



Redazione

(2) La seconda parte è stata pubblicata sul fascicolo precedente.

Materiali semiconduttori e conversione della radiazione solare

Considerazioni generali

La conversione della radiazione solare in energia elettrica avviene sfruttando l'effetto indotto da un flusso luminoso su un materiale semiconduttore opportunamente trattato. Il materiale più comunemente utilizzato nella realizzazione delle celle fotovoltaiche è il silicio cristallino, un semiconduttore oltretutto che si presta bene ad una semplice illustrazione dell'argomento. L'atomo di silicio è tetravalente, in quanto presenta quattro elettroni nell'orbita più esterna che gli permettono di legarsi con altri atomi. In un cristallo di silicio ciascun atomo si lega allora con altri quattro, completando in questo modo l'ottetto esterno e formando una struttura tetraedrica molto stabile.

TERZA PARTE (2)



Dall'energia solare all'energia elettrica

Quest'ultima, per semplicità, può essere rappresentata sul piano bidimensionale come in *figura 3.1*. A differenza di quelli esterni, gli elettroni nelle orbite più interne sono invece molto legati al nucleo e non partecipano ai legami con altri atomi. In un cristallo di questo tipo, detto intrinseco, gli elettroni si trovano vincolati nei legami covalenti con altri atomi e, a meno che non intervengano fattori esterni, non sono in grado di partecipare alla conduzione elettrica perché non dispongono di un livello energetico sufficiente.

A questo proposito, il Principio di esclusione di Pauli afferma che uno stesso stato

quantico non può essere occupato da più di un elettrone ma, poiché in un reticolo cristallino siamo in presenza di un gran numero di elettroni, i livelli energetici ammissibili sono tra loro molto ravvicinati, al punto da formare una zona continua, ossia una banda, entro la quale i livelli energetici sono liberi da vincoli.

Nel caso del silicio cristallino, siamo in presenza di una banda di valenza per i legami atomici e una banda di conduzione, nella quale gli elettroni hanno energia sufficiente per muoversi liberamente nel reticolo e quindi dar luogo alla conduzione di energia elettrica.

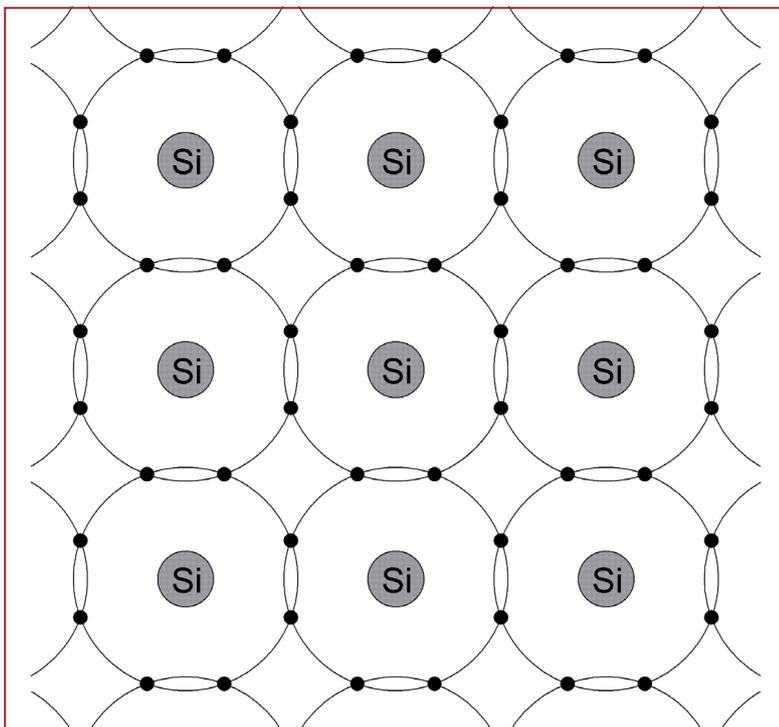


Figura 1 - Rappresentazione bidimensionale del reticolo cristallino per il silicio.

Tuttavia, nel silicio le bande di valenza e di conduzione non sono continue o parzialmente sovrapposte, come accade nei metalli, ma separate da un gap energetico (*band-gap* o *energy-gap*) che vale circa 1,12 eV a temperatura ambiente. Più in generale si può dire che nei metalli le bande di valenza e di conduzione sono parzialmente sovrapposte, per cui gli elettroni

più esterni sono anche liberi di muoversi liberamente nel reticolo. I metalli quindi sono buoni conduttori di elettricità. Negli isolanti le due bande sono invece separate ma il *band-gap* è così elevato che in condizioni normali non vi è in pratica alcuna possibilità che un elettrone possa saltare dalla banda di valenza a quella di conduzione. Ne discende l'incapacità degli isolanti di condurre energia elettrica. Nei semiconduttori infine, le due bande sono anche in questo caso separate, ma il *band-gap* è tale da permettere, in determinati casi, agli elettroni dei legami di valenza di raggiungere la banda di conduzione se dispongono di un'energia sufficiente. Nel caso del silicio quindi, perché un elettrone possa passare dalla banda di valenza a quella di conduzione è necessario che gli venga fornita una sufficiente quantità di energia, ad esempio sotto forma di radiazione luminosa. Si può anche dire che i semiconduttori si trovano in una zona intermedia tra i conduttori e gli isolanti, in quanto possono comportarsi in entrambi i modi a seconda delle condizioni in cui si trovano ad operare. Il passo successivo consiste nell'includere all'interno del reticolo alcuni atomi che hanno un numero di elettroni di valenza inferiore o superiore di uno rispetto al silicio. Nel primo caso si utilizzano atomi di tipo trivalente, come ad esempio il Boro, i

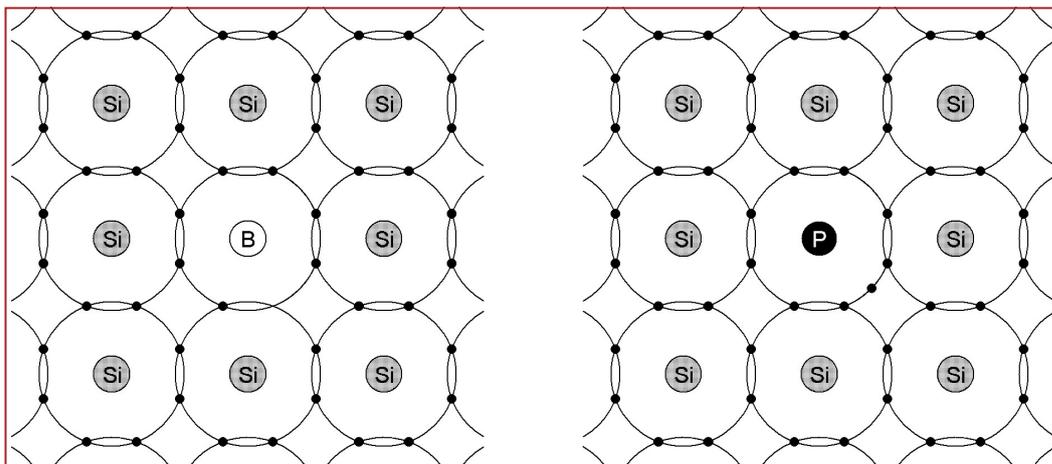


Figura 3.2 - Reticolo cristallino per il silicio dopato di tipo P (boro) e N (fosforo).

