
## Cella solare testurizzata



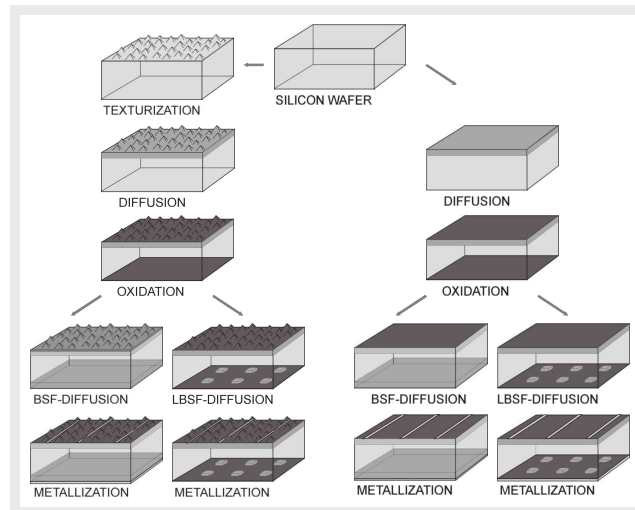
## Celle testurizzate



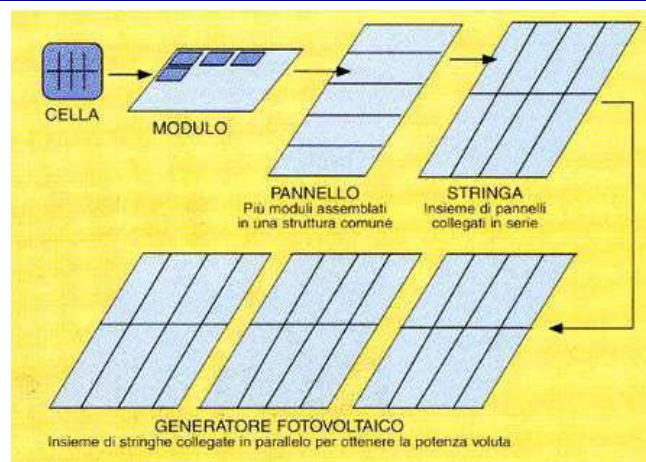
## Riflettori posteriori lambertiani



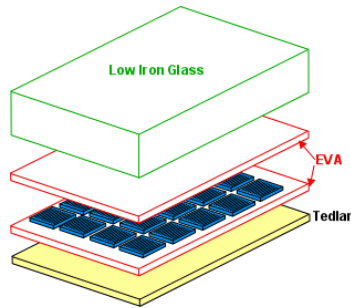
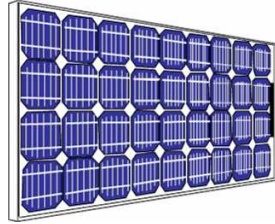
## Fabbricazione delle celle solari



## Cella –Modulo-Pannello-Stringa Generatore fotovoltaico

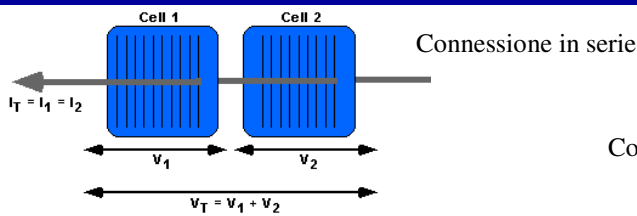


# Struttura del modulo

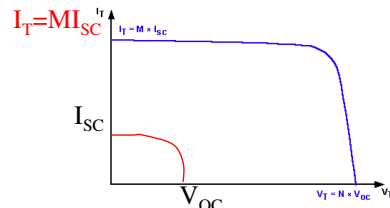


- **Vetro anteriore:** (3-4 mm) vetro a basso contenuto di ferro, aumenta la resistenza meccanica del modulo, protegge le celle e garantisce max trasparenza (90%)
- **E.V.A.:** è un dielettrico che evita l'ingiallimento e garantisce un contatto diretto tra celle e vetro
- **Tedlar o vetro posteriore:** aumenta l'impermeabilità all'ossigeno e all'acqua

