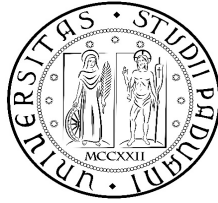


UNIVERSITÀ DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Attività Formativa:

TESINA

I SISTEMI FOTOVOLTACI

Laureando: Niccolò Antonello

Relatore: Prof.ssa Roberta Bertani

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

Data Laurea: 18/02/2010

Anno Accademico 2009-2010

Abstract:

Il fotovoltaico rappresenta una tecnologia, che produce energia pulita, la quale attualmente dev'essere ancora del tutto perfezionata, ma che presenta delle buone prospettive per il futuro. In questa tesina vengono esposte le principali tematiche riguardanti questa fonte di energia rinnovabile. Inizialmente viene esposta la modalità di funzionamento del dispositivo fondamentale, la cella fotovoltaica. Si vanno in seguito ad esaminare vari tipi di materiali utilizzati, focalizzandosi sul silicio cristallino, policristallino e le varie tecniche per il miglioramento delle performance della cella. Viene inoltre dedicato un capitolo alle celle ad alto rendimento multi-giunzione e a quelle a film sottile. Ci si sofferma sul silicio amorfo e sulle prospettive future nell'utilizzo di questo materiale. Infine vengono esposte in vari esempi le attuali applicazioni del fotovoltaico, concludendo con un'analisi economica.

CAPITOLO 1

Funzionamento della Cella Fotovoltaica

-1.1 Introduzione

Per poter comprendere il funzionamento di un pannello solare, è necessario analizzare il dispositivo base con cui esso è formato: la *cella fotovoltaica*, o *solare*. La cella solare è semplicemente un diodo, costituito da un materiale semiconduttore che permette di assorbire l'energia dei raggi solari e di trasformarla in energia elettrica.

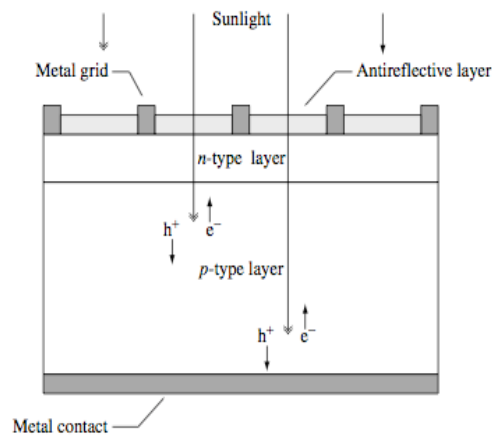


Figura 1.1: Schema generale di una cella solare (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

In figura possiamo vedere lo schema generale di una cella solare (non in scala).

Questa è formata da una giunzione di materiale semiconduttore di tipo *p* e di tipo *n*. Il contatto nella parte superiore esposta al sole è formato da una griglia metallica che permette alla luce di penetrare nel dispositivo. Tra le linee della griglia viene depositato un materiale che riduce la riflessione della luce.

La luce è costituita da particelle elementari chiamate fotoni, i quali dispongono di una certa energia. Quando un fotone con un'energia sufficientemente alta colpisce un elettrone, questo può liberarsi dall'atomo a cui è legato lasciando dietro di sé una lacuna, ovvero un "buco" avente carica positiva uguale a quella dell'elettrone. Elettroni e lacune liberi, che chiameremo anche *portatori liberi*, sono separati e raccolti dalla cella solare in modo che percorrano una specifica direzione, generando così una corrente elettrica. La cella solare

quindi se illuminata produce una corrente continua, se invece non illuminata, ovviamente, non entra in funzione.

Passiamo ora a illustrare alcuni concetti fondamentali per un'analisi più dettagliata del processo che compie questo dispositivo. Verranno descritte le proprietà dei semiconduttori che rendono possibile il processo di assorbimento della luce, inoltre andremo ad analizzare in modo più dettagliato la struttura del diodo, spiegando il significato di semiconduttore di tipo p e di tipo n, fino a giungere alla definizione di una funzione caratteristica del dispositivo che lega corrente a tensione.

-1.2 Proprietà dei Semiconduttori

Un'analisi di come la conduzione elettrica avviene nei materiali semiconduttori è indispensabile per comprendere la loro importanza nel campo dell'energia fotovoltaica e dell'elettronica in generale. Per ora analizzeremo solamente il comportamento nei solidi cristallini.

È necessario definire la differenza tra materiale conduttore e semiconduttore per quanto riguarda la teoria delle bande. Un breve ripasso di tale teoria viene ora riportato. Un atomo è costituito da tre particelle fondamentali: neutroni, protoni ed elettroni. Protoni e neutroni costituiscono il nucleo dell'atomo, mentre l'elettrone orbita attorno al nucleo con un moto che le equazioni della fisica ondulatoria riescono a descrivere in quelli che vengono chiamati orbitali. Elettroni e protoni sono portatori di carica rispettivamente negativa e positiva e in un atomo elettronicamente neutro si eguagliano in numero, il così detto numero atomico che determina le proprietà chimiche e il tipo di elemento dell'atomo.