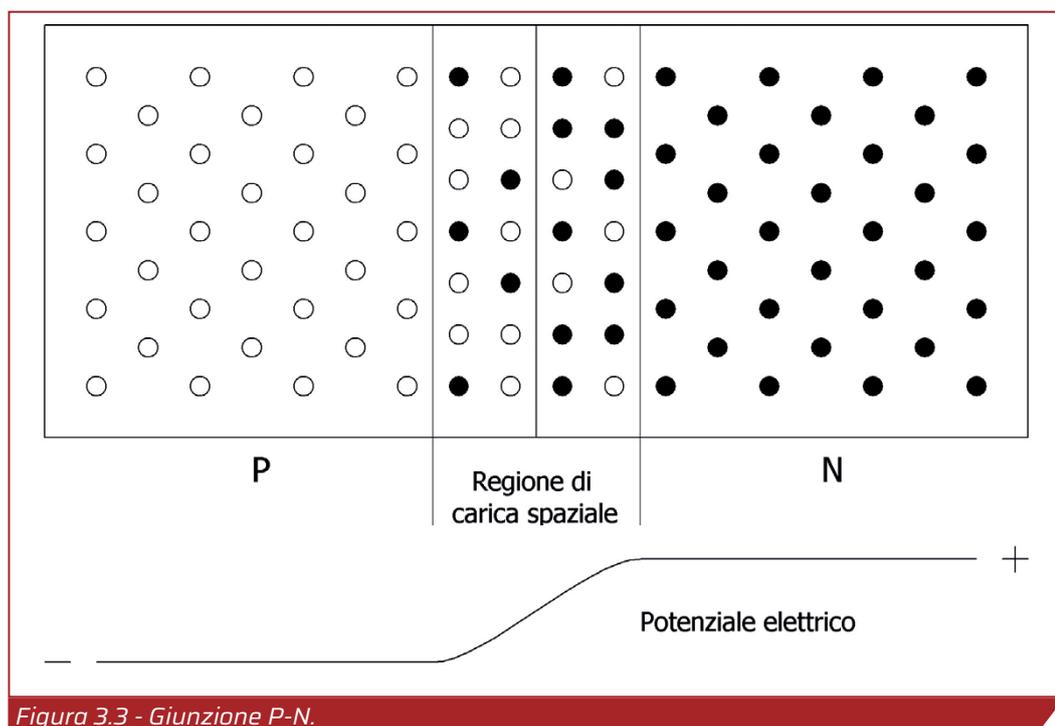


Figura 3.3 - Giunzione P-N.

quali nella struttura lasciano un posto vuoto o lacuna (semiconduttore dopato di tipo P). Nel secondo caso si utilizzano atomi di tipo pentavalente, come ad esempio il fosforo, i quali invece possiedono un elettrone in eccesso (semiconduttore dopato di tipo N). In entrambi i casi è possibile un movimento di cariche, e quindi il passaggio di elettricità, ma per motivi differenti: nel semiconduttore dopato di tipo P a spostarsi sono le lacune, mentre nel semiconduttore dopato di tipo N si è in presenza di elettroni in sovrannumero, i quali sono liberi di muoversi nel reticolo perché presenti nella banda di conduzione.

Quindi, per riassumere, il cristallo di Silicio intrinseco, nel quale non sono presenti impurità, in condizioni normali non è in grado di condurre perché gli elettroni più esterni sono tutti impegnati nei legami con gli atomi vicini e non possiedono una energia sufficiente per muoversi nel reticolo.

Se invece all'interno del reticolo sono presenti impurità di tipo P, si creano delle lacune che si possono muovere anche nei livelli energetici occupati dagli elettroni

impegnati nei legami atomici (banda di valenza). Il cristallo è quindi in grado di condurre elettricità in quanto a muoversi sono le lacune. Queste ultime, poiché rappresentano la mancanza di altrettanti elettroni (che hanno carica negativa), sono assimilabili a cariche positive.

Le impurità di tipo N, al contrario, introducono elettroni in sovrannumero che a temperatura ambiente hanno un livello energetico tale da portarli nella banda di conduzione. Questi elettroni sono liberi di muoversi nel reticolo e quindi di condurre elettricità.

La giunzione P-N

Da quanto abbiamo visto, nei semiconduttori è possibile avere due diversi tipi di conduzione dell'elettricità: per lacune nella banda di valenza e per elettroni nella banda di conduzione. È però interessante notare cosa succede quando questi materiali, resi differenti dal tipo di impurità in essi contenute, vengono a contatto. Nel caso più semplice, mettendo a contatto un cristallo di tipo P con uno di tipo N otteniamo la giunzione P-N schematizzata in figura 3.3.



I semiconduttori si trovano in una zona intermedia tra i conduttori e gli isolanti



Le celle fotovoltaiche hanno forma e dimensioni appositamente studiate per sfruttare al massimo tutta la luce solare incidente e quindi, a differenza dei diodi, hanno uno sviluppo superficiale molto ampio

Immaginando di realizzare una unione ideale tra i due cristalli (come vedremo, industrialmente le cose vanno un po' diversamente) le lacune nel cristallo di tipo P tenderanno a distribuirsi anche nel cristallo di tipo N, così come gli elettroni liberi nel cristallo di tipo N tenderanno a loro volta a diffondersi nel cristallo di tipo P. Tuttavia questo spostamento di cariche di segno opposto ha l'effetto di polarizzare il cristallo nel suo complesso, creando quindi una forza antagonista al moto di diffusione. Tale moto di diffusione si arresta quando il potenziale elettrico generato è tale da controbilanciare il potenziale elettrico generato dallo spostamento di cariche, il quale ha pertanto un'ampiezza limitata.

