FONTI RINNOVABILI

La conversione dell'**energia** solare

PROCEDE, ENTRANDO SEMPRE PIÙ NEL DETTAGLIO, LA SERIE DI ARTICOLI SUL FOTOVOLTAICO: IN QUESTO NUMERO, I PROCESSI DI CONVERSIONE DELL'ENERGIA SOLARE IN ENERGIA ELETTRICA E LE DIVERSE TIPOLOGIE DI CELLE FV

di FRANCESCO GROPPI

ome si è visto negli articoli precedenti, il fotovoltaico si distingue dagli altri sistemi di sfruttamento dell'energia solare perché la radiazione luminosa viene convertita direttamente in energia elettrica, ossia in un moto di cariche all'interno di un mezzo conduttore.

Numerose sostanze presentano caratteristiche fotoelettriche, ma in pratica solo alcune permettono di essere sfruttate efficacemente in applicazioni reali.

Per introdurre l'effetto fotovoltaico è opportuno analizzare il comportamento delle celle in silicio cristallino, per poi estendere le considerazioni fatte alle atre tipologie di celle.



olarizzazzione elettrica e la regione di carica spaziale

LA CELLA FOTOVOLTAICA

La cella fotovoltaica è l'elemento base di qualsiasi sistema fotovoltaico, in quanto in essa avviene la conversione della radiazione solare in energia elettrica.

La conversione fotovoltaica si ottiene sfruttando la giunzione a semiconduttore, la quale, nel caso del silicio (il quale è tetravalente, ossia dispone di 4 elettroni di valenza disponibili per i legami molecolari con altri atomi), è realizzata ponendo a contatto due cristalli, uno dei quali contiene atomi trivalenti (ad esempio di Boro), mentre l'altro contiene atomi pentavalenti (ad esempio Fosforo). Nel primo caso il cristallo è di tipo P (si dice anche che incorpora il drogante P), mentre nel secondo è di tipo N (drogante N).

Il cristallo contenente gli atomi trivalenti presenta nel reticolo delle lacune, cioè degli elettroni mancanti, mentre quello contenente gli atomi pentavalenti presenta degli elettroni in più. Sia le lacune dovute al drogante P che gli elettroni del drogante N sono liberi di muoversi nel reticolo cristallino.

Con riferimento alla figura 1, il contatto diretto dei due cristalli tende a far fluire gli elettroni in eccesso del cristallo N verso il cristallo P, formando una regione, detta di carica spaziale, nella quale le lacune sono colmate dagli elettroni. Il processo però ad un certo punto si ferma perché il campo elettrico che si genera a causa dello spostamento di cariche da un cristallo all'altro controbilancia il moto di diffusione. Ci si trova quindi di fronte ad una nuova condizione di equilibrio nella quale la giunzione P-N risulta polarizzata.

Immaginiamo a questo punto di esporre alla lu-

52

ce la giunzione P-N così ottenuta. La radiazione luminosa, purché di energia sufficiente, libera in tutto il cristallo delle coppie elettrone/lacuna, ossia fornisce ad alcuni elettroni l'energia sufficiente per muoversi liberamente nel reticolo, creando, nel contempo altrettanti posti vuoti (lacune).

In assenza della giunzione, questi nuovi elettroni si sposterebbero casualmente per poi ricombinarsi dopo qualche tempo con altrettante lacune. Invece, in presenza del campo elettrico creato dalla giunzione, gli elettroni sono attirati verso la zona N (caricata positivamente) e le lacune verso la zona P (caricata negativamente). Questo moto di cari-

che, schematizzato in figura 2, è all'origine della generazione elettrica fotovoltaica.

Purtroppo, non tutta la radiazione dello spettro solare è in grado di generare delle coppie elettrone/lacuna, in quanto solo i fotoni con energia sufficiente, cioè con lunghezza d'onda inferiore a 1,15 mm (nel caso del silicio), sono in grado di attivare questo fenomeno (1).

Pertanto, quelli con lunghezza d'onda superiore non contribuiscono alla generazione fotovoltaica.

Inoltre, poiché l'energia della radiazione aumenta al diminuire della lunghezza d'onda, spesso i singoli fotoni (nel visibile e ancor più nell'ultravioletto) possiedono un surplus di energia che va perso nella creazione della coppia elettrone/lacuna. Tutto questo fa si che vi sia un limite teorico alla conversione fotovoltaica per ogni singola giunzione, il quale, nel caso del silicio, è al di sotto del 50%.