Nel moto di un elettrone attorno al nucleo risulta impossibile determinare posizione e velocità. Tuttavia sappiamo che a seconda dell'orbitale che tale elettrone occupa, questo ha una certa energia discreta (ovvero può assumere solamente certe quantità di energia). Secondo la teoria degli orbitali molecolari, due atomi che si legano formano degli orbitali ad energia intermedia rispetto a quelli d'origine. Quindi, secondo la teoria delle bande, in un cristallo, dove vi sono molti atomi legati tra loro, ci saranno molti orbitali molecolari ad energie intermedie e l'elettrone potrà assumere delle energie che non risultano più discrete, ma continue. Queste energie continue degli elettroni sono generalmente rappresentate dalle bande.

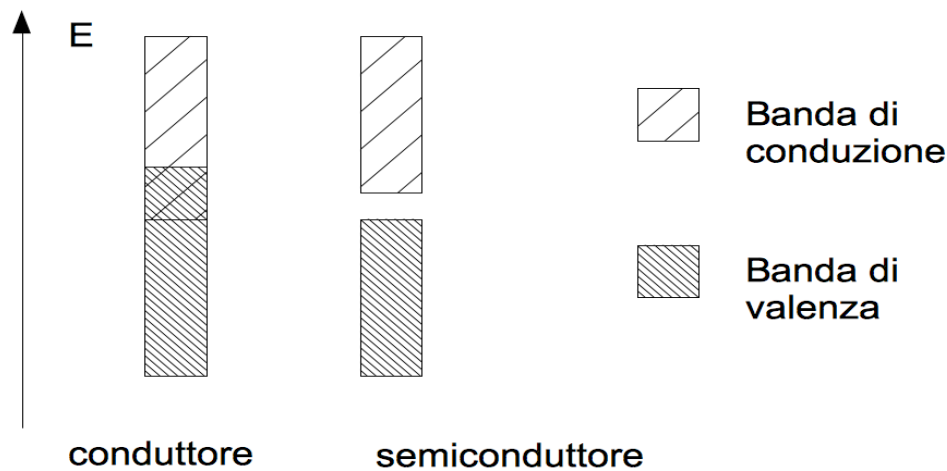


Figura 1.2: differenza del diagramma a bande di un conduttore rispetto ad un semiconduttore

In figura 1.2 le strisce tratteggiate in modo diverso rappresentano le bande e la loro posizione gioca un ruolo importante nella spiegazione del fenomeno della conduzione elettrica. La banda più in alto (e quindi ad energia maggiore), viene chiamata banda di conduzione. Un elettrone appartenente ad essa è libero, non legato a nessun atomo, e può quindi muoversi nel reticolo e, in presenza di una differenza di potenziale, contribuire alla corrente elettrica. Un elettrone nella banda di valenza, invece, è legato ad un atomo, sebbene debolmente poiché appartiene al suo guscio più esterno.

In un conduttore le due bande sono sovrapposte, ciò significa che gli elettroni di valenza sono così debolmente legati agli atomi che in effetti fanno parte della banda di conduzione e sono liberi. Nei semiconduttori invece le due bande sono separate da quello che viene chiamato “*gap*”: un elettrone per diventare libero dev'essere promosso alla banda di conduzione superando il *gap energetico*, cioè dev'essere impiegata un'energia sufficiente (E_G) per far sì che l'elettrone venga strappato dall'atomo a cui era legato, per poter contribuire alla conduzione elettrica. Negli isolanti il *gap* è molto più elevato e di conseguenza la conduzione molto più difficile.

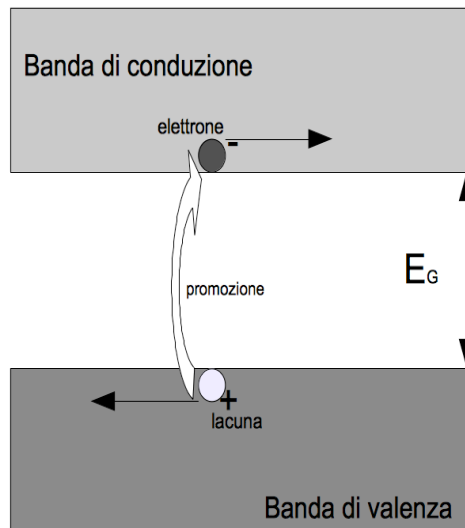


Figura 1.3: promozione di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione

L'elettrone strappato lascia dietro di sé, nella banda di valenza, una lacuna, ovvero un “buco” avente carica uguale ed opposta a quella dell'elettrone. Questa lacuna ha un comportamento analogo all'elettrone ovvero risente di un eventuale differenza di potenziale, spostandosi da atomo ad atomo. In presenza di una forza elettromotrice si avrà quindi spostamento di elettroni nella banda di conduzione e di lacune nella banda di valenza. Quindi in un semiconduttore intrinseco (o non drogato), la conduzione avviene per elettroni e lacune. Tuttavia questo ha un comportamento più simile a quello di un materiale isolante. Vedremo in seguito che con l'aggiunta di impurezze, tecnica chiamata drogaggio appunto, è possibile modificare il comportamento elettronico del semiconduttore.

Nelle celle solari il materiale più utilizzato è il silicio (Si), nella sua forma cristallina, policristallina e amorfa, sia per la sua buona caratteristica di assorbimento della luce sia per il suo prevalere nell'industria elettronica dei semiconduttori. Vengono utilizzati, inoltre, anche molti altri tipi di semiconduttore (GaAs, GaInP, CdTe, ...) che hanno tuttavia riscontrato meno successo, soprattutto a causa dei costi elevati e della loro minore presenza in natura.