La zona a cavallo della giunzione nella quale risulta confinato lo spostamento di cariche prende il nome di regione di carica spaziale.

La giunzione P-N di *figura 3.3* corrisponde al componente più semplice, ossia al diodo. Polarizzando la giunzione in modo diretto, positivo sul P e negativo sul N, e con una tensione almeno pari al potenziale elettrico interno, il moto delle cariche diventa allora possibile e il componente è in grado di condurre elettricità. Viceversa, se polarizziamo il diodo in senso inverso andiamo a incrementare il potenziale elettrico interno e quindi il passaggio di cariche risulta bloccato.

La cella fotovoltaica è anch'essa una giunzione P-N ma è realizzata in modo tale da essere attraversata dal flusso luminoso, diventando così produttrice di energia elettrica.

Per capire, molto semplicemente, come questo possa avvenire occorre vedere la radiazione luminosa come un insieme di onde elettromagnetiche con una natura quantizzata, composta quindi da un flusso di fotoni, il cui numero dipende dall'intensità luminosa e il cui contenuto energetico dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione associata a ciascuno di essi. Il contenuto energetico E è proporzionale

alla frequenza ν della radiazione associata, ossia inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda λ , secondo la relazione:

$$E = h \cdot \nu$$

dove:

E = è misurato in Joule [J];

h = costante di Plank, pari a $6,626 \cdot 10^{-34}$ J · s.

La frequenza a sua volta è pari a $\nu = c/\lambda$; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s è il valore approssimato della velocità della luce nel vuoto.

Quando i fotoni attraversano il reticolo cristallino di una giunzione P-N impattano con gli atomi del reticolo e, se possiedono energia sufficiente, sono in grado di liberare una coppia elettrone/lacuna, ossia fanno passare l'elettrone nella banda di conduzione e nel contempo il suo posto rimane vacante, formando quindi una lacuna nella banda di valenza.

Come schematizzato in *figura 3.4*, le coppie elettrone/lacuna che si formano per effetto dei fotoni incidenti sono soggette al potenziale elettrico interno alla giunzione, per cui gli elettroni sono attratti dalla zona di tipo N mentre le lacune subiscono l'attrazione della zona di tipo P.

Questo movimento di cariche si traduce in una corrente elettrica che trasforma la giunzione P-N in un generatore con il polo positivo sul lato P e quello negativo sul lato N. Ovviamente, le celle fotovoltaiche hanno forma e dimensioni appositamente studiate per sfruttare al massimo tutta la luce solare incidente e quindi, a differenza dei diodi, hanno uno sviluppo superficiale molto ampio.

Come abbiamo visto, nel cristallo di silicio il passaggio di un elettrone dalla banda di conduzione a quella di valenza per opera di un fotone richiede una certa quantità di energia E_g che, nel caso specifico, è di circa 1,12 eV a temperatura ambiente, che corrisponde a circa $1,8 \cdot 10^{-19}$ J, dato che la carica dell'elettrone e è pari a $1,602 \cdot 10^{-19}$ C, infatti E_g [J] = $e \cdot E_g$ [eV].

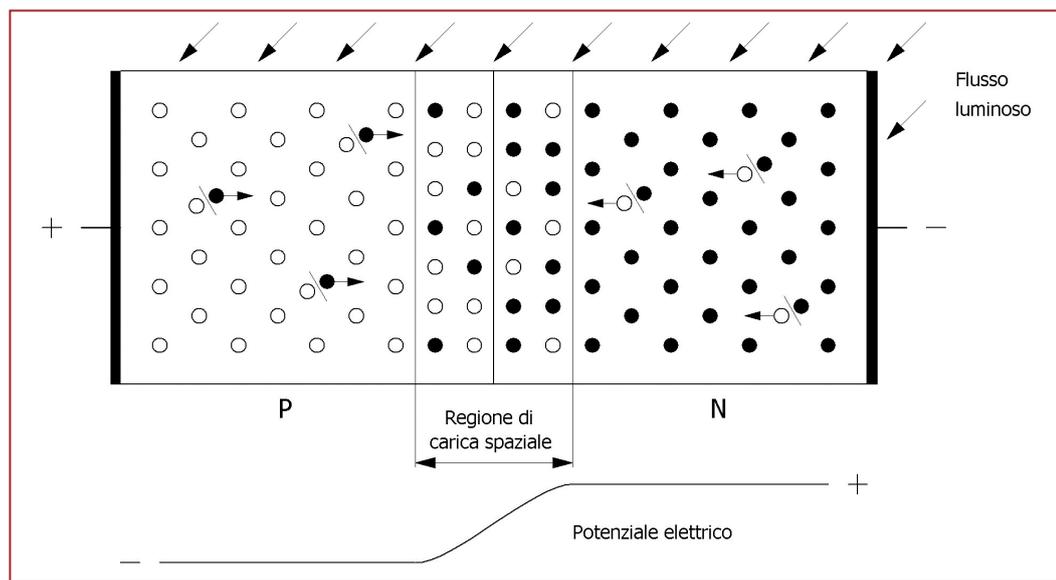


Figura 3.4 - Giunzione P-N esposta alla luce.

Applicando le formule viste precedentemente si ottiene $\lambda = h \cdot c / E_g$ e quindi un valore di lunghezza d'onda di 1,11 μm . I fotoni con lunghezza d'onda maggiore di questo valore non sono in grado di contribuire alla conversione fotovoltaica. Complessivamente, questa frazione eccedente, con fotoni aventi quindi energia insufficiente, corrisponde a circa il 25% dell'energia contenuta nello spettro solare. Nel caso del silicio cristallino, il rimanente 75% risulta pertanto in grado di liberare coppie elettrone-lacuna.

Tuttavia, con il diminuire della lunghezza d'onda ai fotoni risulta associata un'energia sempre maggiore, ma in eccesso rispetto a quella richiesta. La parte eccedente va inevitabilmente persa e quindi trasformata in calore. Su questa base, il diagramma di figura 3.5 mostra la quantità di energia fotovoltaica teoricamente ricavabile con una cella in silicio a partire dalla radiazione solare con distribuzione spettrale AM 1.5. Per quanto visto, in questo caso, la radiazione utile si aggira intorno a poco meno del 50% di quella incidente sulla cella. Questo valore deve essere poi ulteriormente ridimensionato per via dell'Efficienza Quantica del materiale, la quale fa sì che, comunque, anche lo sfrutta-

mento dei fotoni con *band-gap* sufficiente non sia sempre pari al 100% in tutto l'intervallo di radiazione ammissibile.

