

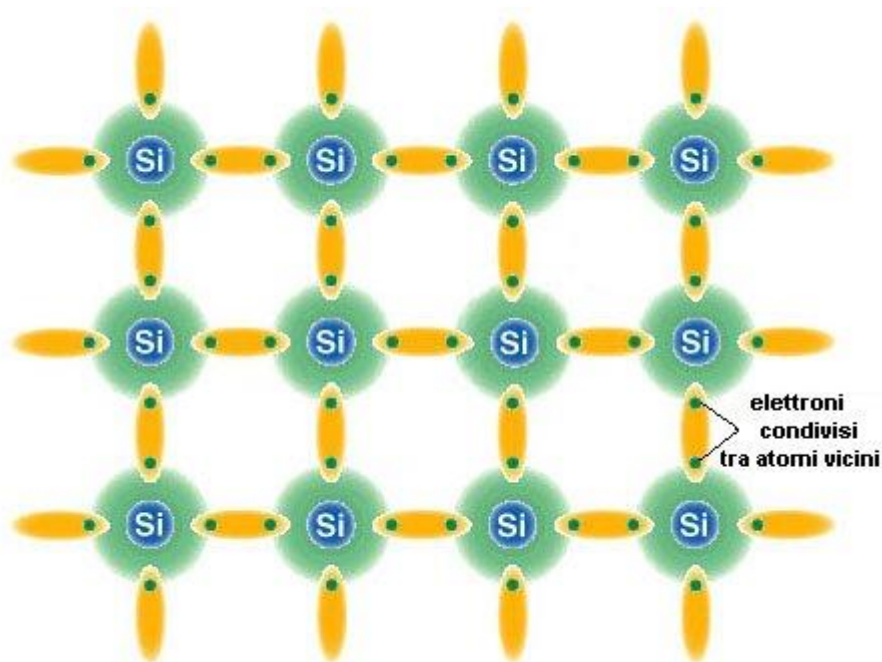
la fisica del processo fotovoltaico

Per capire come funziona il processo di conversione della radiazione solare in una corrente di elettroni è necessario fare riferimento ad alcune nozioni di fisica moderna riguardo alla natura della radiazione elettromagnetica e alla struttura dell'atomo.

La conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica, realizzata con la cella fotovoltaica, utilizza il fenomeno fisico dell'interazione della radiazione luminosa con gli elettroni di valenza nei materiali semiconduttori, denominato effetto fotovoltaico. L'**effetto fotovoltaico** è tra i fenomeni che fanno pensare ad una natura corpuscolare della luce; infatti, è stato scoperto che è proprio una particella associata alle onde elettromagnetiche, denominata fotone, a fornire l'energia necessaria ad attivare il processo fotovoltaico. Qualunque sia il materiale impiegato, il meccanismo con cui la cella trasforma la luce solare in energia elettrica è essenzialmente lo stesso.

Consideriamo per semplicità il caso di una convenzionale cella fotovoltaica di silicio cristallino.

L'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali sono elettroni di valenza, che quindi possono partecipare alle interazioni con altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi. In un cristallo di silicio puro ogni atomo è legato in modo covalente ad altri quattro atomi: quindi *due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro hanno in comune una coppia di elettroni*, uno dei quali appartenente all'atomo considerato e l'altro appartenente all'atomo vicino.