Andiamo quindi ad analizzare come funziona una cella fotovoltaica costruita con silicio, nella sua struttura più semplice, quella cristallina, che ha le proprietà di essere ordinata e periodica. Il silicio appartiene al IV gruppo della tavola periodica degli elementi. Presenta quindi quattro elettroni di valenza, e nella sua struttura cristallina si lega con altri quattro atomi di silicio con legame covalente.

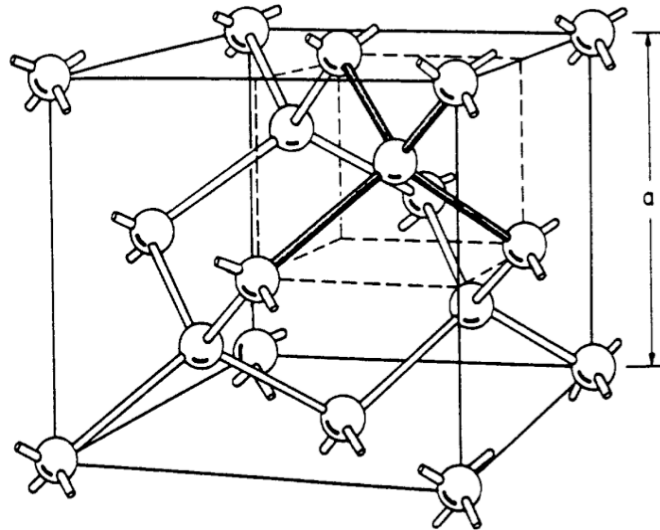


Figura 1.4: rappresentazione del reticolo cristallino del silicio (dal libro *“Electronics, Power Electronics, Optoelectronics, Microwaves, Electromagnetics, and Radar”*)

In figura 1.4 è rappresentato il reticolo di una struttura cristallina. Per comprenderne le proprietà elettriche, è necessario capire come un elettrone si muove in tale reticolo. Questo è possibile risolvendo l'equazione di meccanica quantistica di Schrödinger, indipendente dal tempo:

$$\nabla^2 \Psi + \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)[E - U(\vec{r})]\Psi = 0$$

dove “ Ψ ” è la funzione onda dell'elettrone che dà il comportamento dinamico dell'elettrone nel reticolo, “ m ” è la massa dell'elettrone, “ \hbar ” è la costante di Planck, “ E ” è l'energia dell'elettrone, ed “ U ” è il potenziale periodico nel reticolo.

Osservando i dati che si ottengono dalla risoluzione di questa equazione in uno spazio tridimensionale contenente tutte le complessità del reticolo, è possibile approssimare il moto dell'elettrone: possiamo dire che l'elettrone si muove con le leggi della fisica classica in uno spazio tridimensionale vuoto solamente sostituendo la sua massa con una massa effettiva “ m_e ”, dove vengono inglobate tutte le complessità del reticolo.

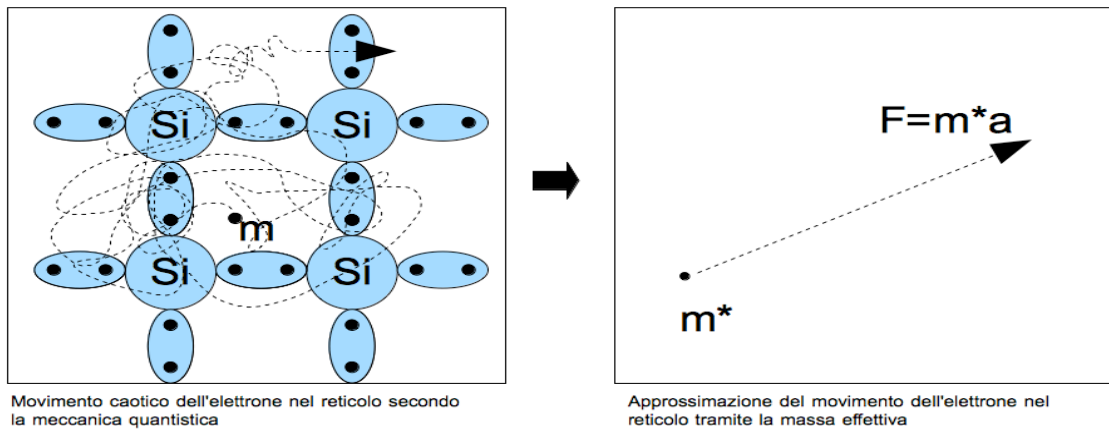


Figura 1.5: Movimento caotico dell'elettrone nel reticolo e la sua approssimazione tramite difetto di massa.

La massa effettiva dell'elettrone è quindi definita come:

$$m_e = \left[\frac{d^2 E}{dp^2} \right]^{-1}$$

“p” è il *momento cristallino*, definito come $p = \hbar k$, dove “k” è il vettore onda che corrisponde ad una funzione soluzione dell'equazione di Schrödinger. Il momento cristallino quindi corrisponde alla quantità di moto dell'elettrone nel reticolo.

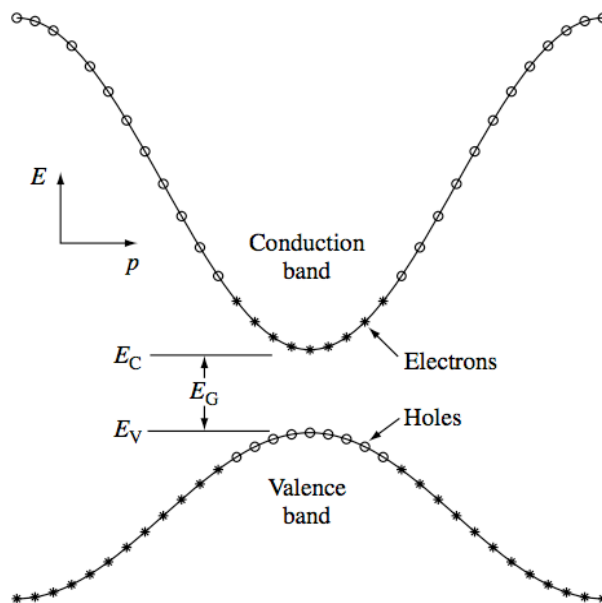


Figura 1.6: diagramma a bande semplificato per un solido cristallino. In ascissa il momento cristallino, in ordinata l'energia. Gli asterischi * rappresentano gli elettroni mentre i pallini o le lacune. (dal libro “*Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering*”)

In figura si può osservare un diagramma a bande semplificato per un solido cristallino che tiene conto anche della quantità di moto dell'elettrone. In ascissa si ha il momento cristallino “p” che per semplicità viene rappresentato da uno scalare, e in ordinata le corrispondenti energie ammesse dall'elettrone. Gli elettroni (*) riempiono gli stati della

banda di valenza dal basso verso l'alto, dove però sono presenti delle lacune (o). Il minimo della banda di conduzione “ E_C ” sottratto al massimo della banda di valenza “ E_V ” danno l'energia di gap “ E_G ”. Gli elettroni a energia più alta, eccitati termicamente, riescono a superare il gap energetico e vengono promossi nella banda di conduzione, occupandone i livelli energetici più bassi. La parte alta della banda di valenza e quella bassa di conduzione hanno una forma parabolica. Di conseguenza la massa effettiva delle lacune “ m_{p_e} ” nella banda di valenza ai livelli energetici più alti è praticamente costante, come, analogamente, quella degli elettroni, “ m_{n_e} ” nella banda di conduzione ai livelli più bassi. Questa approssimazione semplifica molto l'analisi.

Non sempre tuttavia, il minimo della banda di conduzione corrisponde al massimo della banda di valenza, ad esempio nel silicio. I materiali semiconduttori si distinguono quindi in due categorie: quelli a gap diretto, e quelli a gap indiretto. Come vedremo in seguito questo modifica il meccanismo principale con cui viene assorbita la luce.

Possiamo quindi calcolare la densità di stati nelle due bande, risolvendo ancora una volta l'equazione di Schrödinger in uno spazio tridimensionale vuoto, considerando tutte le complessità del reticolo cristallino incluse nella massa equivalente.

$$g_C(E) = \frac{m_{n_e} \sqrt{2m_{n_e}(E - E_C)}}{\pi^2 \hbar^3} cm^{-3} eV^{-1} \qquad g_V(E) = \frac{m_{p_e} \sqrt{2m_{p_e}(E_V - E)}}{\pi^2 \hbar^3} cm^{-3} eV^{-1}$$

Per calcolare il numero portatori liberi presenti all'equilibrio, bisogna considerare anche l'eccitazione termica degli elettroni. A questo scopo viene utilizzata la funzione di Fermi:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}}$$

dove “ E_F ” è l'energia di Fermi, k la costante di Boltzmann e T la temperatura in Kelvin. La funzione di Fermi determina il rapporto tra stati disponibili e stati non disponibili per ogni energia per un determinato valore della temperatura. In pratica determina quanti elettroni eccitati termicamente riescono a superare il gap energetico, lasciando dietro di se le rispettive lacune.

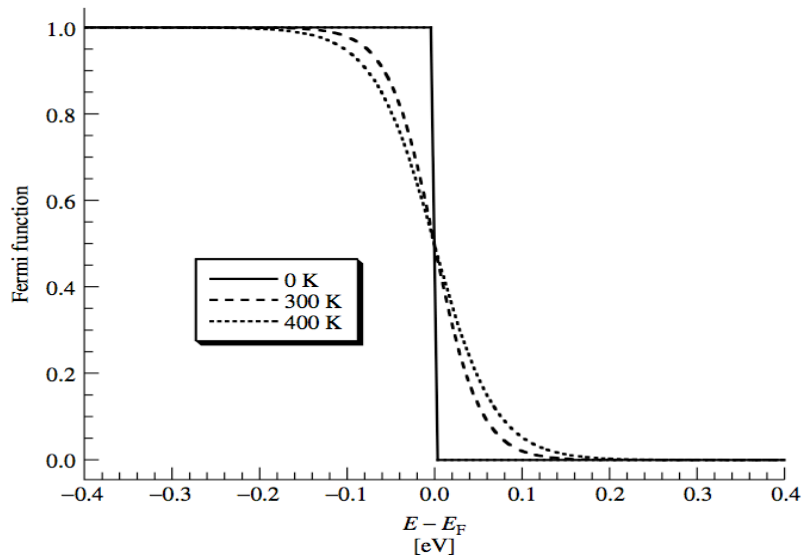


Figura 1.7: funzione di Fermi rappresentata per varie temperature, a gradino per lo zero assoluto, tratteggiata per temperature di 300 e 400 gradi Kelvin. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Come si può vedere dalla figura 1.7, allo zero assoluto la funzione di Fermi è una funzione gradino. Ciò sta a significare che nessun elettrone è eccitato termicamente: la banda di valenza risulterà completamente piena di elettroni, mentre quella di conduzione completamente vuota. Per temperature più elevate, invece, alcuni elettroni riusciranno a superare il gap e a liberarsi verso la banda di conduzione.