Vi sono poi altri due fenomeni che abbassano ulteriormente il limite dell'efficienza di cella: il primo ha a che fare con la ricombinazione delle coppie elettrone-lacuna prima che queste contribuiscano alla generazione di corrente elettrica; il secondo è legato all'*Impedance matching* e quindi al *Fill factor*. Da qui la teoria del limite di Shockley-Queisser, secondo cui una cella a singola giunzione tra anodo e catodo, non può avere un'efficienza maggiore del 33,7% con un *energy-gap* ideale, il quale nelle celle al silicio scende al 32%. Alcuni recenti studi tendono però a mettere in discussione la correttezza di questi limiti.

In una cella reale intervengono inoltre una serie di perdite, alcune delle quali possono essere così riassunte:

- non tutti i fotoni incidenti sulla cella penetrano al suo interno, alcuni sono riflessi e altri sono intercettati dall'elettrodo frontale;
- una certa quantità di coppie elettrone-lacuna si ricombinano prima che possano essere separate dal campo elettrico interno; la presenza di impurità favorisce questo fenomeno;



la teoria del limite di Shockley-Queisser, secondo cui una cella a singola giunzione tra anodo e catodo, non può avere un'efficienza maggiore del 33,7% con un *energy-gap* ideale, il quale nelle celle al silicio scende al 32%.

- parte dell'energia potenziale posseduta dalle coppie elettrone-lacuna separate dal campo elettrico risulta inefficace e va persa;
- l'elettrodo frontale, dovendo oscurare il meno possibile la cella, presenta una certa resistenza elettrica.

Il silicio in forma cristallina è di gran lunga il semiconduttore più utilizzato nel fotovoltaico, tuttavia se al posto del Silicio si utilizzasse il Germanio (impiegato solo nei film sottili per via del costo elevato) il band-gap scenderebbe da 1,12 eV del Silicio a circa 0,62 eV, permettendo quindi di convertire la radiazione con lunghezza d'onda fino a 2.0 μm .

La tecnologia a film sottile utilizza poi anche altri materiali, anche di tipo binario (ad esempio Arseniuro di Gallio GaAs, Telloruro di Cadmio CdTe), ternario e quaternario (ad esempio il Diseleniuro di Indio e Gallio). In questi casi si ricorre quasi sempre a eterogiunzioni, cioè a giunzioni P-N formate da materiali differenti.

Le celle fotovoltaiche in silicio cristallino

Attualmente, più del 90% delle celle fotovoltaiche commercializzate a livello mondiale sono realizzate in Silicio cristallino e

quindi il loro principio di funzionamento è basato su quanto finora visto relativamente al comportamento della giunzione P-N in presenza di radiazione solare.

Le celle fotovoltaiche in silicio cristallino sono ottenute da cristalli di grandi dimensioni, dai quali vengono tagliate delle fette di spessore molto sottile (150 ÷ 200 μm) attraverso un processo di *slicing* per mezzo di macchine da taglio a filo diamantato. Il materiale di partenza, nel caso del silicio monocristallino, è costituito da lingotti di forma cilindrica ottenuti per estrazione e solidificazione da un bagno di silicio fuso (metodo Czochralski). Come si può vedere in *figura 3.6*, è possibile ottenere lingotti di vario diametro e lunghezza che possono essere utilizzati per intero dopo aver eliminato le parti terminali.

In questo modo si ottengono delle celle di forma circolare, le quali vengono poi opportunamente tagliate in modo da fare loro assumere una forma quadrata o rettangolare, così da potere meglio sfruttare lo spazio disponibile quando le celle sono disposte affiancate in un modulo fotovoltaico.

Un metodo più semplice, che permette di ottenere un cristallo di silicio delle dimensioni volute, consiste nel fondere dei pezzi di silicio di qualsiasi forma e dimensione, purché di sufficiente purezza, in un crogiuolo a forma di parallelepipedo e lasciare solidificare successivamente la massa liquida così ottenuta. In questo modo però si formano più cristalli, diversamente orientati e quindi il semiconduttore così ottenuto risulta essere meno performante rispetto a quello fatto derivare da un unico cristallo. Le celle in silicio policristallino successivamente ottenute, sono riconoscibili per la superficie non omogenea, dovuta alla presenza di cristalli orientati diversamente, e per la forma perfettamente quadrata. Le celle monocristalline invece, presentano spesso gli spigoli arrotondati perché i costruttori tendono ad evitare l'eccessiva asportazione di materiale dalla

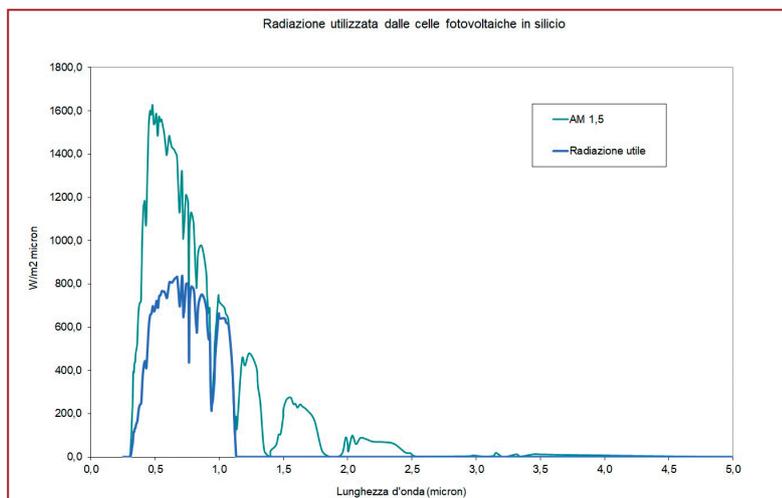


Figura 3.5 - Porzione della radiazione solare teoricamente utilizzabile dalle celle in silicio.