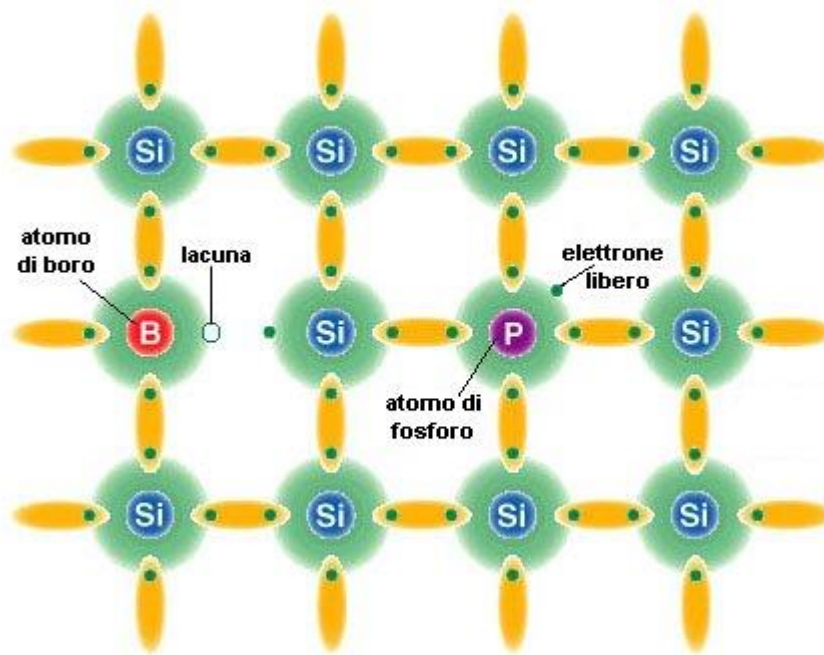


Esiste quindi un forte legame elettrostatico fra un elettrone e i due atomi che esso contribuisce a tenere uniti. Questo legame elettrostatico può essere spezzato con una quantità di energia che permetta ad un elettrone di passare ad un livello energetico superiore, cioè dalla banda di valenza alla banda di conduzione, superando la banda proibita: se l'energia fornita è sufficiente - per l'atomo di silicio 1.08 eV (eV significa elettronvolt, $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), un valore intermedio tra quello dei conduttori e quello degli isolanti - l'elettrone viene portato ad un livello energetico superiore (banda di conduzione), dove è libero di spostarsi, contribuendo così al flusso di elettricità. Quando passa alla banda di conduzione, l'**elettrone** si lascia dietro una buca, cioè una **lacuna** dove manca un elettrone. Un elettrone vicino può andare facilmente a riempire la lacuna, scambiandosi così di posto con essa.

Quando un flusso luminoso investe il reticolo cristallino del silicio, si ha la liberazione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un egual numero di lacune. Nel processo di ricombinazione ogni elettrone che capita in prossimità di una lacuna la può occupare, restituendo una parte dell'energia cinetica che possedeva sotto forma di calore.

Per sfruttare l'elettricità è necessario creare un moto coerente di elettroni (e di lacune), ovvero una corrente, mediante un campo elettrico interno alla cella. Il campo si realizza con particolari trattamenti fisici e chimici, creando un eccesso di atomi caricati positivamente in una parte del semiconduttore ed un eccesso di atomi caricati negativamente nell'altro.

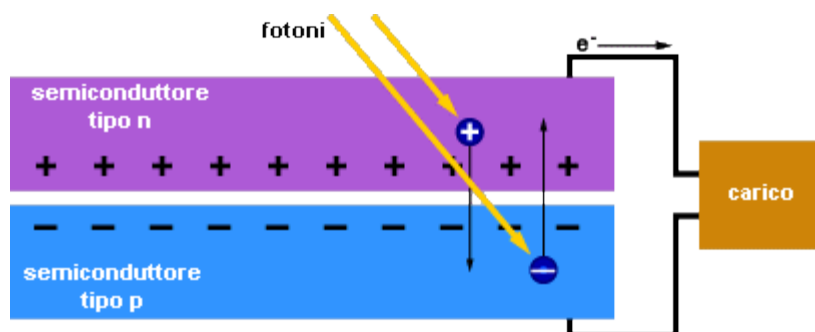
In pratica è necessario introdurre nel silicio una piccola quantità di atomi appartenenti al terzo o al quinto gruppo del sistema periodico degli elementi, in modo da ottenere due strutture differenti, una con un numero di elettroni insufficiente, l'altra con un numero di elettroni eccessivo. Questo trattamento viene detto **drogaggio** e la quantità delle impurità introdotte è dell'ordine di una parte per milione. Generalmente si utilizzano il *boro* (terzo gruppo) ed il *fosforo* (quinto gruppo) per ottenere rispettivamente una struttura di **tipo p** (con un eccesso di lacune) ed una di **tipo n** (con un eccesso di elettroni).



Nello strato drogato con fosforo, che ha cinque elettroni esterni o di valenza contro i quattro del silicio, è presente una carica negativa debolmente legata, composta da un elettrone per ogni atomo di fosforo. Analogamente, nello strato drogato con boro, che ha tre elettroni esterni, si determina una carica positiva in eccesso, composta dalle lacune presenti negli atomi di boro quando si legano al silicio.

Il primo strato, a carica negativa, si indica con n, l'altro, a carica positiva, con p, la zona di separazione è detta **giunzione p-n**.