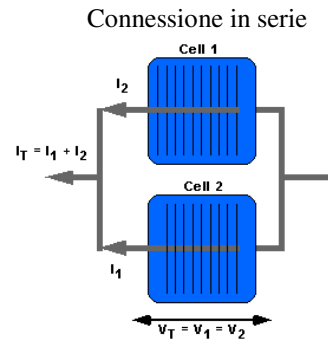
# Connessione in serie delle celle



M celle in serie:



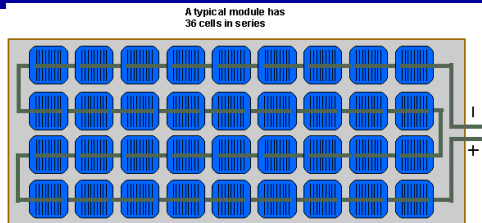
N celle in serie:  $V_T = N V_{OC}$





## Esempio di collegamento in serie di 36 celle in un modulo e di collegamento in parallelo di moduli

49



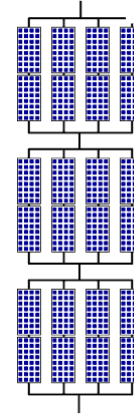
### Singola cella:

- $V = 0,6 \text{ V}$
- 
- $J = 30 \text{ mA/cm}^2$
- $A = 100 \text{ cm}^2$
- $I = 3 \text{ A}$

### Modulo:

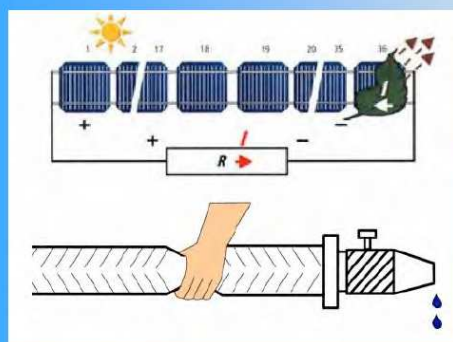
- $V = 21 \text{ V}$
- $V(P_{\max}) = 16-18 \text{ V}$

36 celle sono sufficienti a produrre la potenza per caricare una batteria di 12 V



## Collegamento in serie: problema delle celle/moduli in ombra

50



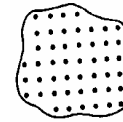
La cella meno efficiente limita tutte le altre !

Mismatch:  
 $P_{\max} \text{ modulo} < \sum P_{\max} \text{ celle}$

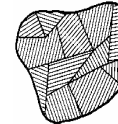
## Le 3 principali tecnologie sul mercato

### Tecnologia cristallina

|                                   |                      |                 |  |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------|--|
| Silicio<br><b>monocristallino</b> | Single crystal<br>Si | sc-Si<br>(m-Si) |  |
| Silicio<br><b>policristallino</b> | Multi crystal<br>Si  | mc-Si<br>(p-Si) |  |




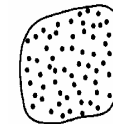
Crystalline



Polycrystalline

### Tecnologia film sottile

|                          |                 |      |  |
|--------------------------|-----------------|------|--|
| Silicio<br><b>amorfo</b> | Amorphous<br>Si | a-Si |  |
|--------------------------|-----------------|------|--|



Amorphous

|                               |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| Silicio monocristallino       | $\eta = 13-17 \%$ |
| Silicio policristallino       | $\eta = 12-14 \%$ |
| Film sottili (silicio amorfo) | $\eta = 6-10 \%$  |

## Le 3 principali tecnologie Thin Film (a film sottile)

- a-Si silicio amorfo
- CIS diseleniuro di indio e di rame
- CdTe telluro di cadmio



## Confronto tra tecnologie (1/2)

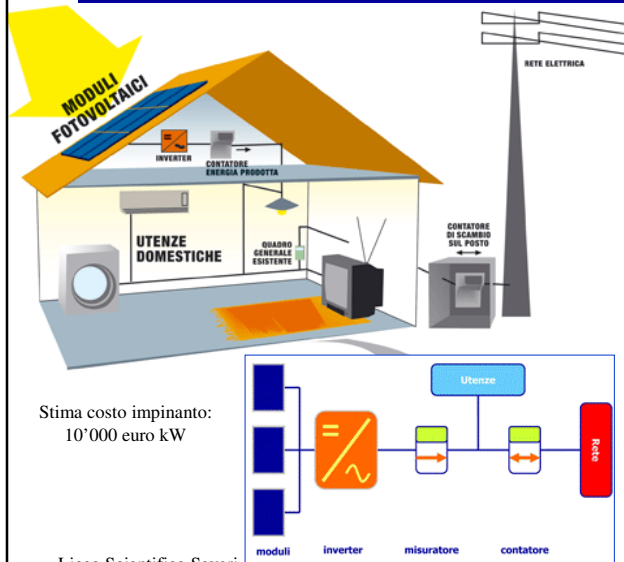
| Tecnologia          | m-Si  | p-Si   | a-Si  |
|---------------------|---|--|---|
| $\eta$ cella tipico | 13 – 16 %   | 11 – 13 %  | 4 – 6 %<br>7 – 10 %   |
| <b>Vantaggi</b>     | - $\eta$ elevato<br>- $\eta$ stabile<br>- tecnologia affidabile | - costo<br>- meno delicati (hot spot)<br>- miglior occupazione | - costo<br>- fabbricazione<br>- meno materiale<br>- buon $\eta$ a G ↓ e luce art.<br>- flessibile<br>- coeff. Voc. f(T) |
| <b>Svantaggi</b>    | - costo<br>- E grigia<br>- quantità materiale<br>- complesso    | - complesso<br>- sensibile alle impurità                       | - $\eta$ basso, che scende<br>- degrado iniziale  |

## Confronto tra tecnologie (2/2)

| Tecnologia          | GaAs<br>arseniuro di Gallio         | CdTe<br>Tellurio di cadmio          | CdS/CuS<br>solfuro di cadmio e di rame | CuIn Sez.<br>seleniuro di rame e di indio (EnS) |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---|
| $\eta$ cella tipico | 22 % (labo)                         | 10 %                                | 5 %                                    | 12 % (labo)                                     |
| <b>vantaggi</b>     | - resiste a Televate<br>- concentr. | - gap ideale                        | - fabbricazione                        | - molto stabile                                 |
| <b>svantaggi</b>    | - tossicità<br>- disp. di materiale | - tossicità<br>- disp. di materiale | - tossicità<br>- sensibile all'umidità | - tossicità (Cd)                                |

## Impianto fotovoltaico connesso alla rete (grid connected)

55



Liceo Scientifico Severi

A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

Un impianto fotovoltaico standard connesso alla rete è costituito dai componenti evidenziati nello schema in basso. In figura si possono distinguere i diversi dispositivi che rendono funzionale l'impianto:

**Generatore fotovoltaico:** è costituito dal collegamento di moduli fotovoltaici ed è in grado di trasformare l'irraggiamento solare in corrente elettrica continua.

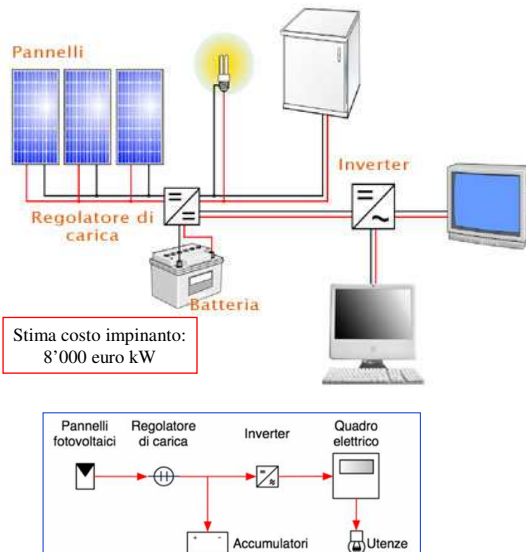
**Convertitore statico DC/AC:** converte la corrente elettrica continua prodotta dai moduli in corrente elettrica alternata, quella cioè, normalmente usata in ogni edificio. Il convertitore è anche in grado di allineare la corrente elettrica alla frequenza di rete normalmente 50 Hz e alla tensione di funzionamento (230V monofase, 400V trifase).