Figura 3.6 - Lingotti di silicio monocristallino di vari diametri.

cella originaria di forma circolare. Riguardo allo spessore della cella, va osservato che il Silicio cristallino è un semiconduttore a *band-gap* indiretto, nel quale cioè il minimo di energia della banda di conduzione in funzione della quantità di moto dell'elettrone non corrisponde al massimo della banda di valenza. Questo significa che il passaggio dell'elettrone dalla banda di conduzione a quella di valenza richiede non soltanto un sufficiente apporto energetico da parte del fotone, che come si è visto è pari ad almeno 1,12 eV, ma anche una quantità di moto compatibile per l'elettrone che deve effettuare il passaggio. La presenza del *band-gap* indiretto abbassa quindi la probabilità che il fotone possa trovare un atomo con caratteristiche idonee e di conseguenza richiede l'attraversamento di uno spessore sufficiente affinché la formazione della coppia elettrone/ lacuna possa avvenire con successo. Questa esigenza è tanto più importante quanto più la lunghezza d'onda si avvicina al limite fisico di 1,12 eV in quanto le lunghezze d'onda con contenuto energetico più elevato riescono comunque a superare *band-gap* maggiori. Per questo motivo, lo spessore di una cella in silicio cristallino non può scendere al di sotto di un determinato valore, pari a circa 100 μm . altre considerazioni legate alla robustezza della cella fanno poi sì che normal-

mente siano utilizzati spessori maggiori. Altri semiconduttori invece, come ad esempio il germanio, l'arseniuro di gallio e l'arseniuro di indio sono a *band-gap* diretto e quindi si prestano alla realizzazione di celle a film sottile dello spessore che normalmente non supera alcuni μm .

I film sottili

Come si è visto, le celle al silicio tradizionali hanno uno spessore che difficilmente può scendere al di sotto di certi valori ($\approx 100 \mu\text{m}$) sia a causa del *band-gap* indiretto che per problemi di fragilità del cristallo.

Vi è tuttavia una grande quantità di materiali semiconduttori che, disponendo invece di *band-gap* diretto, sono in grado di convertire la luce solare in spessori molto più piccoli, tipicamente non superiori a qualche μm , e quindi richiedono un dispendio di materiale semiconduttore di gran lunga inferiore.

La realizzazione di queste celle richiede la presenza di un supporto che assicuri un certo grado di robustezza meccanica, sul quale sia possibile depositare gli strati che compongono la cella ed effettuare le necessarie incisioni che ne permettono il collegamento con le celle adiacenti e con l'esterno.

Ovviamente, le operazioni di deposizione del materiale semiconduttore, così come tutte le altre operazioni, avvengono sotto vuoto o in atmosfera controllata al fine di evitare contaminazioni.



La presenza del *band-gap* indiretto abbassa quindi la probabilità che il fotone possa trovare un atomo con caratteristiche idonee

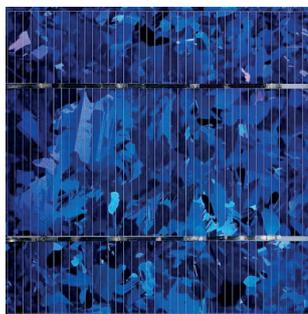


Figura 3.7 - Cella policristallina (a sinistra) e monocristallina (a destra).

Al minore impiego di materiale semiconduttore che si riscontra nei film sottili si contrappone però spesso il maggior costo e la più difficile reperibilità delle materie prime. Inoltre, l'efficienza di conversione è generalmente inferiore e quindi alla fine il costo specifico dell'energia prodotta non si discosta molto da quello delle celle in silicio cristallino. Infine, la presenza di sostanze potenzialmente pericolose per la salute richiede in molti casi una particolare attenzione per il riciclo e lo smaltimento, che talvolta porta le autorità locali a emanare prescrizioni restrittive circa l'utilizzo di queste tecnologie negli impianti fotovoltaici.

Il substrato con la funzione di supportare la deposizione degli strati è in genere trasparente, così da far passare la radiazione solare incidente sulla cella.

Di grande importanza è allora il contatto superficiale sulla faccia esposta alla luce, che deve essere anch'esso quanto più trasparente possibile, pur essendo elettricamente conduttivo. Per questa funzione si usano normalmente degli ossidi conduttivi denominati TCO (*Transparent conducting oxide*).

Celle CIGS (Copper-Indium-Gallium-Selenium)

Le celle CIGS sono composte da rame, indio, gallio e selenio, ossia da elementi dei gruppi I-III-IV della tavola periodica. Il materiale che compone queste celle è costituito da una soluzione solida di seleniuro di indio e rame (CIS) e seleniuro di gallio e rame. Si ottiene così un semiconduttore che presenta legami tetraivalenti con la struttura cristallina della Calcopirite. Il band-gap varia linearmente a seconda della composizione da 1.0 eV (seleniuro di indio e rame) fino a circa 1.7 eV (seleniuro di gallio e rame).

La figura 3.8 mostra la tipica struttura semplificata di una cella CIGS realizzata a partire da un substrato di vetro sodico-calcico dello spessore di alcuni millimetri, il

cui contenuto di sodio sembra sia in grado di incrementare la tensione a vuoto della cella. È comunque possibile utilizzare altri substrati, anche flessibili, come ad esempio resine poliammidiche o fogli metallici. Sul substrato viene depositato un sottile strato di molibdeno (Mo) con la funzione di contatto posteriore. Esso è inoltre in grado di riflettere la maggior parte della luce non ancora utilizzata verso lo strato semiconduttore.

Lo strato di CIGS di tipo P rappresenta l'assorbitore, al di sopra del quale è depositato un sottile strato di solfuro di cadmio (CdS) di tipo N (nel disegno è indicato uno strato di soli 700 Å, ossia 0,07 μm). Infine, lo strato TCO è realizzato con la deposizione di ossido di zinco (ZnO) dopato con alluminio. Il sandwich è poi completato con un rivestimento superiore di protezione, costituito da una lastra di vetro nel caso dei moduli rigidi.

CdTe (Cadmium Telluride)

La cella solare CdTe maggiormente impiegata (Figura 3.9) consiste in una semplice eterogiunzione P-N composta da uno strato di telluriuro di cadmio di tipo P a contatto con uno strato di solfuro di cadmio di tipo N che funziona anche come strato finestra. Il band-gap della cella così ottenuta è di circa 1,5 eV.

Sulla parte frontale, la cella è ricoperta da uno strato conduttivo TCO solitamente realizzato con ossido di stagno dopato



Le operazioni di deposizione del materiale semiconduttore, così come tutte le altre operazioni, avvengono sotto vuoto o in atmosfera controllata al fine di evitare contaminazioni

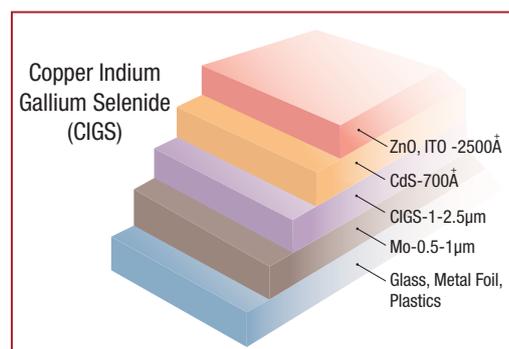


Figura 3.8 - Struttura della cella CIGS (NREL).

con fluoro. Il contatto posteriore è invece realizzato con uno strato di metallo o carbonio addizionato di rame (Cu). Il rame ha tuttavia lo svantaggio di diffondersi gradualmente e accumularsi negli strati di CdTe e CdS, degradando col tempo il funzionamento del dispositivo.