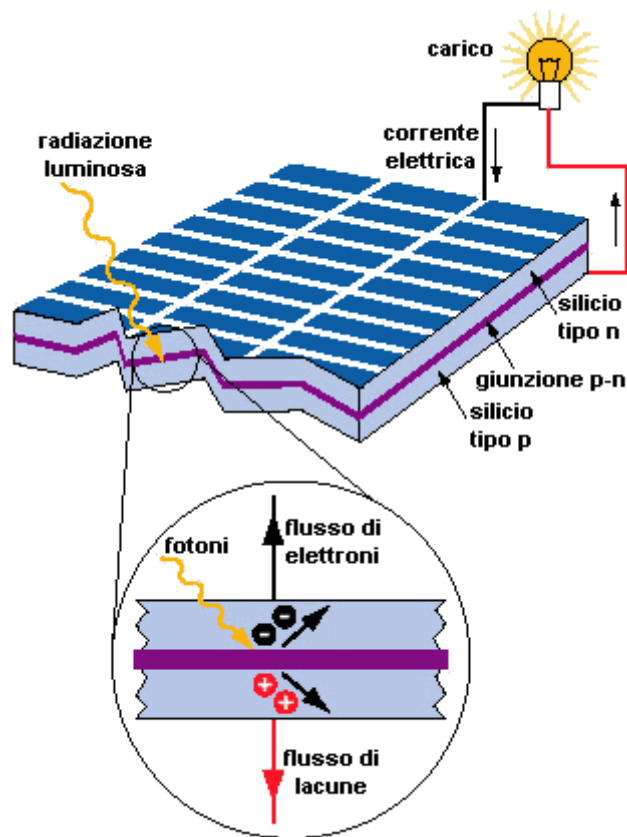
In entrambi i casi il materiale risulta elettricamente neutro; tuttavia, ponendo a contatto i due tipi di strutture, tra i due strati si attiva un flusso elettronico dalla zona n alla zona p che, raggiunto il punto di equilibrio elettrostatico, determina un eccesso di carica positiva nella zona n, dovuto agli atomi di fosforo con un elettrone in meno, e un eccesso di carica negativa nella zona p, dovuto agli elettroni migrati dalla zona n. In altri termini gli elettroni presenti nel silicio tipo n diffondono per un breve tratto nel silicio tipo p: il silicio tipo n si carica positivamente, quello di tipo p si carica negativamente e si crea inoltre una regione intermedia detta zona di svuotamento o di carica spaziale. Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo dell'ampiezza di pochi micrometri.



Illuminando la giunzione p-n dalla parte del silicio 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, agendo

come un diodo, impedisce loro di invertire la marcia. (Un diodo è un dispositivo in cui il passaggio di corrente è ostacolato in una direzione e facilitato in quella opposta). Quindi, se si connette la giunzione p-n con un conduttore, nel circuito esterno si otterrà un **flusso di elettroni** che parte dallo strato n, a potenziale maggiore, verso lo strato p, a potenziale minore. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce con regolarità sotto forma di corrente continua. E' importante che lo spessore dello strato n sia tale da garantire il massimo assorbimento di fotoni incidenti in vicinanza della giunzione. Per il silicio questo spessore deve essere di 0,5 mm, mentre lo spessore totale della cella non deve superare i 250 mm.

In sintesi la conversione da luce a energia elettrica effettuata dalla cella fotovoltaica avviene essenzialmente perché questi portatori di carica liberi (elettroni e lacune), generati dalla luce, sono spinti in direzioni opposte dal campo elettrico interno creato attraverso la giunzione di due semiconduttori drogati in modo diverso. Una volta attraversato il campo, le cariche non tornano più indietro, perché il campo impedisce loro di invertire la marcia. Le cariche positive (lacune) sono spinte verso un lato della cella e le cariche negative (elettroni) verso l'altro. Se le due facce (inferiore e superiore della cella) sono collegate mediante un conduttore, le cariche libere lo attraversano e si osserva una corrente elettrica. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce sotto forma di corrente continua.



Di tutta l'energia che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti. L'efficienza di conversione per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 13 % e il 17%, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 32,5%.

I motivi di tale bassa efficienza sono molteplici e possono essere raggruppati in quattro categorie:

- riflessione: non tutti i fotoni che incidono sulla cella penetrano al suo interno, dato che in parte vengono riflessi dalla superficie della cella e in parte incidono sulla griglia metallica dei contatti;
- fotoni troppo o poco energetici: per rompere il legame tra elettrone e nucleo è necessaria una certa energia, e non tutti i fotoni incidenti possiedono energia sufficiente. D'altra parte alcuni fotoni troppo energetici generano coppie elettrone-lacuna, dissipando in calore l'energia eccedente quella necessaria a staccare l'elettrone dal nucleo.
- ricombinazione: non tutte le coppie elettrone-lacuna generate vengono raccolte dal campo elettrico di giunzione e inviate al carico esterno, dato che nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno opposto e quindi ricombinarsi;

- resistenze parassite: le cariche generate e raccolte nella zona di svuotamento devono essere inviate all'esterno. L'operazione di raccolta viene effettuata dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra silicio e alluminio dei contatti, resta una certa resistenza all'interfaccia, che provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico. Nel caso di celle al silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente diminuita a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, ancor più nel caso di celle al silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi.