

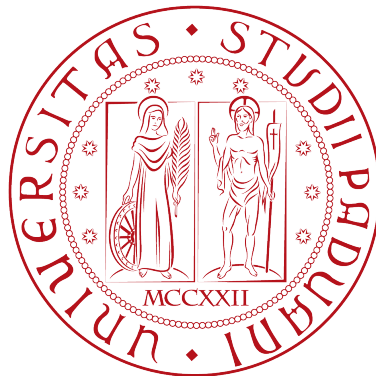
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

---

FACOLTA' DI INGEGNERIA  
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Informazione

**Il futuro dell'energia  
rinnovabile:  
il fotovoltaico a concentrazione**

Tesi di Laurea Triennale



**Relatore:**  
Chiar.mo Prof.  
Gaudenzio Meneghesso

**Laureando:**  
Christian Barbon

**Anno Accademico 2012/2013**

30 settembre 2013



*Alla mia famiglia,  
che mi ha sempre  
sostenuto*



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>I La fisica alla base del fotovoltaico</b>	<b>10</b>
<b>1 La radiazione solare</b>	<b>11</b>
1.1 Spettro elettromagnetico e costante solare . . . . .	11
1.2 Radiazione diretta, diffusa e riflessa . . . . .	12
<b>2 Bande di energia e classificazione dei materiali</b>	<b>14</b>
<b>3 I semiconduttori</b>	<b>16</b>
3.1 Semiconduttori intrinseci . . . . .	16
3.2 Semiconduttori estrinseci - Drogaggio . . . . .	17
3.2.1 Drogaggio di tipo n . . . . .	17
3.2.2 Drogaggio di tipo p . . . . .	18
<b>4 La giunzione p-n: il diodo</b>	<b>20</b>
4.1 Descrizione e funzionamento . . . . .	20
4.2 Polarizzazione e caratteristica corrente-tensione . . . . .	21
<b>5 L'effetto fotovoltaico</b>	<b>23</b>
<b>II Il fotovoltaico: le celle solari</b>	<b>26</b>
<b>6 La cella fotovoltaica</b>	<b>27</b>
6.1 Struttura e funzionamento . . . . .	27
6.2 Modello matematico . . . . .	28
<b>7 I tipi di celle</b>	<b>32</b>
7.1 Celle in silicio cristallino . . . . .	33
7.1.1 Celle in silicio monocristallino . . . . .	33
7.1.2 Celle in silicio policristallino . . . . .	33
7.2 Celle Thin-Film (a film sottile) . . . . .	34

## INDICE

---

7.2.1	Celle in silicio amorfo . . . . .	36
7.2.2	Celle in Telleruro di cadmio (CdTe) . . . . .	36
7.2.3	Celle in Diseleniuro di rame indio gallio (CIGS) . . . . .	37
7.2.4	Celle multi-giunzione . . . . .	38
<b>8</b>	<b>Efficienza</b>	<b>40</b>
<b>III</b>	<b>Il fotovoltaico a concentrazione</b>	<b>42</b>
<b>9</b>	<b>Descrizione e funzionamento</b>	<b>43</b>
9.1	Il ricevitore . . . . .	44
9.1.1	Ricevitore con celle dicroiche . . . . .	45
9.1.2	Ricevitore con celle multi-giunzione . . . . .	46
9.1.3	Dissipazione del calore . . . . .	46
9.2	Le ottiche di focalizzazione . . . . .	47
9.2.1	Ottiche difrattive . . . . .	47
9.2.2	Ottiche riflettive . . . . .	49
9.3	L'inseguitore solare . . . . .	51
	<b>Conclusioni</b>	<b>54</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>55</b>

# Elenco delle figure

1.1	Spettro elettromagnetico . . . . .	11
1.2	Radiazione solare . . . . .	12
2.1	Tipi di materiali . . . . .	14
3.1	Drogaggio di tipo n . . . . .	18
3.2	Drogaggio di tipo p . . . . .	18
4.1	Giunzione p-n e grafici . . . . .	20
4.2	Caratteristica i-v del diodo . . . . .	22
5.1	Effetto fotovoltaico . . . . .	23
6.1	Struttura di una cella solare a singola giunzione . . . . .	27
6.2	Schema elettrico equivalente di una cella . . . . .	28
6.3	Caratteristica i-v della cella . . . . .	29
6.4	Corrente e potenza erogata dalla cella . . . . .	30
6.5	Caratteristica i-v cella in funzione di radiazione e temperatura . . . . .	31
7.1	Moduli fotovoltaici cristallini . . . . .	34
7.2	Moduli a film sottile . . . . .	35
7.3	Cella in CdTe . . . . .	37
7.4	Cella in CIGS . . . . .	37
7.5	Cella a tripla giunzione . . . . .	38
8.1	Efficienza delle celle . . . . .	41
9.1	Disposizione celle nel ricevitore . . . . .	45
9.2	Ricevitore con celle dicroiche . . . . .	45
9.3	Prototipo di un sistema fotovoltaico ad alta concentrazione . . . . .	47
9.4	Sistema point focus . . . . .	48
9.5	Sistema con lenti dome-shaped . . . . .	49
9.6	Sistema line-focus . . . . .	49
9.7	Esempi di ottiche riflesse . . . . .	50
9.8	Concentratore solare di tipo dense-array . . . . .	50

## ELENCO DELLE FIGURE

---

9.9	Concentratore solare di tipo micro-dish . . . . .	51
-----	---	----



# Introduzione

Quella solare è sicuramente la fonte di energia rinnovabile più importante attualmente in via di sviluppo. In quanto tale, è una forma di energia derivante da una risorsa naturale, il Sole, che «si rigenera almeno alla stessa velocità con cui viene consumata»<sup>1</sup> ed ha la peculiarità di essere un'energia pulita perché non immette nell'atmosfera sostanze nocive o che alterano il clima, come ad esempio il biossido di carbonio ( $CO_2$ ) che viene prodotto dall'utilizzo dei combustibili fossili. E' proprio per il degrado creato da questi ultimi all'ambiente e per il continuo innalzarsi del loro prezzo, che diventa di fondamentale importanza per il futuro lo sviluppo in larga scala della tecnologia fotovoltaica per la produzione di energia.

L'effetto fotovoltaico venne osservato per la prima volta nel 1839 da Alexandre Edmond Becquerel quando si accorse della differenza di potenziale che si generò dall'azione della luce su un elettrodo immerso in una soluzione elettrolitica. La prima cella solare venne costruita in selenio e oro nel 1883 da Charles Fritts. La teoria fisica che spiega l'effetto fotovoltaico venne pubblicata nel 1905 da Albert Einstein. Negli anni '50 i laboratori Bell cominciarono la produzione di celle solari per attività aerospaziali. Dagli anni '70 in poi ci fu un progressivo aumento dell'efficienza delle celle fino ad arrivare al 37,9% per le celle a tripla giunzione attuali.

Nella prima parte di questo elaborato introdurremo i concetti fisici fondamentali sui quali si basa la tecnologia fotovoltaica. Parleremo della radiazione solare e della classificazione dei materiali, soffermandoci in particolare modo sui semiconduttori, i tipi di drogaggio, il diodo e spiegando infine l'effetto fotovoltaico.

Nella seconda parte analizzeremo la struttura ed il funzionamento di una cella fotovoltaica semplice, per poi descrivere i tipi di celle più importanti sviluppate e in via di sviluppo.

Nella terza ed ultima parte descriveremo il funzionamento del fotovoltaico a concentrazione soffermandoci sulle varie componenti che compongono un sistema di questo tipo.

---

<sup>1</sup>Y. Cengel, M. Boles. Thermodynamics. An Engineering Approach



## Parte I

# La fisica alla base del fotovoltaico

# Capitolo 1

## La radiazione solare

### 1.1 Spettro elettromagnetico e costante solare

La radiazione solare è l'energia radiante emessa nello spazio interplanetario dal Sole, generata a partire dalle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel nucleo solare e che producono radiazioni elettromagnetiche a varie frequenze o lunghezze d'onda, le quali si propagano poi nello spazio alle velocità tipiche di queste onde, trasportando con sé energia solare.

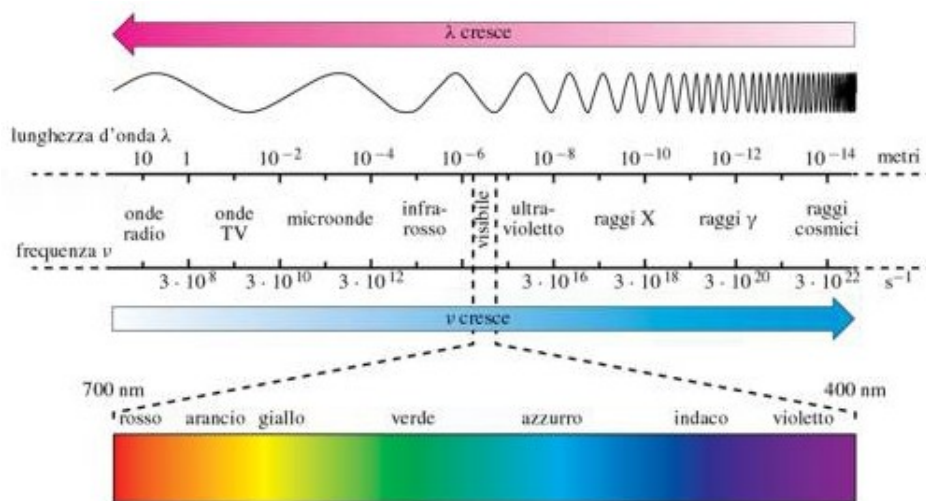


Figura 1.1: Spettro elettromagnetico

Questa energia si propaga simmetricamente nello spazio fino ad investire la terra, in particolare la fascia esterna dell'atmosfera terrestre.

La potenza irradiata complessivamente dal sole è pari ad oltre  $60.000 \text{ kW/m}^2$ ; questa potenza decresce via via che aumenta la distanza dal sole, e dopo aver percorso i circa 150 milioni di km che separano la terra dal sole, assume un valore molto più ridotto: tale valore prende il nome di "costante

solare”, che si assume pari a  $1.367 \text{ kW}/\text{m}^2$ . La costante solare è da intendersi come un valore medio di riferimento perché la potenza che raggiunge la fascia esterna della atmosfera terrestre in realtà oscilla, principalmente a causa della variazione periodica della distanza terra-sole.

### 1.2 Radiazione diretta, diffusa e riflessa

Sulla superficie terrestre si registra un valore della potenza inferiore rispetto alla costante solare a causa dei fenomeni di assorbimento, riflessione, rifrazione e diffusione che hanno luogo nel percorso attraverso l’atmosfera; il valore massimo della radiazione disponibile istantaneamente al suolo si assume pari a circa  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ .

La radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre si distingue in:

- diretta, che colpisce una qualsiasi superficie con un unico e ben definito angolo di incidenza;
- diffusa, che incide invece su tale superficie con vari angoli;
- riflessa dal terreno, da specchi d’acqua o da altre superfici.

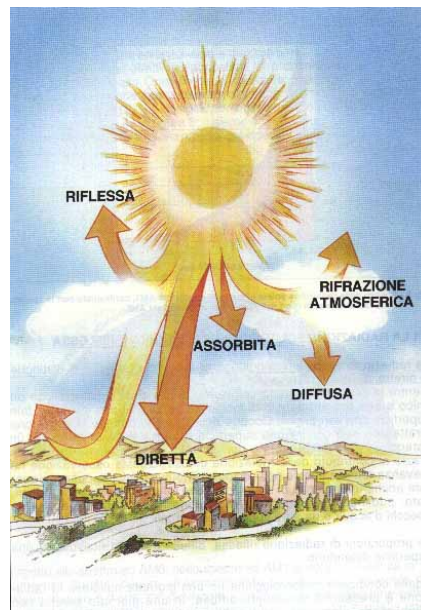


Figura 1.2: *Componenti della radiazione solare incidente sulla superficie terrestre*

Le proporzioni di radiazione diretta, diffusa e riflessa ricevuta da una superficie dipendono da vari fattori:

## Capitolo 1. La radiazione solare

---

- le condizioni meteorologiche: In una giornata nuvolosa la radiazione è pressoché totalmente diffusa mentre in una giornata serena con clima secco predomina la componente diretta, che può arrivare fino al 90% della radiazione totale;
- l'inclinazione e orientamento della superficie: una superficie orizzontale riceve la massima radiazione diffusa e la minima riflessa; la componente riflessa aumenta al crescere dell'inclinazione;
- la presenza di elementi riflettenti: Il contributo maggiore alla riflessione è dato dalle superfici chiare. Infatti la radiazione riflessa aumenta in inverno, per effetto della presenza di neve, e diminuisce in estate, per effetto di assorbimento di colori scuri quali quello dell'erba o del terreno.

## Capitolo 2

# Bande di energia e classificazione dei materiali

La principale caratteristica dei solidi è la distribuzione dei livelli energetici possibili in bande di energia separate da intervalli proibiti.

Nei conduttori, di solito, l'ultima banda (detta banda di conduzione) non è completamente riempita e quindi esistono livelli di energia non occupati contigui a quelli occupati. Gli elettroni delle bande inferiori, che sono tutte piene, non acquistano energia e non influiscono nel processo di conduzione. L'ultima banda piena si chiama banda di valenza.

Non sono conduttori i solidi refrattari in cui l'ultima banda contenente elettroni è completamente piena e non è sovrapposta alla banda successiva. Questa è la configurazione che caratterizza gli isolanti e i semiconduttori. L'ampiezza della zona proibita, ovvero quella che separa banda di conduzione e banda di valenza, è definita banda proibita (band gap).



Figura 2.1: Bande di energia dei materiali isolanti, semiconduttori e conduttori

## Capitolo 2. Bande di energia e classificazione dei materiali

---

Con questo parametro è possibile definire i semiconduttori come quei solidi la cui banda proibita è abbastanza piccola da far sì che, ad una temperatura inferiore al punto di fusione, si possa osservare statisticamente una conduzione non trascurabile (comunque inferiore a quella dei conduttori, ma superiore a quella degli isolanti) dovuta al passaggio dei portatori di carica dalla banda di valenza (piena) a quella di conduzione per eccitazione termica.

È possibile classificare i materiali anche in base al loro valore di resistività elettrica. La resistività elettrica, anche detta resistenza elettrica specifica, è l'attitudine di un materiale a opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche.

Nel sistema internazionale la resistività si misura in ohm per metro ( $\Omega \cdot m$ ). Dal punto di vista matematico è definita così:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (2.1)$$

Dove R, A ed L sono rispettivamente la resistenza elettrica, l'area e la lunghezza del materiale.

Possiamo quindi distinguere i materiali nelle tre categorie già precedentemente descritte:

- ISOLANTI:  $\rho > 10^3 [\Omega \cdot m]$
- SEMICONDUTTORI:  $10^{-5} < \rho < 10^3 [\Omega \cdot m]$
- CONDUTTORI:  $\rho < 10^{-5} [\Omega \cdot m]$



## Capitolo 3

# I semiconduttori

### 3.1 Semiconduttori intrinseci

Un semiconduttore si dice intrinseco quando è privo di impurità.

Alla temperatura di 0 K non ci sono elettroni liberi nella banda di conduzione e il materiale si comporta da isolante perfetto non permettendo il movimento dei portatori di carica.

Alla temperatura di 300 K (temperatura ambiente), grazie all'effetto dell'agitazione termica, viene fornita energia agli elettroni del semiconduttore. Statisticamente alcuni di essi hanno energia sufficiente da rompere il loro legame covalente e andare in banda di conduzione (l'energia necessaria è pari all'energy gap) dando luogo ad uno stato elettronico libero nella banda di valenza e ad uno occupato in quella di conduzione. In altri termini si è venuta a creare la cosiddetta coppia elettrone-lacuna che fornisce la possibilità di passaggio di corrente attraverso il materiale.

In queste condizioni, la densità di elettroni presenti nel semiconduttore è:

$$n_i = n = p[\text{elettroni}/\text{cm}^3] \quad (3.1)$$

Dove:

n: concentrazione elettroni liberi

p: concentrazione lacune

$n_i$ : concentrazione intrinseca di portatori

Vale anche la seguente formula:

$$n_i^2 = BT^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (3.2)$$

Dove:

T: temperatura del semiconduttore [K]

$E_g$ : energy gap [eV]

k: costante di Boltzmann= $8,617 \cdot 10^{-5} \left[\frac{eV}{K}\right]$

Dalla formula si può notare che  $n_i$  cresce all'aumentare della temperatura.

### 3.2 Semiconduttori estrinseci - Drogaggio

Aggiungendo piccole quantità di impurità nel semiconduttore (in questo caso si parla di semiconduttore estrinseco) si possono modificare fortemente e in modo altamente controllato le sue proprietà elettroniche. Questo è il motivo principale per cui questi materiali sono così largamente utilizzati nel mondo dell'elettronica.

Queste impurità, chiamate droganti, sono classificabili in due tipi: quelle che forniscono un eccesso di elettroni alla banda di conduzione, e quelle che forniscono un eccesso di lacune alla banda di valenza.

Un semiconduttore con eccesso di elettroni è detto semiconduttore di tipo n, mentre un semiconduttore con un eccesso di lacune è detto semiconduttore di tipo p.

Un drogaggio pesante del semiconduttore può aumentare la sua conduttività di un fattore di oltre un miliardo che può portarlo ad assumere caratteristiche da isolante o da conduttore.

#### 3.2.1 Drogaggio di tipo n

I droganti più comuni di tipo n per il silicio sono il fosforo e l'arsenico. Da notare è che entrambi questi elementi sono nel gruppo V della tavola periodica, mentre il silicio è nel gruppo IV.

Quando il silicio è drogato con atomi di arsenico o di fosforo, gli atomi "donatori" di questi droganti sostituiscono atomi di silicio nel reticolo cristallino del semiconduttore, ma poiché hanno un elettrone esterno in più del silicio, essi tendono a fornire questo elettrone alla banda di conduzione (a temperatura ambiente tutti i donatori sono ionizzati).

Introducendo una concentrazione  $N_D$  [ $cm^{-3}$ ] di atomi donatori con  $N_D \gg n_i$  avremo che:

$$n \cong N_D \quad (3.3)$$

dove  $N_D$  deve essere molto minore della concentrazione degli atomi del semiconduttore per mantenere la condizione di completa ionizzazione dei portatori di carica ed evitare la degenerazione del materiale.

Utilizzando ora la legge dell'azione di massa:

$$n_i^2 = n \cdot p \quad (3.4)$$

possiamo ricavare la concentrazione di lacune:

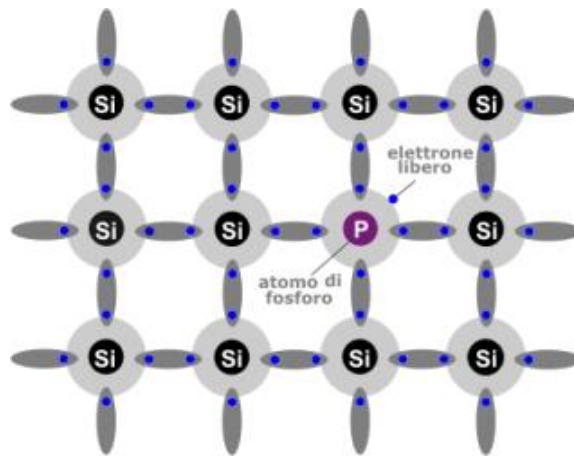


Figura 3.1: Drogaggio di tipo  $n$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \cong \frac{n_i^2}{N_D} \quad (3.5)$$

### 3.2.2 Drogaggio di tipo $p$

Il drogante di tipo  $p$  di gran lunga più usato per il silicio è il boro (elemento del gruppo III), il quale ha un elettrone esterno in meno del silicio. Per questa ragione tende a prendere un elettrone dalla banda di valenza, e quindi a creare una lacuna (a temperatura ambiente tutti gli accettori sono ionizzati).

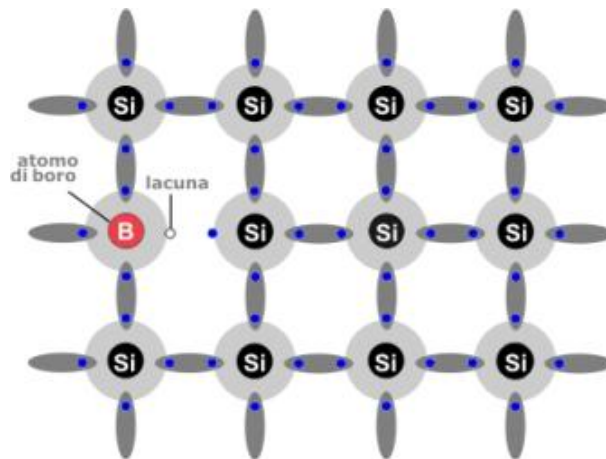


Figura 3.2: Drogaggio di tipo  $p$

Introducendo una concentrazione  $N_A$  [ $cm^{-3}$ ] di atomi accettori con  $N_A \gg n_i$  avremo che:

### Capitolo 3. I semiconduttori

---

$$p \cong N_A \quad (3.6)$$

Dove  $N_A$  deve essere molto minore della concentrazione degli atomi del semiconduttore.

Sempre utilizzando la legge dell'azione di massa ricaviamo la concentrazione di elettroni liberi:

$$n = \frac{n_i^2}{p} \cong \frac{n_i^2}{N_A} \quad (3.7)$$

## Capitolo 4

# La giunzione p-n: il diodo

### 4.1 Descrizione e funzionamento

Una giunzione p-n può essere creata drogando regioni vicine di un semiconduttore con droganti di tipo p e di tipo n.

A causa dell'elevato gradiente di concentrazione fra le due regioni in corrispondenza della zona di contatto, avremo il fenomeno della diffusione: elettroni si sposteranno dalla zona n alla zona p, lacune in senso opposto, generando la cosiddetta corrente di diffusione ( $I_{DIFF}$ ).