Silicio amorfo

Le celle fotovoltaiche in silicio amorfo hanno tipicamente una struttura P-i-N nella quale gli strati N e P sono utilizzati per realizzare il campo elettrico interno e fra di essi è interposto un sottile strato di silicio intrinseco. L'aggiunta di atomi di idrogeno nella struttura migliora le caratteristiche fotoconduttive del materiale. Il band-gap è normalmente pari a 1,7 eV.

Le celle in silicio amorfo hanno un rendimento piuttosto basso, inferiore al 10%, accentuato da un declino dovuto all'esposizione prolungata alla radiazione solare chiamato *Staebler-Wronski effect* (SWE) e che normalmente risulta compreso tra il 10% e il 30%. Attualmente, è stato possibile incrementare l'efficienza di questi dispositivi abbinando deposizioni di silicio microcristallino con altre di silicio amorfo e in alcuni casi ricorrendo a celle *tandem* con più giunzioni aventi *band-gap* differenti.

Le multigiunzioni

Abbiamo visto che il limite di Shockley-Queisser rappresenta il valore di efficienza di conversione della radiazione

solare al di sopra del quale una data cella fotovoltaica non può andare.

Tale limite dipende dal *band-gap* dei materiali semiconduttori che compongono la cella, come si può vedere nella *figura 3.10*, nella quale si può anche notare che il silicio cristallino si trova in una zona particolarmente favorevole.

Tuttavia, se si vuole superare il limite di efficienza imposto alla curva limite, risulta necessario ricorrere a celle fotovoltaiche composte da più celle elementari, ognuna delle quali converte la frazione della radiazione solare che le compete. Le celle multigiunzioni, essendo realizzate con materiali semiconduttori diversi, hanno *band-gap* multipli e sono quindi in grado di convertire meglio tutto lo spettro solare. Ad esempio, alcuni autori hanno mostrato che in una cella composta da due giunzioni i *band-gap* ideali sarebbero, rispettivamente, 0,77 eV e 1,70 eV.

È stato osservato, in determinate condizioni, che le frazioni della radiazione solare aventi energia inferiore al *band-gap* del materiale che stanno attraversando non interagiscono significativamente col materiale stesso. Questo significa che è possibile realizzare celle multigiunzioni disponendo diverse celle una sopra l'altra, purché la cella sensibile alle lunghezze d'onda inferiori (quindi con più elevato *band-gap*) sia posta più in alto (cella *Top*) e le rimanenti siano disposte in sequenza con lunghezza d'onda crescente (*band-gap* decrescente) fino alla cella *Bottom*. La corrente generata da ciascuna cella deve passare attraverso strati di materiale conduttore trasparente alla luce.

La produzione di celle multigiunzioni non è un compito facile per via della estrema sottigliezza dei materiali impiegati e della difficoltà di trasportare la corrente prodotta da uno strato all'altro. In alcuni casi, la soluzione più semplice consiste nell'utilizzare due o più celle a film sottile fisicamente separate e collegarle tra di loro.



Le celle in silicio amorfo hanno un rendimento piuttosto basso, inferiore al 10%,

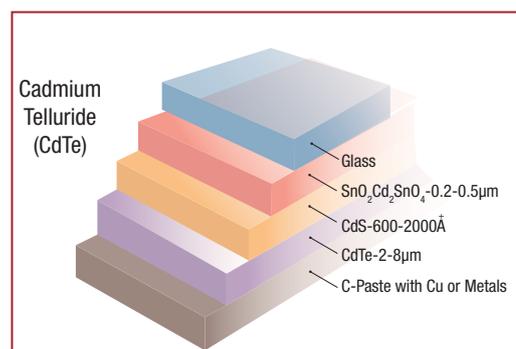


Figura 3.9 - Struttura della cella CdTe (NREL).

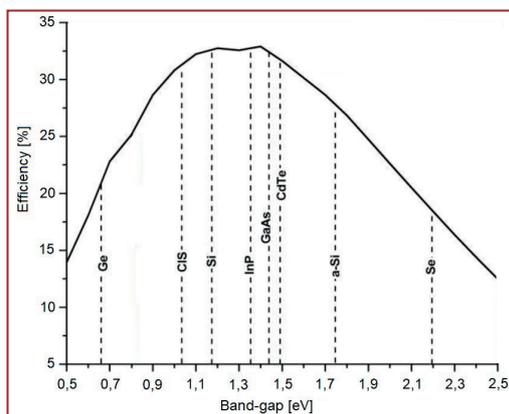


Figura 3.10 - Efficienza limite di Shockley-Queisser per alcuni tipi di giunzioni a $1\,000\text{ W/m}^2$ e curva AM 1.5.

Questa tecnica è stata utilizzata con il silicio amorfo per incrementarne l'efficienza ma, almeno finora, non sembra dare apprezzabili risultati anche per le celle più performanti.

I risultati migliori si ottengono invece con l'impiego delle celle monolitiche che consistono in una serie di strati che realizzano un naturale collegamento meccanico ed elettrico. Queste celle, dette celle *Tandem*, sono molto più difficili da produrre perché le caratteristiche di ciascuno strato devono essere perfettamente compatibili con quelle degli strati adiacenti.

La scelta dei materiali utilizzati in ciascuno strato richiede infatti che siano soddisfatte sia la compatibilità reticolare che quella elettrica. Sono inoltre richieste elevate qualità opto elettroniche. Dal punto di vista del reticolo cristallino, le differenze tra uno strato e l'altro devono essere minime per evitare difetti di cristallizzazione e il conseguente degrado delle proprietà elettroniche. Poiché le singole giunzioni sono collegate elettricamente in serie, la stessa corrente passa attraverso ciascuna di esse. I materiali semiconduttori, come si è visto, sono ordinati per *band-gap* decrescente, permettendo alla luce avente energia inferiore a quella richiesta ($h \cdot c / \lambda < e \cdot E_g$) di arrivare alle giunzioni sottostanti.