**Quadro elettrico:** è l'elemento di protezione in lato continuo ed in lato alternato dell'impianto. E' costituito prevalentemente da scaricatori di tensione e da interruttori automatici.

**Contatori:** tipicamente sono installati due contatori; il primo monitora tutta la corrente prodotta dall'impianto fotovoltaico. Questo contatore, in linea di principio, è installato subito a valle dell'inverter. Al contatore è associato il meccanismo di finanziamento statale. Il secondo contatore sostituisce quello esistente della rete di distribuzione: è bidirezionale per cui è in grado di fare un bilancio tra l'energia immessa dall'impianto verso la rete elettrica, e quella prelevata dalla rete elettrica verso l'utenza. A questo secondo contatore è associato il risparmio sulla bolletta elettrica

## Impianto fotovoltaico stand-alone

56



Liceo Scientifico Severi

A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

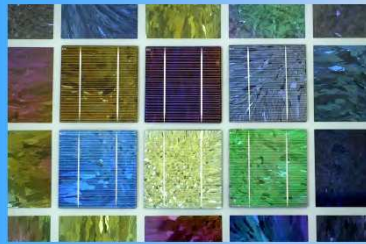
Si ricorre a questa tipologia di impianto solamente quando il fotovoltaico diventa un'esigenza. Alcuni esempi possono essere: baite montane, camper, barche, case isolate e non raggiunte dalla rete elettrica. Inoltre fanno parte di questa tipologia di impianto anche tutte quelle applicazioni quali ad esempio l'illuminazione della segnaletica stradale o l'illuminazione nei giardini domestici. In questo caso lo schema di riferimento diventa quello di figura.

- Campo fotovoltaico, deputato a raccogliere energia mediante moduli fotovoltaici disposti opportunamente a favore del sole;
- Regolatore di carica, deputato a stabilizzare l'energia raccolta e a gestirla all'interno del sistema (stacca il campo fotovoltaico in caso di voltaggio inferiore a quello richiesto o in caso di batteria carica)
- Batteria di accumulo, deputata a conservare l'energia raccolta in presenza di irraggiamento solare per permetterne un utilizzo differito da parte dei carichi elettrici.

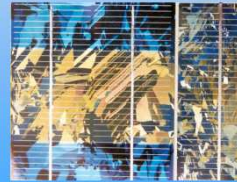
In questa configurazione di impianto, i carichi elettrici (ivi compreso un eventuale inverter che serva utilizzi in corrente alternata) sono direttamente connessi al regolatore di carica, che funge da vero e proprio supervisore di sistema.

Il campo fotovoltaico impiegato per gli impianti ad isola è ottimizzato per uno specifico voltaggio di sistema, deciso solitamente in fase di progettazione del sistema stesso. I voltaggi più utilizzati sono 12, 24 o più raramente 48 V.

## Celle colorate

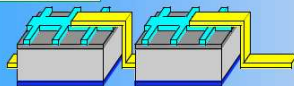


Ogni cella ha uno **strato antiriflesso** per limitare le perdite. Mediante questo strato si possono ottenere **vari effetti colorati** (ma il rendimento diminuisce del **15-30% !**).

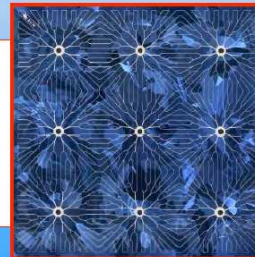
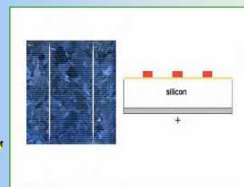
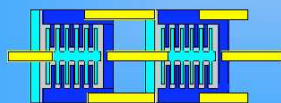
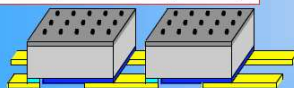


## Celle con contatti solo sul retro

Standard:




Pin-Up Module (PUM):