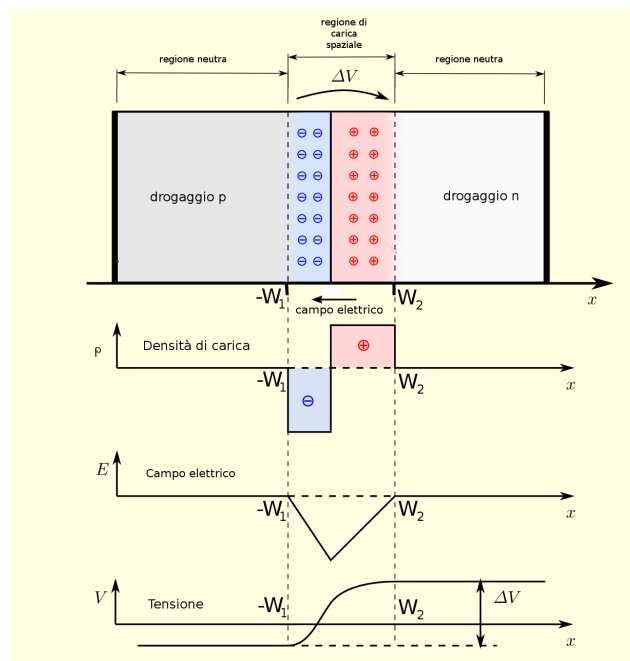


Figura 4.1: Giunzione p-n e grafici della densità di carica, del campo elettrico e della tensione sulla giunzione

## Capitolo 4. La giunzione p-n: il diodo

---

Questo fenomeno dà origine alla zona di svuotamento (o regione di carica spaziale) in cui la concentrazione di portatori liberi è tanto bassa da essere considerata trascurabile e dove ci sono atomi ionizzati che danno luogo ad un campo elettrico. Questo campo crea una corrente ( $I_{\text{DRIFT}}$ ) opposta a quella generata dalla diffusione.

Si raggiunge così una condizione di equilibrio dinamico in cui le due componenti di corrente si bilanciano e risulta:

$$I_{\text{DIFF}} = I_{\text{DRIFT}} \quad (4.1)$$

Grazie alla presenza del campo elettrico, si genera una barriera di potenziale  $\Delta V$  il cui valore è:

$$\Delta V = \frac{|E(0)|(W_1 + W_2)}{2} \quad (4.2)$$

Dove  $E(0)$  è il campo elettrico in corrispondenza del punto di contatto della giunzione.

La larghezza della zona di svuotamento (depletion layer) è:

$$W_{\text{dep}} = W_1 + W_2 = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0} \quad (4.3)$$

Dove:

$\epsilon_S$ : costante dielettrica del silicio =  $1,04 \cdot 10^{-12}$  [F/cm]

$q$ : carica elettrica elementare =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  [C]

Dalla formula possiamo notare che la larghezza della regione di carica spaziale (RCS) dipende fortemente dal drogaggio: Se  $N_A \gg N_D$  la regione si estende quasi interamente nella regione n, viceversa se  $N_A \ll N_D$ . Inoltre, se consideriamo le concentrazioni delle zone p ed n uguali, all'aumentare del drogaggio diminuisce la larghezza della RCS.

### 4.2 Polarizzazione e caratteristica corrente-tensione

Applicando una certa differenza di potenziale  $V_A$  non nulla ai capi del diodo, ovvero polarizzandolo, possono accadere i seguenti fenomeni:

- Polarizzazione diretta: diminuisce il campo elettrico all'interno della RCS e di conseguenza diminuisce la barriera di potenziale  $V_0$ . Questo favorisce la corrente di diffusione rispetto a quella di deriva che, agendo sui portatori maggioritari (elettroni nella zona n e lacune nella zona p), comporta un notevole aumento della corrente in funzione della d.d.p. applicata;

- Polarizzazione inversa: aumenta il campo elettrico e la barriera di potenziale  $V_0$ . Viene quindi ostacolata la corrente di diffusione, mentre quella di deriva aumenta in funzione del campo, ma siccome quest'ultima agisce sui portatori minoritari (elettroni nella zona p e lacune nella zona n) risulta essere molto piccola.

Il funzionamento del diodo si può descrivere analiticamente tramite l'espressione della corrente che scorre sul diodo in funzione della tensione applicata:

$$I = I_S(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1) \quad (4.4)$$

Dove:

$I_S$ : corrente inversa di saturazione

$V_A$ : tensione applicata al diodo

$V_T$ : potenziale termico ( $\cong 25mV$  a temperatura ambiente)

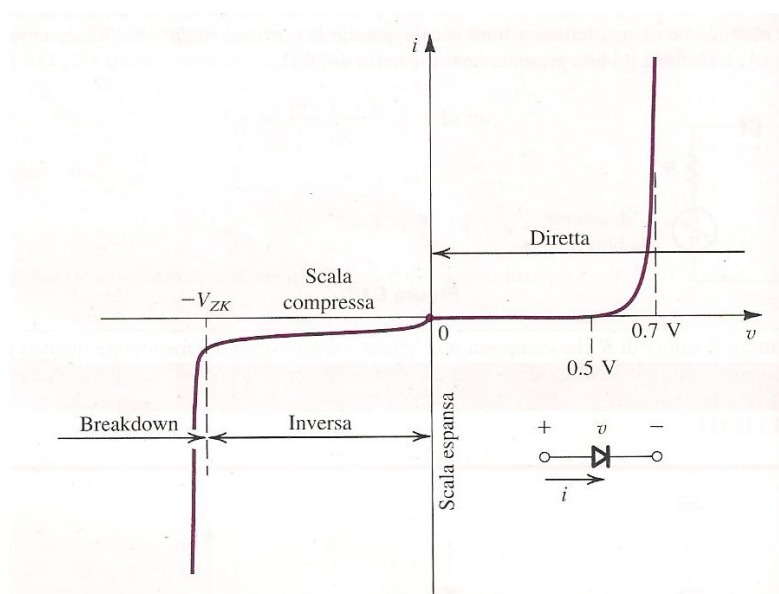


Figura 4.2: Caratteristica  $i-v$  del diodo

## Capitolo 5

# L'effetto fotovoltaico

L'effetto fotovoltaico è il fenomeno fisico che si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza di un materiale passa alla banda di conduzione a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico incidente sul materiale (ovvero la cui energia è superiore all'energy gap).

Il meccanismo di funzionamento si basa sull'utilizzo di materiali semiconduttori, il più utilizzato dei quali è attualmente il silicio. Infatti, nel caso di materiali isolanti, il band gap risulta troppo elevato per poter essere eguagliato dall'energia del fotone incidente, mentre per i materiali conduttori l'energia del band gap è piccolissima, quindi a temperatura ambiente c'è una continua creazione e distruzione di coppie elettrone-lacuna e l'energia necessaria alla creazione viene fornita direttamente dalle fluttuazioni termiche.

Quando un flusso luminoso investe invece il reticolo cristallino di un semiconduttore, si verifica la transizione in banda di conduzione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un egual numero di lacune che passa in banda di valenza. Si rendono pertanto disponibili portatori di carica, che possono essere sfruttati per generare una corrente.

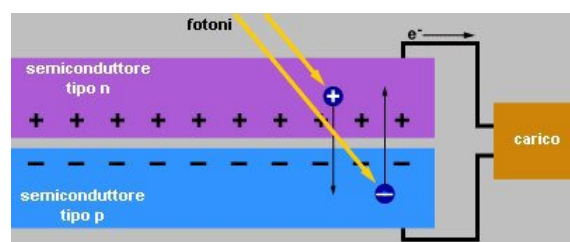


Figura 5.1: *Effetto fotovoltaico*

Come spiegato in precedenza, all'interno della zona di svuotamento di un diodo vi è un campo elettrico generato dalla presenza di ioni (positivi nel semiconduttore di tipo n e negativi in quello di tipo p) e dall'assenza di portatori liberi di carica. Illuminando la giunzione p-n dalla parte del silicio



di tipo n, si generano delle coppie elettrone-lacuna in entrambe le zone n e p. Il campo elettrico separa gli elettroni in eccesso generati dall'assorbimento della luce dalle rispettive lacune, spingendoli in direzioni opposte (gli elettroni verso la zona n e le lacune verso la zona p). Una volta attraversato il campo, gli elettroni liberi non tornano più indietro, perché il campo impedisce loro di invertire la marcia.



## **Parte II**

# **Il fotovoltaico: le celle solari**

## Capitolo 6

# La cella fotovoltaica

La cella fotovoltaica, o cella solare, è l'elemento base nella costruzione di un modulo fotovoltaico. La versione più diffusa di cella fotovoltaica, quella in materiale cristallino, è costituita da una giunzione p-n.

Analogamente al modulo, il rendimento (o efficienza) della cella fotovoltaica è il rapporto tra l'energia elettrica prodotta dalla cella e l'energia della radiazione solare che investe la sua superficie.

### 6.1 Struttura e funzionamento

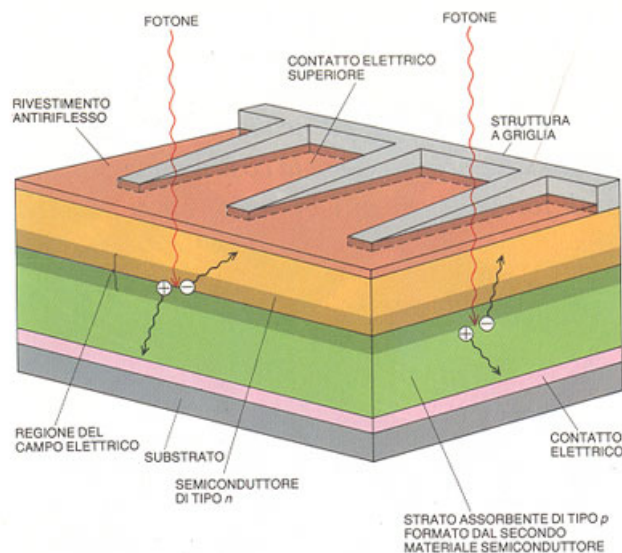


Figura 6.1: *Struttura di una cella solare a singola giunzione*

La giunzione tra i due semiconduttori drogati n e p crea un campo elettrico interno in grado di separare le cariche elettriche generate dall'effetto

fotovoltaico. Quando un fotone con energia sufficiente incide sulla cella si viene a creare una coppia elettrone-lacuna. Il campo elettrico spingerà gli elettroni verso il semiconduttore di tipo n e le lacune verso il semiconduttore di tipo p. Il flusso di cariche così generato diviene energia elettrica quando il dispositivo viene connesso a dei conduttori in un circuito chiuso.

## 6.2 Modello matematico

Una cella solare è di fatto un generatore di corrente che, tramite effetto fotovoltaico, trasduce in elettricità l'energia solare incidente.