In una cella multigiunzione è importante scegliere i band-gap delle singole giunzioni in modo tale che queste siano in grado di produrre la stessa corrente, evitando quindi che si verifichino sbilanciamenti.

In figura 3.11 è visibile un esempio di struttura di cella solare a tripla giunzione, nella quale la cella *Top* è di indio-gallio-fosforo (InGaP), quella *Middle* è di arseniuro di gallio e indio (InGaAs) e quella *Bottom* è di germanio (Ge). Sulla sommità vi è un rivestimento trasparente antiriflettente assieme ai contatti elettrici frontali, mentre sul retro vi è un unico contatto posteriore.

Di estrema importanza sono i due collegamenti tra le singole giunzioni, che non devono dare luogo a giunzioni polarizzate in senso inverso. Per evitare questo fenomeno si ricorre a strati di semiconduttore maggiormente dopati, indicati come *Back Surface Field* e *Window*, che in questo modo danno luogo a giunzioni *Tunnel*, le quali permettono il passaggio di corrente nella direzione voluta.

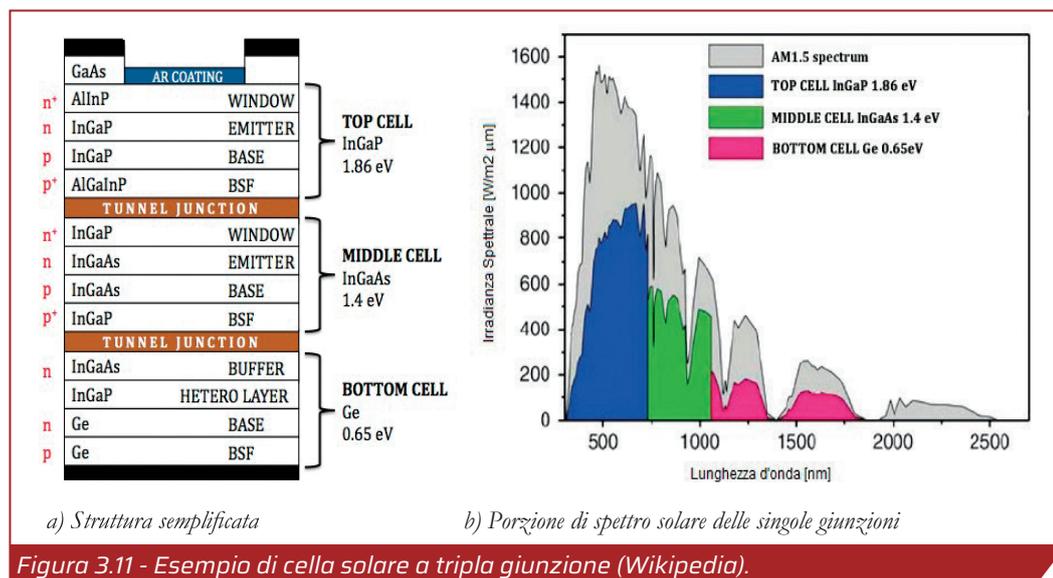
Utilizzando 3 giunzioni in serie è stato possibile realizzare celle con un'efficienza misurata in laboratorio superiore al 41%, mentre con 4 giunzioni è stato possibile arrivare al 46%. In generale, questi risultati si ottengono in condizioni di luce solare concentrata. A livello mondiale, risultati significativi sono stati raggiunti da Fraunhofer-ISE, Spectrolab e NREL, mentre in Italia si segnalano CESI e RSE.

La cella fotovoltaica e la sua modellizzazione

In figura 3.12 è riportata la curva tensione-corrente per una cella fotovoltaica. La forma tipica in questo caso è quella del silicio cristallino, i film sottili hanno spesso una curvatura centrale meno accentuata. Per il tracciamento si mantengono costanti irraggiamento solare e temperatura, facendo invece variare tensione e corrente. Normalmente, la curva caratteristica dei



In una cella multigiunzione è importante scegliere i band-gap delle singole giunzioni in modo tale che queste siano in grado di produrre la stessa corrente, evitando quindi che si verifichino sbilanciamenti.



dispositivi fotovoltaici si riferisce a condizioni di prova standard STC (*Standard Test Conditions*) definite dalla CEI EN 61215-2 con irraggiamento incidente di 1000 W/m², temperatura di cella di 25 °C e composizione spettrale pari a AM 1.5 secondo la CEI EN IEC 60904-3.

La condizione di lavoro ottimale è rappresentata dal punto sulla curva in cui tensione e corrente ai capi della cella assumono, rispettivamente, i valori V_m e I_m , ossia i valori per i quali la potenza elettrica prodotta risulta massima. Le intersezioni della curva con gli assi corrispondono invece ai valori di corrente di corto circuito (I_{sc}) e tensione a vuoto (V_{oc}). In entrambi i casi la potenza prodotta è pari a zero.

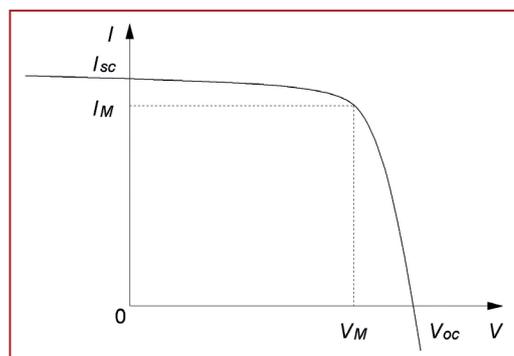


Figura 3.12 - Curva tensione-corrente di una cella fotovoltaica in silicio cristallino.

Un parametro importante per la valutazione dell'efficienza di una cella fotovoltaica è il *Fill Factor* (FF), il quale è espresso nel modo seguente:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Quindi il *Fill Factor* è pari al rapporto tra l'area del rettangolo delimitato da V_m e I_m e l'area del rettangolo delimitato da V_{oc} e I_{sc} . Il valore del *FF* è sempre inferiore all'unità e, poiché l'efficienza elettrica della cella η_c è dato dal rapporto tra la potenza elettrica prodotta e l'irraggiamento incidente, ossia, $\eta_c = V_m \cdot I_m / G$ con alcuni passaggi otteniamo:

$$\eta_c = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{G}$$

In questo modo si comprende come il *Fill Factor* intervenga direttamente nell'espressione dell'efficienza di conversione della cella.