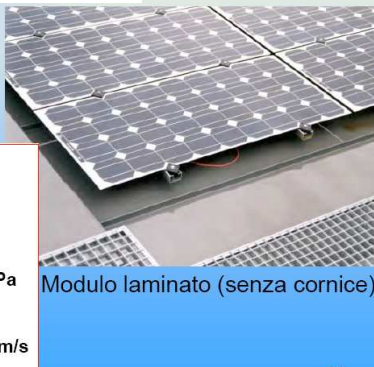


## Moduli cristallini: caratteristiche fisiche

59



Tedlar / EVA / Vetro



Modulo laminato (senza cornice)

Condizioni limite di utilizzo tipiche (specificate dal produttore per ogni tipologia):

- >  $T_{amb}$  dove il modulo può operare:  $-40 / +50$  °C
- > Escursione termica sopportata:  $-40 / +90$  °C
- > Carico massimo distribuito applicabile: 5.400 Pa
- > Umidità relativa dell'aria: 0 – 100 %
- > Resistenza alla grandine: 25 mm diametro, 23 m/s

## Celle e moduli semitrasparenti

60

Moduli semitrasparenti

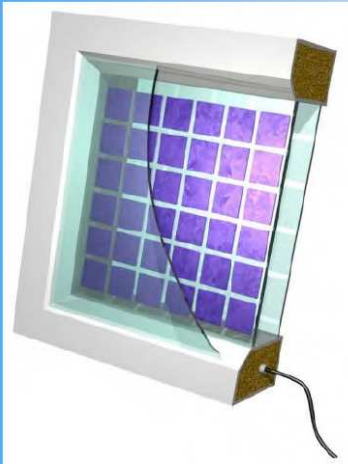


Vetro / EVA / Vetro

Celle semitrasparenti



## Celle semitrasparenti in finestre a doppio vetro



### Caratteristiche:

- Isolamento termico
- Filtraggio di luce

### Applicazioni:

- Facciate sud
- Tetti

## Moduli *thin film*

### Senza vetro



Substrato: acciaio  
Copertura: polimero  
(non vetro)



Flessibile

### Semitrasparente



Substrato: vetro  
Copertura: vetro

## Moduli fotovoltaici



### Primi moduli (per sistemi autonomi)

36 celle in serie (4x9 o 3x12)  
40-50 Watt  
0.5 m<sup>2</sup>

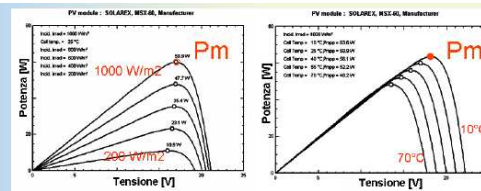
### I moduli oggi :

1. Minimoduli o tegole solari (2-12 celle / 2-50 Watt)
2. Tradizionali allacciati alla rete (100-200 Watt)  
(no. celle: multipli di 36)
3. Per facciate (100-300 Watt)  
(no. celle: variabile, secondo caratteristiche facciata)



## Fattori che influenzano il funzionamento di un modulo fotovoltaico

- Irraggiamento
- Temperatura (!)
- Area
- Spettro della radiazione solare
- Angolo d'incidenza, riflessioni
- ...



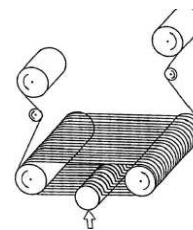
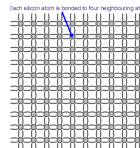
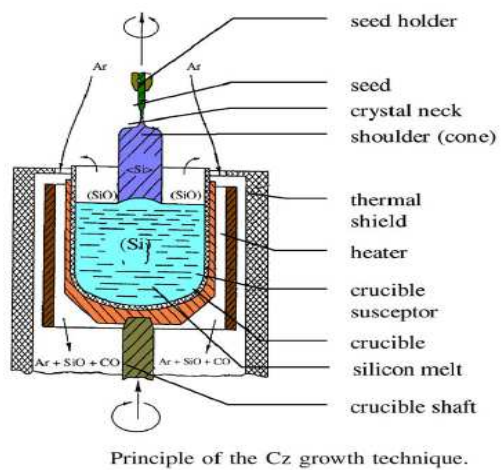


## Silicio di partenza



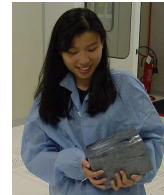
Spesso materiale di rifiuto dell'industria microelettronica