Lo schema elettrico equivalente della cella è il seguente:

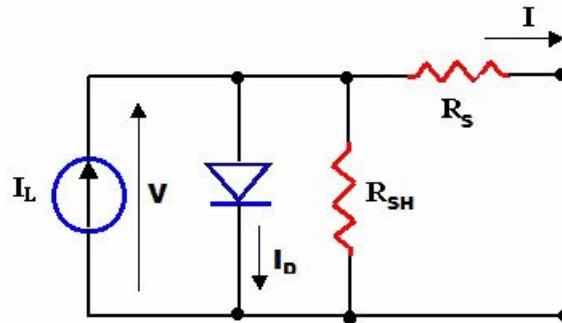


Figura 6.2: Schema elettrico equivalente di una cella fotovoltaica a singola giunzione

Un buon modello matematico per l'analisi del suo funzionamento è l'equazione del diodo ideale di Shockley (con riferimento al precedente schema):

$$I = I_L - I_D - I_{R_{SH}} = I_L - I_S \left( e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{SH}} \quad (6.1)$$

Dove:

- $I$ : intensità di corrente totale sulla cella;
- $V$ : differenza di potenziale tra i due terminali del diodo, ovvero quella a vuoto (con  $I$  nulla);
- $I_L$ : intensità di corrente prodotta dal generatore, proporzionale all'intensità della radiazione incidente sulla cella perché derivante dall'effetto fotovoltaico;
- $I_S$ : intensità di corrente di saturazione, un fattore direttamente proporzionale alla superficie della giunzione p-n;
- $q$ : carica elementare dell'elettrone;

## Capitolo 6. La cella fotovoltaica

- $k$ : costante di Boltzmann;
- $T$ : temperatura assoluta sulla superficie di giunzione tra la zone p ed n;
- $\eta$ : coefficiente di emissione, dipendente dal processo di fabbricazione e compreso generalmente tra 1 e 2 (fattore di idealità del diodo);
- $R_{SH}$  è la resistenza di shunt e tiene conto delle perdite dovute alla dispersione all'interno del diodo;
- $R_S$  è la resistenza parassita e rappresenta la resistenza delle due regioni di silicio e dei contatti metallici.

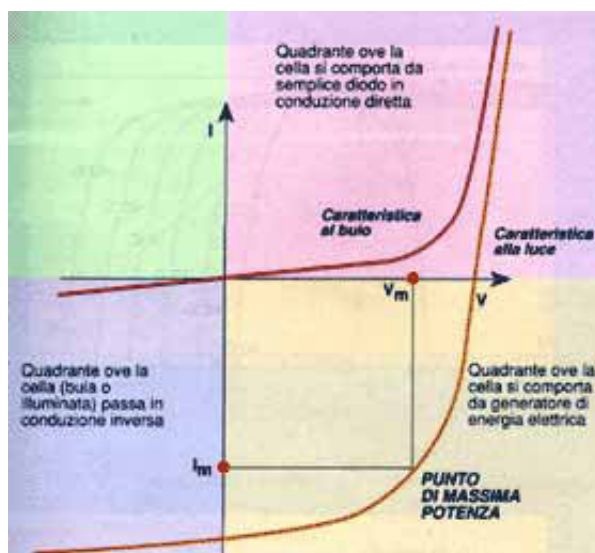


Figura 6.3: *Caratteristica  $i-v$  della cella in assenza e presenza di luce*

In figura 6.3 si può notare la caratteristica tensione-corrente della cella in condizione di assenza di luce (in questo caso la cella è un normale diodo) e di cella illuminata (quando si presenta l'effetto fotovoltaico).

Nel grafico, è il quarto quadrante quello interessante dal punto di vista dell'analisi della potenza erogata dalla cella.

Usando la corrente che scorre nella cella con segno opposto possiamo ottenere un grafico (vedi figura 6.4) in cui confrontare corrente e potenza erogata dalla cella: essendo la potenza il prodotto fra tensione e corrente, sarà nulla in condizioni di corto circuito ( $V=0$ ,  $I=I_{SC}$ ) e di circuito aperto ( $I=0$ ,  $V=V_{OC}$ ), crescerà all'aumentare della tensione sulla cella fino al raggiungimento del punto di massima potenza, per poi decrescere nonostante la tensione continui a salire.

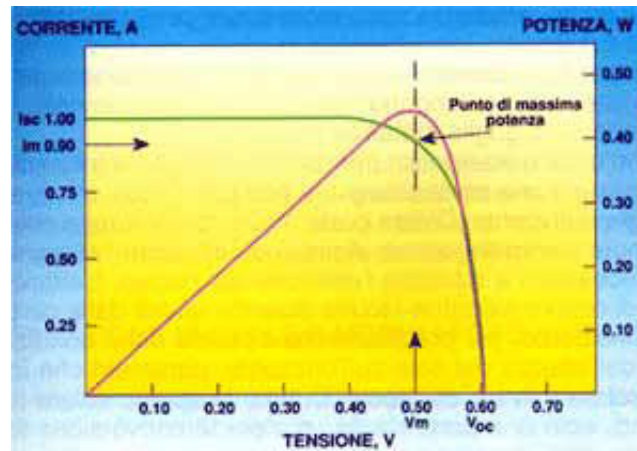


Figura 6.4: Corrente e potenza erogata dalla cella

La caratteristica i-v di una cella fotovoltaica è influenzata sensibilmente da due parametri: la temperatura e l'intensità della radiazione solare.

In figura 6.5 possiamo vedere come, all'aumentare dell'intensità della radiazione solare, aumenti anche la corrente di corto circuito (rimane pressoché invariata la tensione a vuoto) e come, all'aumentare della temperatura nei pressi della giunzione della cella, diminuisca la tensione a vuoto (aumenta di poco la corrente di corto circuito).

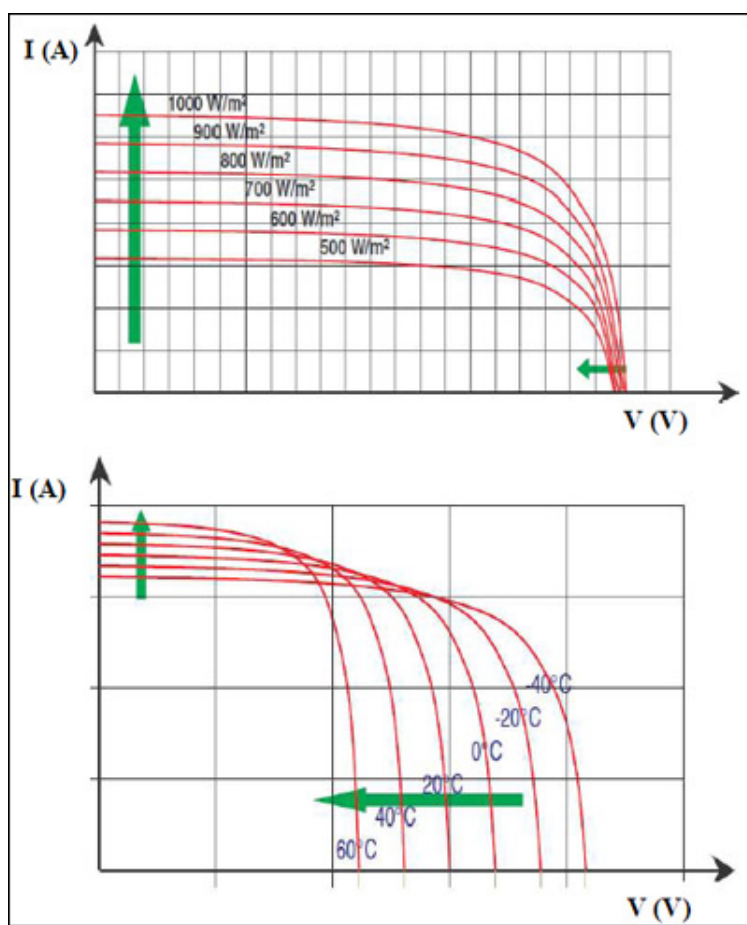


Figura 6.5: Caratteristica *i-v* della cella in funzione dell'intensità della radiazione solare e della temperatura



# Capitolo 7

## I tipi di celle

Dei molti materiali impiegabili per la costruzione delle celle fotovoltaiche, il silicio è in assoluto il più utilizzato.

Le tipologie costruttive delle celle fotovoltaiche più comuni sono:

- Wafer di silicio cristallino
  - Monocristallino
  - Policristallino
- Thin-Film
  - Silicio amorfo
  - Telleruro di cadmio
  - Diseleniuro di rame indio gallio
  - Multi-giunzione
  - Dye-sensitize
  - Quantum dot solar cell (QDSC)
  - Organica
  - Nitrato di indio gallio

Nei prossimi paragrafi verranno descritte alcune delle sopra citate tipologie di celle.

### 7.1 Celle in silicio cristallino

Il costituente principale di questo tipo di celle è il silicio che in natura si trova in forma di ossido di silicio.

Per ottenere il silicio in forma pura la sabbia deve essere fusa insieme a polvere di carbone. Mediante questo processo è possibile ottenere silicio con un grado di purezza del 98%. Il silicio a questo punto viene ulteriormente raffinato mediante un processo chimico durante il quale il silicio viene dapprima ridotto, finemente macinato e quindi trattato in un forno con acido idrocloridrico. Il prodotto di questo trattamento è un liquido a base di idrogeno e tricloro-silano (composto del silicio) avente una temperatura di ebollizione pari a  $31^{\circ}\text{C}$ .

Le impurità vengono separate dall'elemento attraverso un processo di distillazione per fasi successive. Quando il grado di purezza raggiunge il valore desiderato, il tricloro-silano viene ridotto a silicio in presenza di idrogeno ad una temperatura di  $1000^{\circ}\text{C}$ . Quindi il silicio può essere sottoposto a diversi trattamenti per creare celle in silicio monocristallino o policristallino.

#### 7.1.1 Celle in silicio monocristallino

Sono costituite dallo stesso materiale impiegato per la produzione della componentistica elettronica, per questo il prezzo di tale materia resta elevato. Per creare il silicio monocristallino si devono fabbricare grandi lingotti cilindrici con il processo Czochralski. Tale tecnica prende il nome dal ricercatore polacco Jan Czochralski, che la sviluppò nel 1916 mentre stava studiando la cristallizzazione dei metalli. Questo processo, introdotto nei sistemi produttivi industriali agli inizi degli anni '50, permette di ottenere la crescita di monocristalli di estrema purezza, migliorando le prestazioni della futura cella in termini di efficienza. In ambito industriale tale processo è impiegato principalmente nella crescita di blocchi di silicio, che si ottengono con la forma di pani cilindrici. Il processo A causa della geometria di questi lingotti, le celle in silicio monocristallino non sono interamente quadrate, e quantità significative di silicio finisce per essere sprecata.

I moduli in commercio hanno un'efficienza variabile tra il 14% e il 17% anche se le loro prospettive sembrano migliorare tali valori.

#### 7.1.2 Celle in silicio policristallino

Il silicio policristallino cominciò ad apparire sul mercato nel 1981. Circa il 45% dei pannelli solari odierni sono fatti da questo tipo di silicio.