Possiamo quindi calcolare le concentrazioni ($\#/cm^3$) di elettroni e di lacune all'equilibrio:

$$n_0 = \int_{E_c}^{\infty} g_V(E) f(E) dE \quad p_0 = \int_{-\infty}^{E_v} g_V(E) [1 - f(E)] dE$$

Quando l'energia di Fermi è sufficientemente distante dai fronti di banda, il semiconduttore si dice *non degenero*, e le concentrazioni dei portatori possono essere approssimate a:

$$n_0 \approx N_C e^{(E_F - E_c)/kT} \quad p_0 \approx N_V e^{(E_v - E_F)/kT}$$

dove "N_C" e "N_V" sono le concentrazioni di stati effettivi rispettivamente nella banda di conduzione e nella banda di valenza ($\#/cm^3$).

In un semiconduttore non degenero il prodotto tra concentrazione di lacune e concentrazioni di elettroni è indipendente dall'energia di Fermi:

$$n_0 p_0 = n_i^2 = N_C N_V e^{(E_v - E_c)/kT} = N_C N_V e^{-E_g/kT} \quad n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_g/2kT}$$

dove n_i è la concentrazione di portatori liberi intrinseci.

Come avevamo già accennato, un semiconduttore intrinseco ha una bassa conducibilità e tende ad avere un comportamento più simile a quello di un materiale isolante. Tuttavia introducendo nel reticolo delle impurezze, chiamate agenti droganti, si può modificare il numero di portatori. Ad esempio iniettando una piccola quantità di un elemento del V gruppo, ad esempio il Fosforo, che dispone di cinque elettroni di valenza, questo andrà a formare quattro legami con gli atomi di silicio adiacenti. Il fosforo avrà quindi un elettrone disponibile che può essere donato come portatore libero alla banda di conduzione. Analogamente introducendo un elemento del III gruppo, come il Boro, che dispone solo di tre elettroni di valenza, un legame con un atomo di silicio del reticolo non viene formato. Tuttavia il boro può accettare un elettrone donando una lacuna alla banda di valenza. Per questo gli agenti droganti del terzo gruppo vengono chiamati *accettori*, mentre quelli del quinto gruppo *donatori*.

Se si va a esaminare le bande quando si inietta un drogante in un materiale semiconduttore, si osserva che, nel caso di donatori, si aggiunge un livello energetico discreto vicino alla banda di conduzione, mentre nel caso di accettori se ne aggiunge uno a ridosso della banda di valenza. Come si vede in figura, se l'energia E_D è sufficientemente bassa gli elettroni del drogante possono modificare il numero di portatori liberi, perché, grazie all'eccitazione termica, entrano a far parte della banda di conduzione. Un discorso analogo vale per E_A , in quanto gli elettroni della banda di valenza possono andare a colmare il livello energetico degli accettori, lasciando dietro di sé una lacuna nella banda di valenza.

I semiconduttori con droganti accettori si dicono di tipo p (positive) e la corrente elettrica è costituita prevalentemente da lacune. Se invece i droganti sono donatori il semiconduttore si dice di tipo n (negative) e la conduzione elettrica avviene prevalentemente tramite movimento di elettroni.

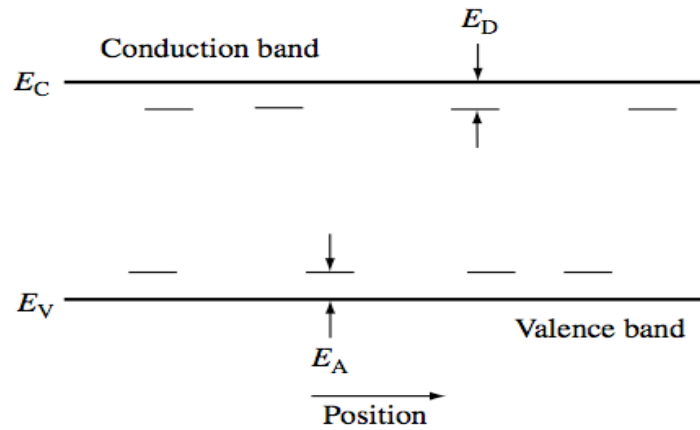


Figura 1.8: Livelli energetici accettori e donatori che si vengono a formare rispettivamente in seguito ad un drogaggio p od n. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Se si iniettano quantità rilevanti di droganti si parla di drogaggio pesante: i droganti non possono più essere considerati come una piccola perturbazione del sistema: il loro effetto è generalmente quello di abbassare l'energia di gap, cosa che si cerca di evitare nelle celle solari perché porta a prestazioni peggiori.