## Silicio cristallino



# Silicio multicristallino

67



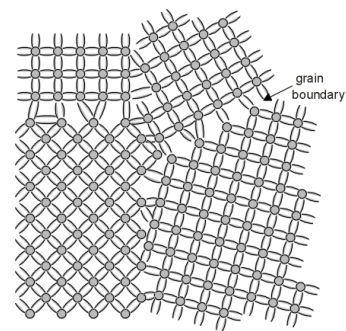
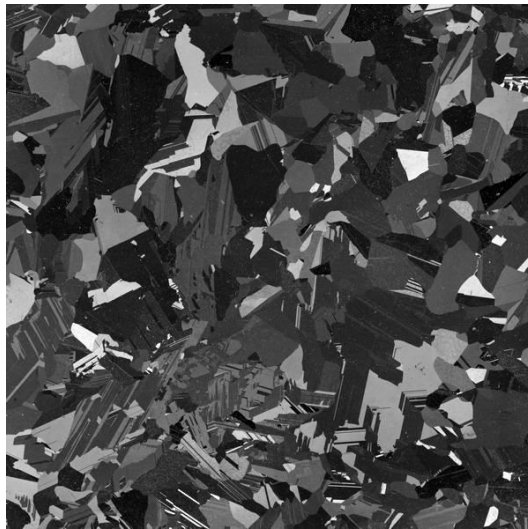
Liceo Scientifico Severi

A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

# Superficie wafer silicio multicristallino

68

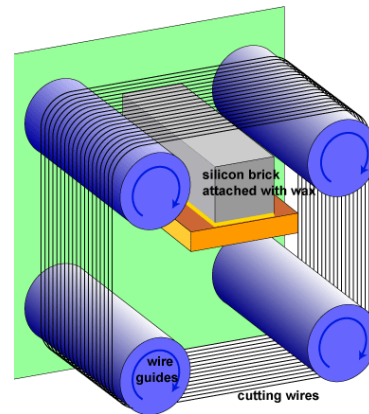


Liceo Scientifico Severi

A. Di Bartolomeo

Maggio 2008

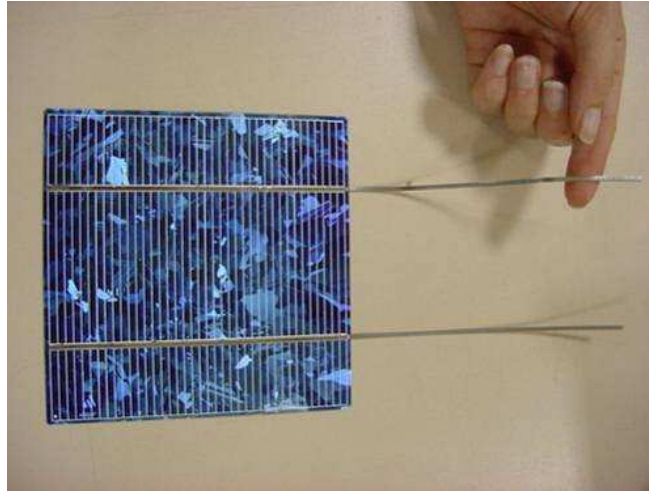
## Taglio del brick di silicio in wafer



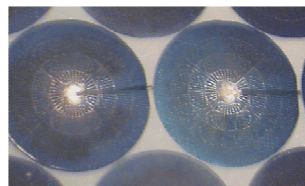
## Wafer ricoperti con atiriflesso



## Prodotto finale: la cella



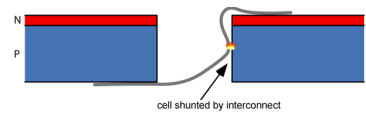
## Meccanismi di degrado delle celle



Degrado del coating antiriflesso causato da vapor acqueo.