A valle di questo limite teorico, all'interno della cella fotovoltaica vi sono altre sorgenti di inefficienza che ne abbassano ulteriormente il rendimento. Tra queste, le principali sono:

- non tutti i fotoni incidenti sulla cella penetrano all'interno, alcuni vengono riflessi e altri vengono intercettati dall'elettrodo frontale;
- alcune coppie elettrone/lacuna si ricombinano prima che queste possano essere separate dal campo elettrico interno della giunzione (queste perdite dipendono principalmente dal grado di purezza del silicio utilizzato);
- I'elettrodo frontale della cella presenta una certa resistenza in serie per l'esigenza di mediare tra la realizzazione di un buon contatto e il voler oscurare quanto meno possibile la superficie della cella esposta alla luce.

Il comportamento elettrico di una cella fotovoltaica può essere descritto con sufficiente approssimazione dalla formula seguente:





$$I = I_L - I_0 \cdot \left(e^{\frac{e \cdot V}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right)$$

dove:

- I e V sono, rispettivamente, la corrente che attraversa la cella e la tensione ai suoi capi
- I_L è la corrente generata per effetto fotoelettrico
- I_O è la corrente di saturazione, dipendente dalle caratteristiche del materiale semiconduttore che forma la cella
- e è la carica dell'elettrone = 1,602 ´ 10⁻¹⁹ Coulomb
- m è un coefficiente compreso tra 1 e 2, il quale dipende dai fenomeni di generazione e ricombinazione che avvengono nella zona di carica spaziale
- k è la costante i Boltzmann = 1,381 $^{-23}$ J/°K
- T è la temperatura in gradi Kelvin = [°C] + 273,15.

Osservando la curva tensione-corrente di una cella fotovoltaica irraggiata (nella figura 3 è visibile quella di una cella in silicio cristallino), si può notare che si ha a che fare con un dispositivo non lineare.

Nella curva è possibile evidenziare quattro parametri di particolare importanza:

- Corrente di corto circuito I_{SC} corrispondente a V = 0;
- Tensione a circuito aperto V_{OC}, corrispondente a l = 0;
- Tensione e corrente nel punto di massima potenza V_{Pmax} e I_{Pmax}

Nella figura 3 è anche visibile l'andamento della potenza ottenibile dalla cella al variare del caFigura 3: Esempio di curva caratteristica di una cella fotovoltaica in silicio cristallino



rico elettrico applicato e quindi della tensione e della corrente corrispondenti. L'andamento della potenza presenta un valore massimo in corrispondenza di Pmax.

Per il silicio cristallino, sia la tensione a circuito aperto che quella nel punto di massima potenza variano poco tra cella e cella, mantenendosi su valori di poco inferiori a 0,6 V il primo e 0,5 V il secondo. Viceversa, la corrente di corto circuito, così come quella nel punto di massima potenza, aumentano pressoché linearmente con la superficie della cella e col suo rendimento.

Un altro parametro indicatore frequentemente usato riguardo all'efficienza di conversione è il Fattore di riempimento o Fill factor (FF), definito come il rapporto fra la massima potenza e il prodotto della tensione a circuito aperto per la corrente di corto circuito.

$$FF = \frac{V_{Pmax} \cdot I_{Pmax}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

La cella fotovoltaica è tanto più efficiente quanto più il Fill factor è prossimo a 1 e quindi la curva tensione-corrente assume un aspetto rettangolare.

Nelle celle in silicio amorfo la curva tensionecorrente è più tondeggiante rispetto a quella che si riscontra nelle celle cristalline e pertanto il Fill factor è minore.

La curva di efficienza della cella fotovoltaica è tracciata mantenendo costanti l'irraggiamento e la temperatura, tanto che nei dati di targa ci si riferisce normalmente a condizioni STC.

Come si può vedere dalla figura 4, al variare dell'irraggiamento la curva trasla verso l'alto o verso il basso modificando, come già detto, in modo pressoché proporzionale $I_{SC} e I_{Pmax}$. I parametri $V_{OC} e V_{Pmax'}$ viceversa subiscono delle variazioni molto più contenute, tanto che in molti casi sono considerate trascurabili.

Sia V_{OC} che V_{Pmax} sono invece maggiormente influenzati dalla temperatura, come si può vedere dalla figura 5 (un aumento della temperatura provoca la loro diminuzione e viceversa), in ragione di circa –2,3 mV/°C per le celle in silicio cristallino(2), mentre la corrente è meno interessata dalle variazioni termiche.