-1.3 Assorbimento della luce

L'eccitazione di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione dovuta ad un fotone è chiamato *assorbimento fondamentale*. Durante questo processo si conserva l'energia e la quantità di moto delle particelle che vi prendono parte.

Un fotone ha energia pari a:

$$E_{\lambda} = h\nu \quad \text{dove:} \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \quad ,$$

"h" è la costante di Planck, "ν" è la frequenza, "c" la velocità della luce e "λ" la lunghezza d'onda (la luce infatti può essere considerata sia come un'onda che come un fascio di particelle).

La quantità di moto del fotone, $p_{\lambda} = h/\lambda$ è nell'ordine dei micron (10^{-4}cm) ed è trascurabile rispetto al momento cristallino, che è nell'ordine dell'angstrom (10^{-8}cm), quindi per praticità si considera che solo la quantità di moto dell'elettrone si conservi. Nella scelta di un materiale per la costruzione di una cella fotovoltaica risulta molto importante il coefficiente di assorbimento $\alpha(h\nu)$, funzione della frequenza della luce incidente. Questo è proporzionale alla probabilità P_{12} della transizione da un livello energetico E_1 ad E_2 , la densità degli elettroni allo stato iniziale $g_V(E_1)$, e quella degli stati finali disponibili $g_C(E_2)$.

Vengono poi sommate tutte le transizioni dove è possibile il salto dal livello energetico E_1 a quello E_2 .

$$\alpha(h\nu) \propto \sum P_{12} g_V(E_1) g_C(E_2)$$

Ci sono due tipi di semiconduttori, quello a gap diretto e quelli a gap indiretto, che si distinguono per il meccanismo prevalente di assorbimento della luce.

Nel meccanismo a gap diretto, l'elettrone nella banda di valenza ha energia E_1 e quantità di moto p_1 . In seguito all'assorbimento di un fotone l'elettrone avrà energia E_2 e momento p_2 . Il momento cristallino viene quindi conservato e si avrà $p_1 \approx p_2 = p$.



Figura 1.9: differenza nel diagramma a bande tra un semiconduttore a gap diretto (a sinistra) ed uno a gap indiretto (a destra). (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Nei semiconduttori a gap indiretto invece la massima energia della banda di valenza si trova ad una quantità di moto diversa rispetto alla minima energia della banda di conduzione. Un salto diretto da banda a banda richiede quindi molta più energia. Tuttavia con l'entrata in gioco di una terza particella, chiamata fonone, a cui l'elettrone trasferisce parte della sua quantità di moto, il salto energetico risulta meno impegnativo. I fononi sono delle pseudo-particelle che rappresentano le vibrazioni del reticolo cristallino. Hanno bassa energia, ma quantità di moto relativamente alta. Questi garantiscono la conservazione del momento e danno una spiegazione al fenomeno.

Entrambi i meccanismi qui descritti sono presenti nei due tipi di semiconduttori che si distinguono solamente dal prevalere di uno sull'altro.

I semiconduttori a gap diretto hanno un coefficiente di assorbimento più alto rispetto a quelli a gap indiretto. Questi sono materiali come GaAs, GaInP, e molti altri, mentre quelli a gap indiretto sono Si e Ge. Come conseguenza la luce penetra più in profondità nei semiconduttori a gap indiretto.

Un'espressione utile nell'analisi della cella solare è quella della velocità di generazione di coppie elettrone-lacuna in funzione della posizione nella cella:

$$G(x) = (1-s) \int_{\lambda} (1-r(\lambda)) f(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha x} d\lambda$$

dove “ $r(\lambda)$ ” è l'indice di riflessione, “ $f(\lambda)$ ” il flusso di fotoni incidenti, “ $\alpha(\lambda)$ ” il coefficiente di assorbimento e “ s ” il fattore ombra causato dalla griglia. Solo i fotoni con energia superiore a E_G contribuiscono alla velocità di generazione, ovvero quelli con lunghezza d'onda $\lambda \leq hc / E_G$.

In alcuni casi un elettrone nella banda di conduzione può assorbire un fotone, spostandosi in uno stato più alto. Questo può accadere generalmente solo per fotoni con $E < E_G$ poiché il fattore di assorbimento dei portatori liberi aumenta all'aumentare della lunghezza d'onda. Nelle celle solari singole dunque questo effetto può essere ignorato, ma può diventare rilevante in alcune tipologie di celle chiamate “*celle a tandem*” o a *multi-giunzione*, dove vengono messe in serie celle con E_G via via più bassi per catturare tutti i fotoni.

-1.4 Ricombinazione

Un fenomeno che assume un peso rilevante nella progettazione delle celle solari è quello della ricombinazione. La ricombinazione avviene quando un semiconduttore torna all'equilibrio termico in seguito a esposizione alla luce o al passaggio di corrente elettrica. L'elettrone eccitato “ricade” dalla banda di conduzione alla banda di valenza, eliminando così una lacuna. I processi di ricombinazione più importanti sono tre: la ricombinazione attraverso trappole nella banda proibita, ricombinazione da banda a banda, e ricombinazione di Auger.