Modello elettrico

Dal punto di vista elettrico, negli anni si è cercato di sviluppare un modello della cella fotovoltaica che tenesse conto della fisica del semiconduttore impiegato e delle caratteristiche costruttive del componente. Tra i vari modelli proposti quello di figura 3.13 a singolo diodo si è rivelato suf-



La forma tipica in questo caso è quella del silicio cristallino, i film sottili hanno spesso una curvatura centrale meno accentuata



Si tratta di determinare i 5 parametri incogniti che permetterebbero la soluzione dell'equazione che governa il modello della cella fotovoltaica

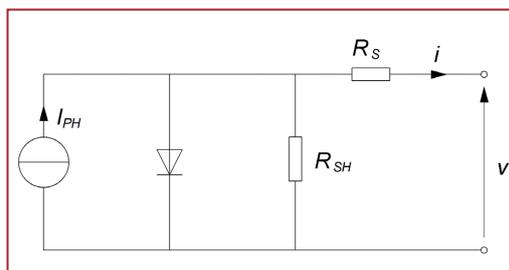


Figura 3.13 - Modello elettrico della cella fotovoltaica

ficientemente preciso, almeno per la maggioranza dei casi, pur rimanendo piuttosto semplice. Il modello in figura è governato dalla seguente equazione:

$$I = I_{PH} - I_S \cdot \left(e^{\frac{q(v+I \cdot R_S)}{N \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{v+I \cdot R_S}{R_{SH}}$$

Nella quale compaiono le seguenti costanti: $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C (carica elettrica dell'elettrone); $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K (costante di Boltzmann).

E i seguenti parametri incogniti:

- I_S = Corrente di saturazione del diodo;
- N = Fattore di qualità (idealità) del diodo;
- I_{PH} = Corrente impressa dal generatore;
- R_{SH} = Resistenza in parallelo al diodo;
- R_S = Resistenza in serie alla cella.

Nella pratica, si tratta di determinare i 5 parametri incogniti che permetterebbero la soluzione dell'equazione che governa il modello della cella fotovoltaica. Sull'argomento, in letteratura sono stati proposti diversi metodi basati su approcci simulativi e iterativi.

Effetto dell'irraggiamento e della temperatura

La curva tensione-corrente della cella fotovoltaica in condizioni diverse da quelle STC prima viste dipende, come è facile prevedere, principalmente dall'irraggiamento solare. In figura 3.14 è mostrata una famiglia di curve ottenute facendo variare l'irraggiamento solare sulla cella e tenendo costanti gli altri parametri.

Come si vede, la modifica dell'irraggiamento rispetto alle condizioni STC incide principalmente sulla corrente prodotta e, in misura molto minore, sulla tensione ai capi della cella stessa.

Una importante ipotesi, che spesso rimane sottintesa nei calcoli fotovoltaici, è quella della linearità tra la potenza massima ottenibile da un dispositivo fotovoltaico, come nel caso della cella fotovoltaica, e l'irraggiamento solare incidente. In molti casi si tratta di un'approssimazione accettabile, ma va sempre tenuto presente che non sempre le celle fotovoltaiche esposte a basso irraggiamento presentano la stessa efficienza di quando invece sono in condizioni STC.

Se invece si tiene costante l'irraggiamento solare e si varia la temperatura di cella la curva si modifica anche in questo caso, ma in misura molto minore rispetto a quando si agisce sull'irraggiamento.

La variazione in funzione della temperatura è apprezzabile soprattutto sulla tensione, in particolare la tensione a vuoto, mentre la corrente subisce delle variazioni più modeste.

Le celle in silicio cristallino in particolare, ma anche molte celle in film sottile, all'au-

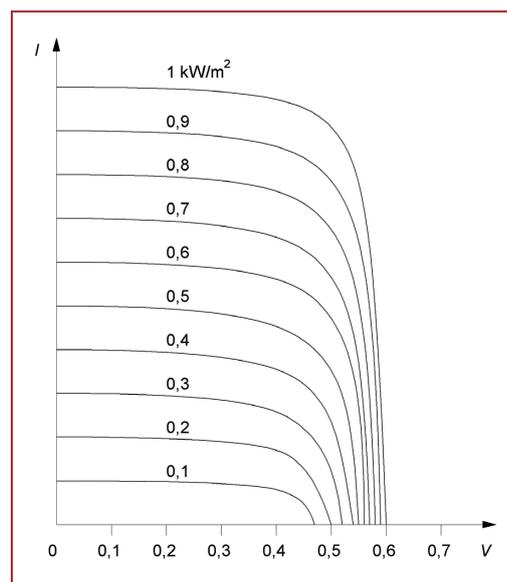


Figura 3.14 - Esempio di curve tensione-corrente al variare dell'irraggiamento solare.

mentare della temperatura diminuiscono la propria tensione a vuoto e aumentano di poco la corrente di cortocircuito. Nei punti intermedi della curva il risultato è un mix di questi due effetti, come si può vedere dalla *figura 3.15*.

Poiché la diminuzione della tensione all'aumentare della temperatura è prevalente rispetto all'aumento della corrente, la potenza massima estraibile dalla cella

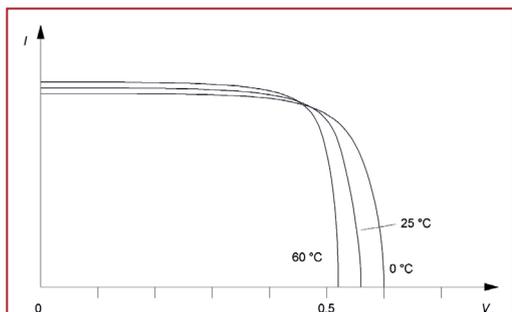


Figura 3.15 - Esempio di curve tensione-corrente al variare della temperatura di cella.

Coefficiente	Parametro	U.M. valore assoluto	U.M. valore relativo
α	I_{sc}	mA/K	%/K
β	V_{oc}	mV/K	%/K
γ	P_m	mW/K o W/K	%/K

Tabella 3.1 - Tabella dei coefficienti di temperatura utilizzati per i dispositivi fotovoltaici

fotovoltaica diminuisce con l'aumentare della temperatura.

La dipendenza del comportamento della cella in funzione dalla temperatura non è sempre lineare, tuttavia nei calcoli si tiene normalmente conto della variazione dei parametri principali rispetto alle condizioni STC per mezzo dei coefficienti α , β , γ definiti nella *tabella 3.1*.

Sui *data-sheet* dei componenti fotovoltaici è possibile trovare i coefficienti α , β , γ riportati in valore assoluto o, più frequentemente, in valore relativo percentuale.

Continua...