CELLE IN SILICIO CRISTALLINO

Da un punto di vista costruttivo, le celle in silicio monocristallino sono ricavate da un unico cristallo a forma di lin-

gotto cilindrico, mentre quelle in silicio policristallino provengono dalla solidificazione della massa fusa di silicio in un crogiolo a forma di parallelepipedo, nel quale si formano più centri di aggregazione degli atomi con orientamenti tra loro differenti e casuali. Questa differenza si traduce in una maggiore efficienza delle celle monocristalline, che commercialmente arrivano al 16 - 20 %, mentre quelle in silicio policristallino hanno alcuni punti percentuali in meno. Ve aggiunto che le celle in silicio monocristallino, ottenute tagliando trasversalmente un singolo lin-



Figura 4: Variazione della curva caratteristica con la radiazione solare

V

54

gotto di silicio, sono riconoscibili per via degli angoli smussati che rivelano la sezione circolare del cristallo di partenza (figura 6).

Vi sono tuttavia altre modalità di produzione dei wafer in silicio monocristallino, tra cui quelle basate sull'estrusione di sottili lamine e successivo taglio a misura (String Ribbon). Queste tecnologie, sebbene meno diffuse in quanto adottate da un numero limitato di produttori, sono comunque disponibili in commercio.

Un'ulteriore variante, basata però in questo caso sull'utilizzo di normali wafer come elemento di partenza, è rappresentata dalle celle con contatti posteriori (celle Back Contacts). Portando i contatti anteriori sul retro è possibile liberare tutta l'area frontale e quindi incrementare l'efficienza complessiva. In effetti, i risultati ottenuti, anche su modelli commerciali, confermano la bontà di questa scelta che però comporta dei costi più elevati rispetto a soluzioni più tradizionali.

Sono inoltre disponibili moduli fotovoltaici realizzati con celle ibride formate da un wafer in silicio cristallino ricoperto su entrambi i lati da materiale amorfo. Le celle di questo tipo sono basate sul procedimento Heterojunction with Intrinsic Thin Layer (HIT). Anche in questo caso le efficienze ottenute sono decisamente interessanti ma, come nel caso precedente, i costi si mantengono su livelli maggiori rispetto alla tecnologia tradizionale. Le celle in silicio policristallino, come si è detto, non sono costituite da un unico cristallo e pertanto il loro aspetto è differente e si presenta come meno uniforme rispetto a tutte le altre celle (figura 7).

Il colore blu-nero che caratterizza le celle foto-



 Figura 7: Esempio di celle fotovoltaiche in silicio policristallino complete di bandelle di collegamento (fonte EPIA)



 Figura 5: Variazione della curva caratteristica con la temperatura



Figura 6: Esempio di cella fotovoltaica in silicio monocristallino

voltaiche cristalline è dato dallo strato antiriflettente depositato sulla superficie frontale al fine di aumentarne l'efficienza. Il colore originario delle celle è infatti grigio metallico, ma questo comporterebbe la riflessione di una parte consistente della luce incidente. La deposizione di un sottile strato di idruro di silicio permette invece di recuperare gran parte dell'energia che andrebbe altrimenti persa per riflessione.

CELLE FOTOVOLTAICHE IN FILM SOTTILE

Le celle fotovoltaiche in film sottile sono basate sulla deposizione del materiale semiconduttore su un idoneo supporto e presentano uno spessore di pochi micron (figura 8). Nella maggioranza dei casi il semiconduttore impiegato è silicio amorfo (con alcune varianti), CIG, CIGS o CdTe.

Le celle in silicio amorfo sono costruttivamente molto differenti da quelle in silicio cristallino e si ottengono per deposizione sotto vuoto o in atmosfera controllata di vapori di silicio su un opportuno substrato. Per contro, il rendimento di queste celle rimane generalmente intorno al 6÷8% alla fine del periodo iniziale di stabilizzazione, anche facendo ricorso a tecnologie sofisticate tra cui, ad esempio, l'utilizzo di giunzioni sovrapposte.

Un'interessante variante è costituita dalle celle in silicio microcristallino o micromorfo. In questo caso, il silicio microcristallino viene applicato su più strati con diversi passaggi. Sempre più spesso questo procedimento è utilizzato in abbinamento al silicio amorfo, da qui il termine micromorfo. Le celle CIS (Copper Indium Diselenide) e CIGS (Copper Indium Gallium Diselenide) sono costituite da calcopiriti che contengono in diverse proporzioni rame, indio, selenio (oppure zolfo) e gallio. E' possibile, con queste tecnolo-



Figura 9: Comportamento spettrale di una cella a tripla giunzione con indicazione percentuale della potenza in funzione della lunghezza d'onda che ogni cella è in grado di convertire

 Figura 10: Principali strati componenti una cella a tripla giunzione (fonte CESI Ricerca)





Figura 8: Esempio di celle fotovoltaiche in film sottile

gie, arrivare a rendimenti anche superiori al 10%, ma le difficoltà realizzative sono ancora piuttosto elevate.

Con le celle in telloruro di cadmio (CdTe) è possibile realizzare moduli fotovoltaici disponibili sul mercato a prezzi interessanti, anche se i rendimenti non sono elevatissimi e comunque non superano il 10%. Attualmente nel mondo vi è un solo grande produttore di questa tecnologia, anche se sembra vi sia spazio per altri concorrenti.

CELLE AD ETEROGIUNZIONE CON ELEVATA EFFICIENZA

Attualmente, i maggiori livelli di rendimento di conversione sono raggiunti attraverso le celle solari a eterogiunzione, anziché a giunzione singola, come quella ad esempio utilizzata nei moduli commerciali in silicio cristallino.

Benché il silicio cristallino presenti una elevata efficienza di conversione, tanto che tra le singole giunzioni è il materiale a rendimento più elevato, esso non è però in grado di convertire la radiazione di lunghezza d'onda λ superiore al va-

> lore di soglia di 1,15 µm. Inoltre, come si è visto, i fotoni con lunghezza d'onda inferiore, che sono quindi in grado di liberare una coppia elettrone-lacuna, possiedono però un surplus di energia non utilizzabile che quindi va perso.

> Questa perdita è tanto maggiore quanto più la lunghezza d'onda si allontana dal valore di soglia.

> Con le celle a eterogiunzione si cerca invece di suddividere lo spettro della radiazione solare in più parti, ognuna delle quali viene indirizzata verso una giunzione che presenta un energy-gap ottimale e quindi è in grado di convertire con la massima efficienza possibile una determinata lunghezza d'onda. La figura 9 si riferisce, ad esempio, alla suddivisione operata da una cella a tripla giunzione, nella quale la radiazione a lunghezza d'onda maggiore è convertita da una cella *Bottom* in germanio (Ge), quella a lunghezza d'onda intermedia

56



Figura 11: Concentratore solare a lente

da una cella Middle all'arsenuro di gallio (GaAs), mentre la cella Top al gallio-indio-fosforo ha lo scopo di convertire la radiazione a lunghezza d'onda inferiore. Tipicamente, la suddivisione che ne risulta corrisponde ad avere la cella Top in grado di convertire la radiazione ultravioletta e una porzione di quella visibile, la calla Middle che si occupa della restante parte della radiazione visibile e del primo infrarosso, mentre alla cella Bottom è lasciato l'infrarosso lontano. La tipica struttura di una cella a tripla giunzione è illustrata in figura 10, nella quale sono elencati i principali strati che la compongono. Con le celle a giunzione multipla è quindi possibile raggiungere efficienze di conversione più elevate rispetto ai componenti tradizionali. Normalmente, le celle a tripla giunzione, in condizioni ottimali, raggiungono efficienze del 30 ÷ 40%, il loro costo è tuttavia molto superiore a quello delle celle in silicio cristallino.

Inoltre, l'efficienza delle celle a eterogiunzione varia con l'intensità della radiazione incidente e, in genere, i valori più elevati si ottengono con luce concentrata.

Per questi motivi, si stanno mettendo a punto impianti fotovoltaici a concentrazione, mediante i quali è possibile ottenere elevate efficienze di conversione con un limitato uso di componenti fotovoltaici. In figura 11 è schematizzato un dispositivo di concentrazione a lente. Con dispositivi di questo tipo si ottengono normalmente fattori di concentrazione di 500 ÷ 1000 soli, mentre l'ottica utilizzata è di solito del tipo a lente di Frasnel.

Note

1 L'energia associata alla radiazione è data dalla relazione, nella quale è la costante di Plank, è la frequenza della radiazione, è la velocità della luce e è la lunghezza d'onda della radiazione.

2 Per le celle in silicio amorfo la dipendenza dalla temperatura è, in genere, minore.

ELEVATA DISPONIBILITÀ E ALTO RENDIMENTO DELLA VOSTRA ENERGIA





SOCOMEC UPS, **45 anni di esperienza** nella progettazione e realizzazione di sistemi innovativi di alimentazione affidabile di alta qualità fino a **5.4 MVA**, è il vostro partner ideale nella scelta di soluzioni **per la protezione** delle vostre applicazioni ITcritiche, in pieno **rispetto**

dell'ambiente.

- Architettura compatibile TIER & TIA 942 per tutte le esigenze di disponibilità
- compatte per Data Centre in evoluzione
- > Servizio di controllo remoto 24/7/365







Innovative Power Solutions UPS MILANO 02 9824 2942 • VICENZA 04 4459 8611 • ROMA 06 5422 5218 FIRENZE 05 5879 2418 • info.it.ups@socomec.com • www.socomec.com