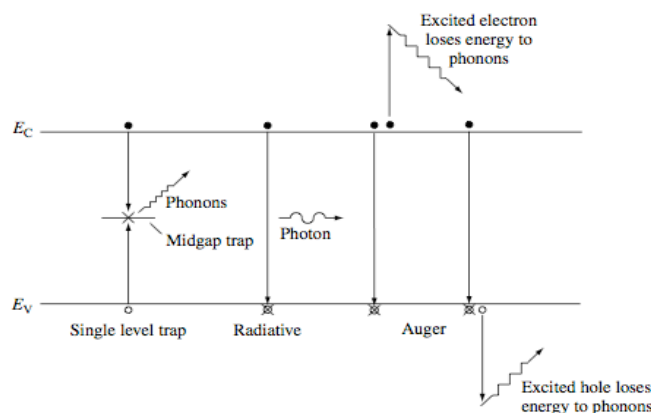


Figura 1.10: Vari tipi di ricombinazione che si possono avere. Da destra a sinistra, la ricombinazione SRH, quella a radiazione luminosa e quella di Auger. (dal libro “*Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering*”)

La prima tipologia, conosciuta anche come *ricombinazione di Shockley–Read–Hall (SRH)* è dovuta a impurezze che formano dei livelli discreti di energia nella banda proibita di gap. L'elettrone (o la lacuna) durante il suo moto può essere catturato dalla trappola, rilasciando un fonone o un fotone nel passaggio energetico al livello discreto. Il tempo di vita del portatore è dato dalla seguente espressione:

$$\tau_{SLT} = \frac{1}{\sigma v_{th} N_T}$$

dove “ σ ” è la sezione d'urto-cattura, “ v_{th} ” la velocità termica dei portatori, “ N_T ” la concentrazione di trappole e la sigla SLT sta per “Single Level Trap” (possono infatti esserci più livelli di trappole). La sezione di cattura rappresenta la grandezza di una trappola per il portatore che viaggia nel reticolo. Più è breve la vita del portatore più è alta la velocità di ricombinazione R_{SLT} .

Se il materiale è di tipo p con iniezioni basse ($n \approx n_0 \gg p_0$) e l'energia della trappola si trova circa a metà del gap energetico la formula di ricombinazione può essere scritta come:

$$R_{SLT} \approx \frac{n - n_0}{\tau_{SLTn}}$$

Dove “ n ” rappresenta il numero di elettroni quando il materiale è sottoposto alla luce e n_0 il numero di elettroni all'equilibrio termico. Si noti che la velocità di ricombinazione dipende solamente dai portatori in minoranza (chiamati anche portatori limitanti). Ciò è dovuto al fatto che i portatori minoritari sono numericamente inferiori rispetto a quelli presenti in maggior numero e per la ricombinazione sono necessari entrambi.

In condizioni di iniezioni forti dove $n \approx p \gg n_0, p_0$

$$R_{SLT} \approx \frac{n}{\tau_{SLTp} + \tau_{SLTn}} \approx \frac{p}{\tau_{SLTp} + \tau_{SLTn}}$$

In questo caso il tempo di ricombinazione è la somma del tempo di vita dei due portatori.

Un altro processo di ricombinazione è quello da banda a banda con radiazione luminosa. L'elettrone “*ricade*” direttamente dalla banda di conduzione a quella di valenza emettendo un fotone, con un processo che è del tutto inverso rispetto a quello di assorbimento della luce. Questo tipo di fenomeno è usato nei LED e nei laser. Nei semiconduttori a gap

diretto si verifica più facilmente rispetto a quelli a gap indiretto (dove entra in gioco anche un fonone nel processo). La velocità di ricombinazione a banda diretta è data da:

$$R_{\lambda} = B(pn - n_i^2)$$

Infine si ha la ricombinazione di Auger: l'elettrone eccitato dona la sua energia ad un altro portatore (che può trovarsi sia nella banda di conduzione che in quella di valenza) il quale perde l'energia in eccesso rilasciandola in fononi.

Tutti questi processi avvengono in parallelo durante la fase di rilassamento verso l'equilibrio termico, e la velocità di ricombinazione totale può essere data dall'espressione:

$$R = [\sum_{trappole, i} R_{SLT, i}] + R_{\lambda} + R_{Auger} \quad [\text{numero ricombinazioni}]/[\text{cm}^3][\text{s}]$$

Ciò non vale nelle interfacce tra due materiali, dove la brusca interruzione del reticolo cristallino provoca un'alta concentrazione di trappole. Per queste zone vengono definite, come vedremo, delle velocità di ricombinazione superficiali.

-1.5 Trasporto dei portatori

Elettroni e lacune sono soggetti ai processi di diffusione e di deriva. Il processo di deriva si verifica quando il semiconduttore è soggetto a un campo elettrico uniforme. Come si può vedere in figura applicando una differenza di potenziale le bande di conduzione si piegano nella direzione del campo elettrico. Si genera una corrente costituita dall' "affondare" degli elettroni e dal "venire a galla" delle lacune.