Le celle sono ottenute dal riciclaggio del materiale scartato dalla produzione di componentistica elettronica, rifuso per ottenere una tessitura cristallina compatta. La struttura rimane però meno ordinata rispetto al silicio

monocristallino, circostanza che comporta una diminuzione dell'efficienza attestata tra l'11% e il 14%.

Il silicio policristallino non è realizzato con il processo Czochralski come lo è il suo precursore. Invece, il silicio grezzo viene fuso e versato in uno stampo quadrato, che una volta raffreddato può essere tagliato in wafer della stessa forma. Il processo utilizzato per confezionare il silicio policristallino è quindi più semplice e meno costoso. Dal momento che i wafer sono già quadrati, c'è anche minor spreco in confronto al monocristallino. Pertanto, i pannelli solari policristallini costano meno.

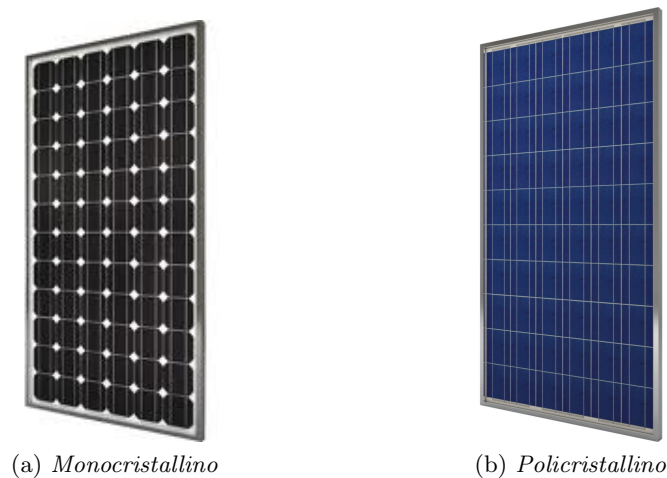


Figura 7.1: Moduli fotovoltaici cristallini

## 7.2 Celle Thin-Film (a film sottile)

Le celle a film sottile, a partire dagli anni '90, sono diventate una realtà di grande interesse nel campo del fotovoltaico.

Le celle sono formate da strati sottili di semiconduttori applicati ad un substrato di altro materiale (spesso vetro o ceramica). La deposizione dello strato sottile può avvenire tramite un processo di vaporizzazione, di spruzzamento catodico o tramite un bagno elettrolitico.

I semiconduttori più utilizzati sono silicio amorfo, diseleniuro di rame indio gallio (CIGS) e tellururo di cadmio (CdTe).

A causa dell'elevata capacità di assorbire la radiazione solare da parte di queste sostanze, per le celle a film sottile è richiesto un impiego di materiale fotosensibile molto ridotto: tale strato, teoricamente, può arrivare ad avere uno spessore di 0.001 mm.

Gli aspetti che rendono questa tecnologia di particolare interesse in rapporto alle celle in silicio cristallino sono molteplici:

## Capitolo 7. I tipi di celle

---

- Il processo di produzione è automatizzato e consente un grande risparmio di energia e di materiale;
- Per quanto riguarda la forma delle celle non esistono particolari vincoli poiché il substrato può essere facilmente sagomato. Diversamente, la porzione di cella elettrica attiva deve avere una forma quanto più possibile regolare (rettangolare) per agevolare l'interconnessione in serie di celle;
- Mentre ogni singola cella in silicio cristallino è collegata elettricamente ad una cella adiacente mediante un'interconnessione esterna, le celle in silicio amorfo sono collegate tra loro in modo strutturale;
- I contatti elettrici sul retro della cella consistono in una copertura metallica uniforme;
- La superficie anteriore della cella è invece ricoperta da uno strato di ossidi di metallo altamente trasparenti (TCO Trasparent Conductive Oxide) come ad esempio l'ossido di zinco (ZnO), ossido di stagno ( $\text{SnO}_2$ ) e ossido di titanio e indio (ITO Indium Tn Oxide);
- Le particolari caratteristiche della tecnologia Thin-Film sembrano molto adatte ad applicazioni spaziali.

I pannelli solari costruiti con tecnologia a film sottile sono una valida alternativa ai pannelli in silicio, con il vantaggio di essere leggeri e flessibili. Ad esempio, nell'uso satellitare, i pannelli vengono arrotolati e stipati in luogo sicuro durante il lancio, per poi essere srotolati ed aperti, una volta giunti nello spazio.

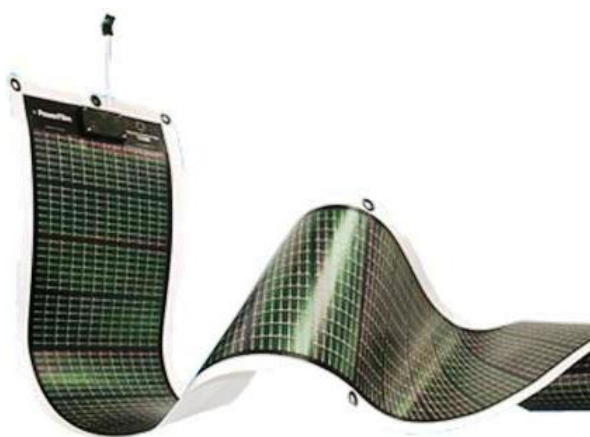


Figura 7.2: Modulo fotovoltaico a film sottile

### 7.2.1 Celle in silicio amorfo

Nella produzione delle celle a film sottile il materiale maggiormente utilizzato è il Silicio amorfo (a-Si).

La sua struttura molecolare è caratterizzata da un reticolo disordinato in cui non tutti gli atomi possiedono un legame con altri quattro atomi.

Questa tecnologia consiste nella deposizione di uno strato sottile di silicio amorfo (1-2 $\mu$ m) su superfici di altro materiale, ad esempio il vetro o supporti di plastica.

L'efficienza di questa tecnologia è sensibilmente più bassa, dell'ordine del 6-8% e l'attendibilità di vita della superficie in silicio amorfo è sensibilmente ridotta rispetto al silicio cristallino.

Vi sono diversi fattori che rendono interessante lo sviluppo di queste celle:

- Risparmio di materiale pregiato: lo spessore di silicio necessario nella tecnologia amorfa è decisamente concorrenziale. Il procedimento di deposizione consente inoltre di riciclare il materiale di scarto della tecnologia cristallina;
- Costi finali sensibilmente ridotti: risparmiare materiale significa avere un prodotto finale economicamente competitivo;
- soluzioni non ottenibili con la tecnologia cristallina: la deposizione del silicio può essere realizzata su materiali di diversa natura allo scopo di ottenere prodotti particolari, come superfici traslucide (deposizione su vetro), o moduli flessibili (deposizione su superfici polimeriche flessibili).

### 7.2.2 Celle in Telleruro di cadmio (CdTe)

Il CdTe ha un "gap" di energia tra banda di conduzione e banda di valenza di circa 1,45 eV ed è quindi un materiale particolarmente adatto ad assorbire la luce solare. Inoltre è un semiconduttore a gap diretto, il che significa che l'assorbimento è molto più efficiente di quanto non avvenga nel silicio.

Queste celle hanno costi inferiori rispetto a quelle in silicio amorfo ed è possibile riciclare il 95% del materiale.

Le celle in CdTe hanno un substrato in vetro e i contatti frontali sono realizzati tramite uno strato trasparente solitamente in ossido di indio e titanio (ITO).

I processi produttivi impiegati in genere sono lo stampaggio, la deposizione galvanica e lo spruzzo. Nei processi sottovuoto, la deposizione dei due strati di CdS (Solfuro di Cadmio) e CdTe avviene a circa 700°C. Attraverso un processo in atmosfera contenente cloro il doppio strato CdS/CdTe viene

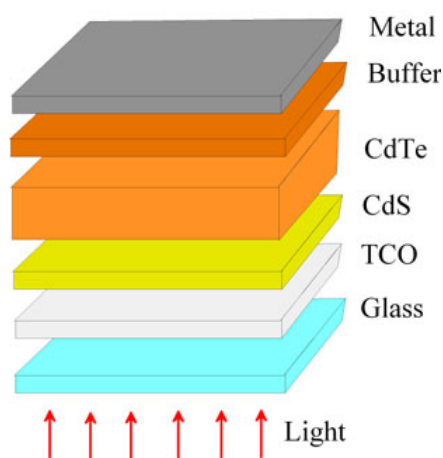


Figura 7.3: *Struttura della cella in CdTe*

reso attivo. Lo strato CdS assorbe solo una piccola frazione della radiazione solare, lasciando che il resto penetri fino allo strato CdTe.

Un aspetto che potrebbe limitare l'affermarsi di questa tecnologia è la tossicità del cadmio allo stato gassoso. Il composto di cadmio e tellurio è molto stabile: il cadmio, invece, si presenta in forma gassosa soltanto durante il processo di produzione delle celle ed è in questa fase che potrebbero manifestarsi delle criticità.

### 7.2.3 Celle in Diseleniuro di rame indio gallio (CIGS)

La Struttura base è caratterizzata da un substrato di vetro su cui viene realizzata un'eterogiunzione (giunzione con semiconduttori con diverso Energy gap) formata da  $\text{Cu(InGa)Se}_2$  (CIGS) come semiconduttore intrinseco di tipo p e Ossido di Zinco (ZnO) drogato con Alluminio come semiconduttore di tipo n.

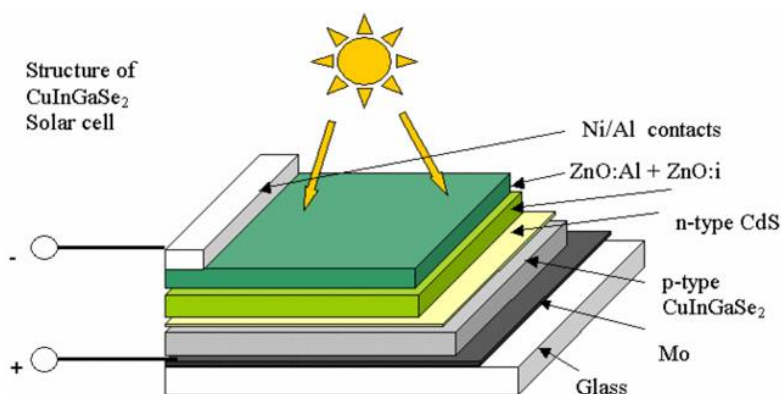


Figura 7.4: *Struttura della cella in CIGS*

Se confrontate con le altre celle a film sottili, le CIGS hanno efficienza più alta; inoltre sfruttando adeguatamente le economie di scala derivanti da una produzione in serie, si dovrebbero raggiungere costi di produzione inferiori a quelli delle celle in silicio cristallino.

Infine, il pericolo derivante dall'impiego di selenio può essere trascurato in virtù del modesto contenuto di questo elemento nelle celle CIGS.

### 7.2.4 Celle multi-giunzione

Questi tipi di dispositivo sono celle solari di terza generazione ad alta efficienza, originariamente progettate per l'aerospazio.

Il loro principio di funzionamento è semplice: si utilizzano diversi materiali semiconduttori con valori di gap energetico diversi per garantire un assorbimento della luce a tutte le frequenze. Questo si ottiene con il cosiddetto tandem: si creano varie giunzioni una sopra l'altra con una tecnica epitassiale denominata MOCVD (Metalorganic Chemical Vapour Deposition), separate da diodi tunnel.

Le celle solari costituiscono una sorta di filtro di luce: la prima cella assorbe i fotoni con energie più elevate lasciando invece passare quelli con energia minore che verranno assorbiti dalle altre giunzioni. Si utilizzando quindi celle i cui gap energetici devono progressivamente ridursi e le giunzioni stesse agiscono da elementi ottici per distribuire lo spettro.

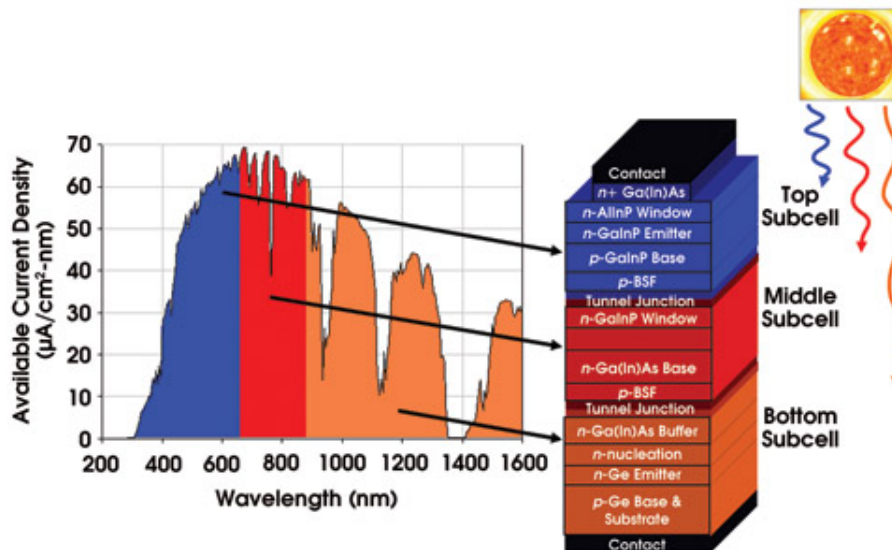


Figura 7.5: Esempio di cella a tripla giunzione dove ogni giunzione è predisposta all'assorbimento di una certa porzione di spettro

Le celle multi-giunzione vengono generalmente costruite con materiali a gap diretto, semiconduttori costituiti da elementi del III e V gruppo come

## Capitolo 7. I tipi di celle

---

GaAs, GaInP, InP, GaInAs.

L'arseniuro di gallio (GaAs), per esempio, ha molteplici pregi rispetto al Silicio godendo di una più alta mobilità e saturazione di velocità degli elettroni, e soffrendo di un minor rumore termico. Ciò comporta notevoli pregi:

- Migliore conversione della radiazione dello spettro solare in energia elettrica (maggior efficienza);
- Strati di materiali più sottili per ottenere effetto fotovoltaico;
- Maggiore tolleranza alle alte temperature e minor degradazione che si traducono in una maggiore robustezza e durata della cella.

Il motivo principale per cui questo semiconduttore non ha soppiantato il Silicio è che risulta molto più difficile da produrre ed è molto più raro. I costi di una cella superano di circa quattro volte quelli di un'ottima cella in silicio monocristallino.

È per questo motivo che, negli ultimi anni, questa tipologia di cella è stata utilizzata in collaborazione con la tecnologia del fotovoltaico a concentrazione: concentrando i raggi solari in un'area molto ridotta, si necessita di celle più piccole (e quindi meno costose) e più efficienti. Questa soluzione rappresenta il futuro dell'energia rinnovabile che sfrutta il sole come fonte di energia.



## Capitolo 8

# Efficienza

Come già accennato, l'efficienza (o rendimento) della cella fotovoltaica è il rapporto tra l'energia elettrica prodotta dalla cella e l'energia della radiazione solare che investe la sua superficie. In figura 8.1 si vede come, a partire dagli anni '70 fino ad oggi, le varie ricerche in campo energetico abbiano innalzato gradualmente il livello di efficienza di ogni tipo di cella fotovoltaica.

Si può inoltre notare come le celle a giunzione multipla, in particolare quelle a tripla giunzione, abbiano i valori più alti di efficienza (37,9% il record raggiunto dalla Sharp Corporation nell'aprile 2013). Combinando la tecnologia a tripla giunzione con il fotovoltaico a concentrazione, si ottengono valori ancora maggiori di rendimento come il 44,4%, record mondiale che risale al giugno 2013 (Sharp Corporation).

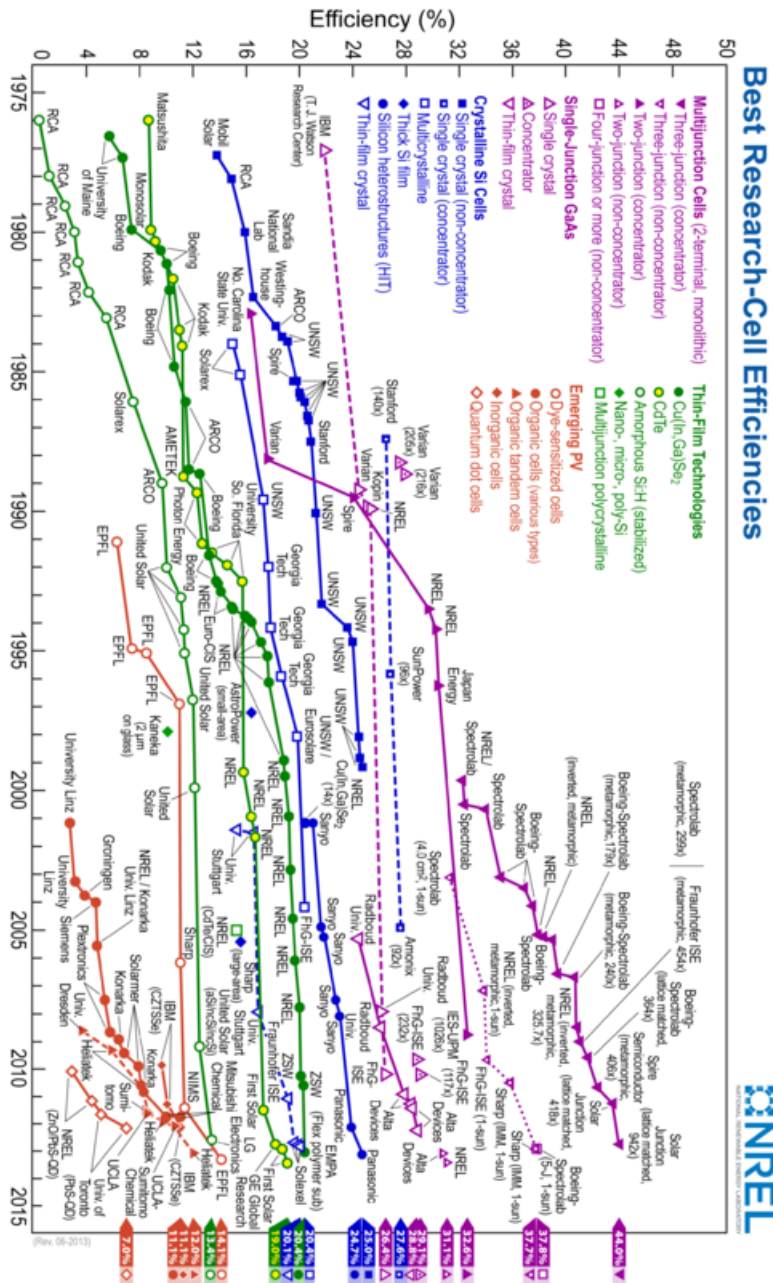


Figura 8.1: Evoluzione dell'efficienza delle celle fotovoltaiche a partire dagli anni '70

## Parte III

# Il fotovoltaico a concentrazione

## Capitolo 9

# Descrizione e funzionamento

Il fotovoltaico a concentrazione è una tecnologia che sfrutta il sole in maniera più efficiente rispetto al fotovoltaico tradizionale perché è in grado di sfruttare al meglio l'irraggiamento ricevuto per produrre energia pulita con un più elevato livello di efficienza.

Innanzitutto, un sistema fotovoltaico a concentrazione è composto fondamentalmente di tre parti:

- Il ricevitore: consente di catturare la radiazione solare per trasformarla in energia elettrica. Comprende sia la cella fotovoltaica che il sistema di dissipazione del calore;
- L'ottica di focalizzazione: in genere costituita da lenti o specchi, permette di concentrare la luce solare sul ricevitore;
- L'inseguitore solare: garantisce al sistema il puntamento del sole in ogni istante.

Il fotovoltaico a concentrazione è in grado di produrre energia pulita per più ore al giorno rispetto al fotovoltaico tradizionale grazie alla commistione di tre fattori:

- Minore utilizzo di silicio nel ricevitore (che si traduce in costi minori);
- La presenza di lenti o specchi per convogliare più luce possibile verso celle ad altissima efficienza. Il funzionamento di questo sistema non è particolarmente complesso: i raggi del sole vengono catturati da sistemi ottici che riescono a concentrarli 100 e più volte rispetto ai sistemi a celle tradizionali. I sistemi ottici utilizzati sono costituiti da lenti o da prismi che scindono la luce solare in varie frequenze e la inviano alle micro celle sottostanti (o sovrastanti) ad alta efficienza che a loro volta sono specializzate sulla gamma di frequenza che ricevono;

- La presenza di strutture di sostegno ad inseguimento solare, strutture in grado di "seguire" il percorso del sole durante la giornata per sfruttare al massimo il suo potenziale. In questo caso si parla di fotovoltaico a concentrazione ad inseguimento solare, sistema decisamente più efficiente rispetto a quelli a struttura fissa.

Il fotovoltaico a concentrazione è una tecnologia ad alta efficienza che, se ben sfruttata, può essere molto funzionale nelle aree più assolate del Pianeta; si prevede infatti che gli impianti di questo tipo arriveranno a superare i 12 *GW* di produzione entro il 2020 e saranno installate principalmente in regioni ad elevata insolazione. Il sistema, infatti, raggiunge un ottimo livello prestazionale in presenza di luce diretta. Sono adatte per questo scopo la fascia meridionale dell'europa, la fascia tropicale e quella equatoriale, dove l'irraggiamento solare supera i 1800  $W/m^2$ .

Il sistema di "convogliamento" della luce solare in un unico punto, sistema concepito in maniera totalmente diversa rispetto al fotovoltaico convenzionale, migliora le prestazioni e l'efficienza dell'impianto energetico incrementando in maniera esponenziale la quantità di raggi solari "catturati" dalle celle ad alta efficienza e trasformati in corrente elettrica pulita.

**Punti critici:** Questo tipo di tecnologia, come detto, può raggiungere un ottimo livello di efficienza a costi relativamente contenuti. Accanto a questi vantaggi, però, il fotovoltaico a concentrazione presenta alcuni inconvenienti che non sono stati ancora pienamente superati:

- La moltitudine di specchi e/o lenti, per svolgere al meglio la loro funzione riflettente, devono essere sgombri da polveri, sporcizie o detriti vari. La pulizia diventa quindi un fattore indispensabile;
- La concentrazione dei raggi del sole in un unico punto produce una elevatissima concentrazione di calore sulla cella fotovoltaica speciale "captante". Le celle si surriscaldano facilmente e necessitano per questo di adeguati sistemi di raffreddamento, che possono a loro volta consumare energia.

### 9.1 Il ricevitore

In un sistema fotovoltaico a concentrazione il ricevitore è il componente che consente di catturare la radiazione solare per trasformarla in energia elettrica, e comprende sia la cella fotovoltaica che il sistema di dissipazione del calore.

I ricevitori dei sistemi CPV (Concentrated PhotoVoltaic) sono, in linea di massima, molto più sofisticati e costosi di quelli dei comuni sistemi fotovoltaici, ma il loro impiego è giustificabile in base a due considerazioni:

## Capitolo 9. Descrizione e funzionamento

- Le comuni celle fotovoltaiche in silicio non consentono di sfruttare tutto lo spettro solare;
- L'efficienza di una cella fotovoltaica migliora all'aumentare del fattore di concentrazione della luce solare.

In un ricevitore fotovoltaico le soluzioni che permettono di raccogliere al meglio la radiazione solare sono ottenute affiancando celle fotovoltaiche con diversi spettri di assorbimento. Tali celle possono essere disposte in parallelo, come nel caso dei sistemi a concentrazione dicroici (figura A), oppure in serie, come nel caso dei sistemi che utilizzano celle multi-giunzione (figura B).

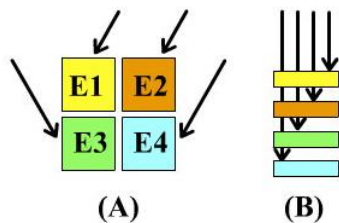


Figura 9.1: *Disposizione in parallelo e in serie delle celle nel ricevitore*

### 9.1.1 Ricevitore con celle dicroiche

Le celle dicroiche utilizzano dispositivi al GaSb (Antimoniuro di Gallio) o al Silicio per raccogliere la componente infrarossa dello spettro solare, e celle all'InGaP (fosfuro di Indio e Gallio) o a multi-giunzione InGaP/GaAs per raccogliere la componente visibile ed ultravioletta.

I sistemi a concentrazione che utilizzano queste celle devono necessariamente disporre di un sistema ottico dotato di filtri dicroici, i quali permettono di suddividere la luce solare nelle principali regioni spettrali e poi di indirizzarla sulle celle attraverso opportuni specchi parabolici.

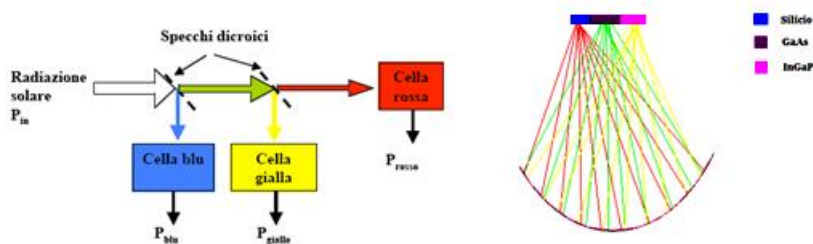


Figura 9.2: *Schema di funzionamento dei filtri dicroici e splittamento della radiazione su diverse celle fotovoltaiche in caso di abbinamento a specchi parabolici*

### 9.1.2 Ricevitore con celle multi-giunzione

Questo tipo di ricevitore utilizza celle con almeno due giunzioni una sopra l'altra. Le varie giunzioni sono tra loro collegate in serie da diodi tunnel caratterizzati da una caratteristica corrente-tensione di tipo ohmico. Inoltre, essendo collegate in serie elettricamente, devono essere ottimizzate e integrate in un sistema opportunamente progettato in modo da produrre all'incirca la stessa corrente di corto circuito, così da non penalizzare l'efficienza di conversione complessiva.

Le celle multi-giunzione sono descritte nel capitolo 7.2.4.

Il sistema ottico abbinato a un ricevitore che utilizza celle multi-giunzione deve garantire soprattutto un ottimo puntamento della radiazione solare sulla cella, la quale presenta in genere dimensioni molto ridotte.

### 9.1.3 Dissipazione del calore

Durante il funzionamento di un impianto fotovoltaico, le radiazioni solari colpiscono le celle e per effetto fotovoltaico si genera elettricità. Queste si surriscaldano e di conseguenza diminuisce l'efficienza di conversione dell'energia (vedi capitolo 6). Per contrastare questo effetto è necessario progettare un adeguato sistema di raffreddamento delle celle.

In un impianto fotovoltaico tradizionale è sufficiente un sistema di raffreddamento ad aria per abbassare la temperatura di lavoro, soluzione che non funziona nel fotovoltaico a concentrazione dove l'elevato tasso di concentrazione dei raggi solari sul ricevitore aumenta eccessivamente la temperatura.

Il laboratorio IBM di Zurigo sta lavorando alla soluzione di questo inconveniente. Utilizza, per questo scopo, uno specchio parabolico che concentra i raggi del Sole su una cella a tripla giunzione ad alta efficienza, sfruttando anche un avanzato sistema di inseguimento solare che permette di concentrare oltre 2000 Soli di energia solare. Per raffreddare il ricevitore, fa uso di un sistema di refrigerazione ad acqua che utilizza dei micro canali del diametro di qualche decina di micrometri, posizionati molto vicini alla fonte di calore per ottenere una bassa resistenza termica; la cella riesce così a lavorare ad una temperatura non superiore ai 100°C mentre l'acqua raggiunge i 90°C. Quest'acqua viene poi utilizzata nelle strutture vicine, ad esempio per il riscaldamento degli interni, risparmiando così energia elettrica. La commistione di questi fattori permette al sistema di avere un'efficienza di circa l'80%. Un altro modo in cui è possibile sfruttare il riscaldamento dell'acqua è utilizzarla nel processo di dissalazione.



Figura 9.3: *Prototipo di un sistema fotovoltaico ad alta concentrazione - laboratori IBM di Zurigo*

## 9.2 Le ottiche di focalizzazione

Come anticipato precedentemente, il sistema ottico abbinato a un sistema fotovoltaico a concentrazione deve garantire soprattutto un ottimo puntamento della radiazione solare sulla cella fotovoltaica, la quale presenta in genere dimensioni molto ridotte.

I sistemi ottici utilizzati per concentrare la radiazione solare possono essere suddivisi in due gruppi:

- Ottiche di tipo difrattivo (lenti prismatiche, lenti di Fresnel, filtri diecrici, ecc.), in cui la luce solare viene deviata e indirizzata sul ricevitore attraversando un mezzo diverso dall'aria (vetro, materiale plastico, ecc.) e può essere scomposta anche nelle sue componenti spettrali;
- Ottiche di tipo riflessivo (specchi), in cui la luce solare viene deviata dalla sua direzione di incidenza e riflessa verso il sistema ricevitore senza essere scomposta nelle diverse componenti spettrali.

### 9.2.1 Ottiche difrattive

Le lenti di Fresnel rappresentano al momento attuale il tipo di ottica diffrattiva maggiormente utilizzato nei sistemi CPV.

Esse presentano uno spessore molto sottile e sono ottenute da una lente ordinaria, sezionata in anelli circolari, dal centro sull'asse ottico, mantenendo solo il bordo di ogni sezione concentrica. Il risultato è una lente con spessore di pochi millimetri (4-5 mm), caratterizzata da una simmetria ad anelli concentrici.



Tipicamente le lenti di Fresnel sono realizzate in plastica, possono raggiungere livelli di efficienza piuttosto alti ed essere accoppiate a fibre ottiche, ma richiedono una buona precisione di puntamento della radiazione incidente (con un angolo di accettazione inferiore a  $0.5^\circ$ ).

Inoltre sono soggette al fenomeno dell'aberrazione cromatica, ovvero presentano diversi punti di focalizzazione a seconda della lunghezza d'onda.

**Sistemi point-focus:** Nei sistemi CPV point-focus l'ottica di focalizzazione è costituita da lenti di Fresnel, generalmente realizzate in materiale acrilico, con coefficiente di trasmissione tra l'80% e il 95% in ampio intervallo spettrale (400-1100 nm).

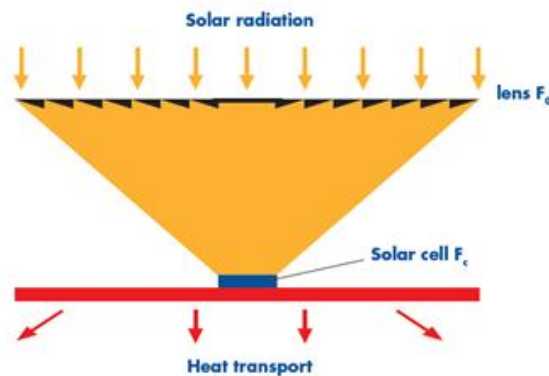


Figura 9.4: Concentrazione della luce attraverso lente di Fresnel e dissipazione del calore della cella attraverso un meccanismo di tipo passivo

In questo caso la radiazione solare viene concentrata in celle ben separate una dall'altra con dimensione estremamente ridotta (area di qualche  $\text{mm}^2$ ). Questa soluzione è interessante perché permette di utilizzare sistemi di dissipazione del calore di tipo passivo e di sfruttare la tecnologia di fabbricazione utilizzata per i LED a semiconduttore per la realizzazione dei ricevitori.

Per ridurre la precisione di puntamento richiesta da questi sistemi, viene spesso adottata la soluzione di inserire sotto la lente principale un sistema ottico secondario, che consiste in genere in piccoli coni la cui superficie interna è riflettente.

In alcuni dispositivi le lenti di Fresnel sono incorporate in strutture ottiche opportunamente progettate, in modo da formare le cosiddette lenti di Fresnel "dome-shaped", che consentono di ridurre i problemi di puntamento e contemporaneamente l'aberrazione cromatica (vedi figure 9.5).

**Sistemi line-focus:** I sistemi CPV line-focus utilizzano anch'essi lenti di Fresnel, ma di forma curva, che concentrano la radiazione solare su una linea

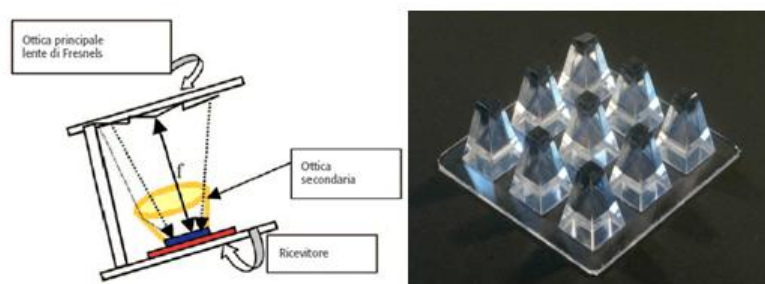


Figura 9.5: Esempi di ottica principale e secondaria in un sistema point-focus e di lenti dome-shaped

e non su un singolo punto.