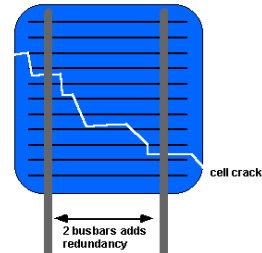
In genere gli impianti fotovoltaici sono garantiti per 20-25 anni

Rottura della cella

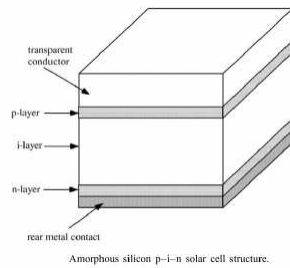


Corto circuito delle interconnessioni.

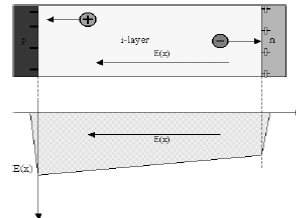
Cell busbars hold the cell together even with a crack right across the cell



## Celle p-i-n

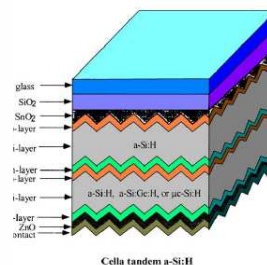
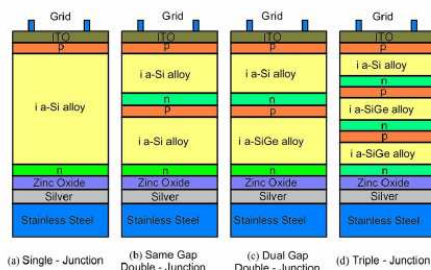


Amorphous silicon p-i-n solar cell structure.

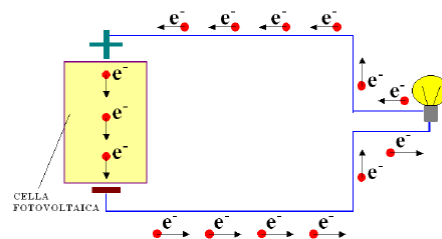


- La zona intrinseca (i) è svuotata di portatori.
- La cella p-i-n è simile a una cella p-n, ma ha zona di svuotamento più estesa e
- Questo favorisce la formazione e la raccolta di coppie e-h

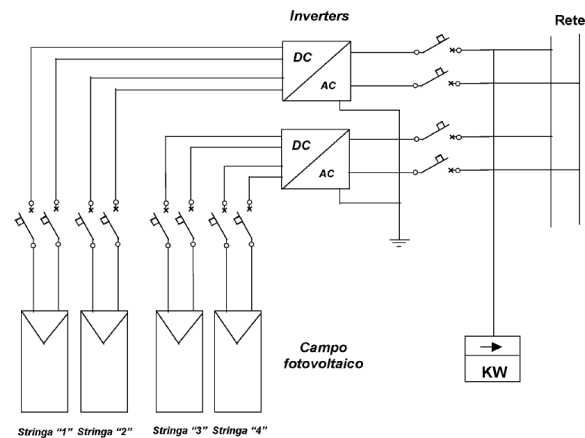
## Celle P-I-N e celle a giunzione multipla



# Materiale di riserva



## Impianto fotovoltaico connesso in rete



## Costi

Per poter ottenere un costo per kWh prodotto da un impianto fotovoltaico paragonabile al kWh acquistato dalla rete, è necessario intervenire con contributi finanziari percentualmente molto elevate (superiori al 70-80%).

Un progetto semplice ma che si è rivelato estremamente efficace per promuovere il settore del solare fotovoltaico è stato messo a punto in Germania. Infatti è stato avviato nei primi mesi del 2000 un programma nazionale in cui:

1. Non vengono dati contributi a fondo perduto.
2. Sono previsti invece finanziamenti a tasso agevolato della durata di 10 anni.
3. Le agevolazioni sono collegate all'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico: infatti ogni kWh prodotto è venduto ad una Tariffa di € 0,5 (circa 3 volte il costo di acquisto del kWh dalla rete).

Tale programma ha permesso la realizzazione di impianti fotovoltaici concepiti innanzi tutto come **investimento**. In secondo luogo ha permesso la realizzazione di impianti ad elevata efficienza e di elevata qualità in modo da ottenere da essi la maggior produzione possibile.

Infine gli utenti sono stati stimolati ad una puntuale ed efficiente manutenzione.