Essi possono fare uso di lenti senza immagine (che cioè non riproducono l'immagine della sorgente in un unico punto focale), con maggiori angoli di accettazione rispetto ai sistemi point-focus, il che consente di utilizzare anche inseguitori solari a singolo asse.

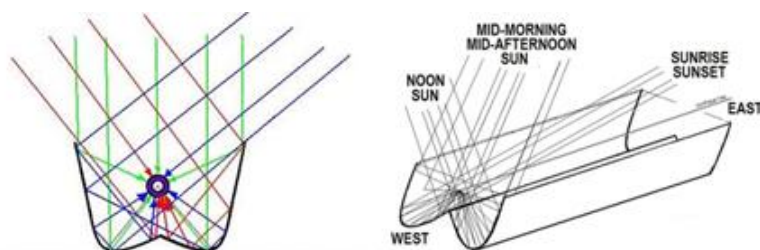


Figura 9.6: Esempio di lenti di Fresnel senza immagine, che possono raccogliere la luce solare con diversi angoli di incidenza, utilizzate in sistemi line-focus

### 9.2.2 Ottiche riflesse

Le ottiche riflesse utilizzano sostanzialmente degli specchi parabolici, anche detti concentratori parabolici o paraboloidi.

Essi consentono in generale di ottenere concentrazioni molto elevate ed evitare i problemi legati all'aberrazione cromatica tipici delle lenti di Fresnel.

Gli specchi possono essere di tipo singolo, con concentrazione della luce solare su un punto focale distanziato dal sistema ottico, oppure doppi, con abbinamento di uno specchio concavo a uno specchio convesso o piano (inverted mirror), e concentrazione della radiazione solare sulla superficie dello specchio di dimensioni maggiori.

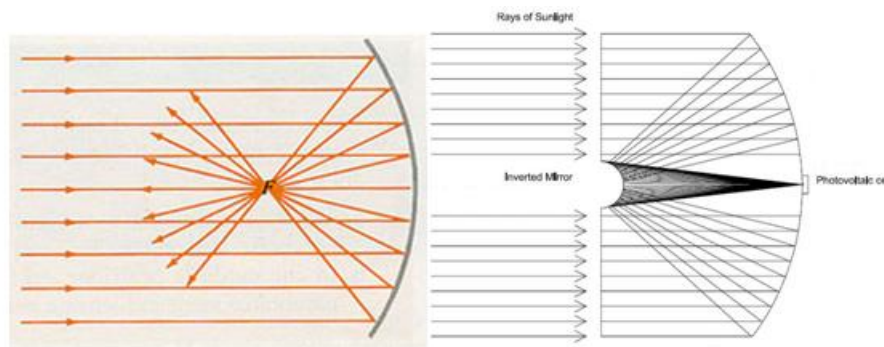


Figura 9.7: *Riflessione della luce solare attraverso uno specchio parabolico semplice o doppio (inverted mirror)*

**Sistemi dense-array:** Nei sistemi CPV dense-array, la luce viene concentrata tramite specchi parabolici e a differenza dei sistemi point-focus e line-focus, le celle solari presentano una superficie abbastanza estesa (dell'ordine di qualche  $\text{cm}^2$ ) e sono disposte una vicina all'altra.

Questi sistemi consentono di raggiungere concentrazioni molto elevate, ma per il loro corretto funzionamento è necessaria un'elevata precisione nella lavorazione degli specchi, molto maggiore di quella richiesta per le lenti di Fresnel.

A causa della necessità di garantire un'efficace dissipazione del calore, in questi concentratori è in genere predisposto un sistema di raffreddamento di tipo attivo, che richiede la messa a punto di ricevitori più complessi.



Figura 9.8: *Concentratore solare fotovoltaico dense-array sviluppato da CESI Ricerca*

**Sistemi micro-dish:** Per diminuire i problemi termici tipici dei sistemi dense-array, sono stati sviluppati i sistemi CPV a micro-specchi (micro-dish), caratterizzati da fattori di concentrazione inferiori, ma che non necessitano di sistemi di raffreddamento di tipo attivo.

Essendo gli specchi di piccola dimensione, è anche minore il rischio di determinare errori di forma e il puntamento solare risulta facilitato. Ovviamente tali sistemi presentano una maggiore complessità di realizzazione perché a ciascuno specchio è abbinato un singolo ricevitore.



Figura 9.9: *Esempio di concentratore solare fotovoltaico a micro-dish sviluppato da Solfocus*

### 9.3 L'inseguitore solare

Un inseguitore solare è un dispositivo meccanico-automatico atto ad orientare favorevolmente rispetto ai raggi del sole un pannello fotovoltaico, aumentando la potenza dell'energia solare captata e dunque la resa effettiva del dispositivo energetico.

Storicamente i primi sistemi solari ad inseguimento sono stati quelli presenti in orbita sui satelliti artificiali.

Nel campo fotovoltaico i moduli montati a bordo di un inseguitore vengono generalmente disposti geometricamente su un singolo pannello, pratica che evita l'impiego di un inseguitore per ogni singolo modulo.

In particolare, nel campo della concentrazione solare, un inseguitore è utile a mantenere costante il punto di fuoco generato dal paraboloide sul ricevitore. Tanto maggiore è l'allineamento perpendicolare con i raggi solari, tanto maggiore sarà l'efficienza di conversione e l'energia prodotta a parità di superficie, con conseguente diminuzione della superficie di pannello solare necessaria a parità di potenza richiesta. Questo ha ovviamente ripercussioni positive sui costi dell'impianto.

Gli inseguitori solari per un impianto fotovoltaico a concentrazione sono di tipo attivo in quanto vengono messi in movimento da motoriduttori.

Il movimento è pilotato da un comando elettronico detto "astronomico" che viene elaborato a partire dai dati delle effemeridi del sole riferite alle

coordinate del sito d'impianto. Questa tipologia di pilotaggio garantisce un'elevata produttività riferita alla luce diretta.

In base alle loro caratteristiche costruttive, gli inseguitori solari possono essere ad uno o due gradi di libertà.

Quelli ad un grado di libertà possono essere di tre tipi:

- Gli *inseguitori di tilt* sono i più semplici da realizzare, e ruotano attorno all'asse est-ovest. Il pannello viene sollevato o abbassato (in genere manualmente due volte l'anno) verso l'orizzonte in modo che l'angolo rispetto al suolo sia statisticamente ottimale in base alla stagionalità. Questi inseguitori offrono un incremento di produzione inferiore al 10%, tanto da giustificare raramente un servomeccanismo;
- Gli *inseguitori di rollio* si prefiggono di seguire il sole lungo la volta celeste nel suo percorso quotidiano, a prescindere dalla stagione di utilizzo. In questo caso l'asse di rotazione è nord-sud, mentre l'altezza del sole rispetto all'orizzonte viene ignorata. La rotazione richiesta a queste strutture è più ampia del tilt, spingendosi a volte fino a  $\pm 60^\circ$ ;
- Gli *inseguitori di azimut* dispongono di un grado di libertà con asse zenith-nadir. Per ottenere ciò il pannello viene montato a bordo di una base rotante servoassistita, complanare al terreno. L'incremento di produzione elettrica risultante è approssimativamente pari al 25%.

Gli inseguitori più sofisticati dispongono di due gradi di libertà, con cui si prefiggono di allineare perfettamente e in tempo reale l'ortogonale dei pannelli fotovoltaici con i raggi solari. Con questi inseguitori si registrano aumenti di produzione elettrica che raggiungono anche il 35-40%, a fronte però di una maggior complessità costruttiva.

**Svantaggi:** I lati negativi degli inseguitori solari si manifestano nei problemi meccanici a cui vanno inevitabilmente incontro con l'usura del tempo, con i conseguenti fermi impianto causati.

I servomeccanismi degli inseguitori sono organi poco sollecitati, ma sottoposti per loro natura a condizioni atmosferiche gravose per lungo tempo. A questi limiti è necessario far fronte predisponendo un oculato programma di manutenzione sia su base temporale che a seguito di rilievi da effettuare in concomitanza con ogni fase di pulizia dell'impianto.

Il consumo elettrico delle componenti elettroniche è trascurabile in un moderno sistema correttamente progettato, quello delle componenti meccaniche può essere sensibile solo in impianti di piccola potenza o che beneficiano di scarsa irradiazione per particolari condizioni orografiche o climatiche.



# Conclusioni

In questa trattazione, dopo aver appreso le più importanti nozioni di fisica alla base della tecnologia fotovoltaica, e dopo aver dato uno sguardo alle varie tipologie di celle in via di sviluppo, abbiamo concentrato la nostra attenzione sul fotovoltaico a concentrazione e sulle sue caratteristiche principali.

L'utilizzo di specchi o lenti permette di concentrare i raggi solari aumentando la quantità di radiazioni che una singola cella può convertire in energia elettrica. Questo però comporta un aumento dei costi dell'impianto, anche per il fatto di dover utilizzare celle più complesse in grado di assorbire la più ampia banda di frequenze possibile dello spettro.

Un'altra conseguenza dell'uso delle ottiche di focalizzazione è l'aumento notevole della temperatura delle celle, che può causare perdita di efficienza e degrado strutturale; è pertanto necessario progettare un adeguato sistema di raffreddamento che contrasti tali effetti negativi.

Tuttavia, è anche vero che quanto appena detto permette di utilizzare una minor quantità di silicio per la produzione del ricevitore ed ottenere un sistema con un'elevata efficienza. Se a questo aggiungiamo il fatto che, con il principio dell'inseguimento solare, possiamo ricavare la massima energia per un gran numero di ore al giorno, possiamo concludere che il fotovoltaico a concentrazione può rappresentare la tecnologia del futuro; una tecnologia, ci auguriamo, in grado di sostituire definitivamente quelle fonti di energia, esauribili e non pulite, che stanno rovinando il clima del nostro pianeta.

# Bibliografia

[Libro] Sam-Shajing Sun and Niyazi Serdan Sariciftci, *Organic Photovoltaics - Mechanisms, Materials and Devices*

[Sito Web] <http://www.fotovoltaiconorditalia.it/>

[Sito Web] <http://arstechnica.com/science/>

[Sito Web] <http://www.zurich.ibm.com/>

[Sito Web] <http://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/>

[Sito Web] <http://blog.crit-research.it/>

[Sito Web] <http://www.vivoscuola.it>

[Sito Web] <http://www.diee.unica.it/>

[Sito Web] <http://www.enerpoint.it/solare/fotovoltaico/>

[Sito Web] <http://www.infofotovoltaico.com/>

[Immagini] <https://www.google.it/>