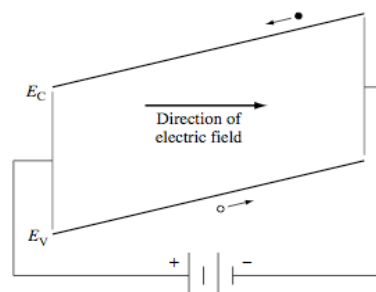


Figura 1.11: Diagramma a bande di un semiconduttore sottoposto ad una differenza di potenziale. Le bande si piegano nella direzione del campo elettrico. Gli elettroni affondano mentre le lacune vengono a galla. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

A livello microscopico, l'andamento dei portatori non è rettilineo: essi si trovano in uno spazio complesso pieno di ostacoli rappresentati dal reticolo, dalle impurezze e dagli altri portatori stessi. Tuttavia l'effetto macroscopico è che i portatori si muovono a una velocità costante v_d , chiamata velocità di deriva.

$$|v_d| = |\mu \vec{E}| = |\mu \nabla \Phi| \quad \vec{E} = -\nabla \Phi$$

dove μ è la mobilità del portatore, E è il capo elettrico e Φ il potenziale elettrostatico. La mobilità μ è indipendente dal campo elettrico, salvo che per campi elettrici molto forti, situazione che generalmente non si presenta mai nelle celle solari. Possiamo quindi scrivere le espressioni della densità di corrente di deriva (in inglese *drift*) per le lacune e per gli elettroni:

$$\vec{J}_p^{drift} = q p v_{d,p} = -q \mu_p p \nabla \Phi \quad \vec{J}_n^{drift} = q n v_{d,n} = -q \mu_n n \nabla \Phi$$

I principali meccanismi che limitano la mobilità dei portatori sono il reticolo cristallino, e la dispersione dovuta a impurità ionizzate. Per basse concentrazioni di impurità la mobilità è limitata principalmente dalla diffusione intrinseca dovuta al reticolo, con l'aumentare dell'impurità quella degli ioni diventa dominante. Bisogna notare, inoltre, che le lacune hanno una mobilità inferiore rispetto agli elettroni di un fattore tre.

Il processo di diffusione dei portatori riguarda invece il naturale spostamento di elettroni e lacune da regioni dove la concentrazione è più alta alle regioni dove a concentrazione più bassa. Le densità di corrente per questo fenomeno sono date dalle espressioni:

$$\vec{J}_n^{diff} = q D_n \nabla n \quad \vec{J}_p^{diff} = -q D_p \nabla p$$

dove “ D_p ” e “ D_n ” sono i coefficienti di diffusione di lacune e elettroni, moltiplicati per il gradiente delle densità di portatori e “ q ” la carica dei portatori.

All'equilibrio termico la corrente di diffusione e quella di deriva si bilanciano, annullandosi.

La densità di corrente totale è quindi data da:

$$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n + (\vec{J}_{disp})$$

dove J_{disp} è la corrente di dislocazione, che è generalmente ignorata nelle celle solari poiché dispositivi a corrente continua.

-1.6 Equazioni dei semiconduttori

Le equazioni dei dispositivi a semiconduttore possono descrivere il comportamento della cella solare:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho = q(p - n + N)$$

Questa è una delle forme in cui si può scrivere l'equazione di Poisson. Dove "ρ" è la densità di carica, "ξ" è la permeabilità elettrica del semiconduttore e "N" la carica dovuta ad agenti droganti e altre impurità ionizzate. Per l'equazione di continuità:

$$\nabla \cdot \vec{J} + q \frac{d\rho}{dt} = 0 \quad \text{posso ricavare le equazioni di continuità per elettroni e lacune:}$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = q(R_n - G + \frac{\delta n}{\delta t}) \qquad \nabla \cdot \vec{J}_p = q(G - R_p - \frac{\delta p}{\delta t})$$

dove "G" è la velocità di generazione di coppie elettrone lacuna dovuta dalla luce solare già definita in precedenza e R la velocità di ricombinazione (dove è inclusa anche la generazione termica di coppie).

Considerando ora un semiconduttore uniformemente drogato: mobilità e coefficienti di diffusione sono quindi indipendenti dalla posizione. Ipotizziamo inoltre che la corrente scorra lungo la sola direzione "x", e che il campo elettrico sia nullo (condizioni che come vedremo valgono nelle regioni quasi neutre nella giunzione pn della cella solare).

Possiamo scrivere le equazioni del semiconduttore come:

$$\frac{d\vec{E}}{dx} = \frac{q}{\epsilon}(p - n + N_D - N_A) \quad \text{equazione di Poisson.}$$

$$\frac{d}{dx}(J_p^{drift} + J_p^{diff}) = q\mu_p \frac{d}{dx}(p\vec{E}) - qD_p \frac{d^2 p}{dx^2} = q(G - R_p) \quad \text{Equazione continuità lacune}$$

$$\frac{d}{dx}(J_n^{drift} + J_n^{diff}) = q\mu_n \frac{d}{dx}(n\vec{E}) + qD_n \frac{d^2 n}{dx^2} = q(R_n - G) \quad \text{Equazione continuità elettroni}$$

Considerando ora i portatori minoritari, sappiamo che giocano un ruolo importante nella ricombinazione nelle regioni a basse iniezioni di droganti. Possiamo scrivere le espressioni:

$$R_p = \frac{n_p - n_{p,0}}{\tau_n} = \frac{\Delta n_p}{\tau_n} \quad \text{per le regioni di tipo p}$$

$$R_n = \frac{p_n - p_{n,0}}{\tau_p} = \frac{\Delta p_n}{\tau_p} \quad \text{per le regioni di tipo n.}$$

Dove Δn_p è la concentrazione degli elettroni (portatori minoritari) in eccesso in una zona quasi neutra di tipo p, mentre Δp_n è la concentrazione delle lacune (portatori minoritari) in eccesso in una zona quasi neutra di tipo N.

Se la corrente di deriva può essere ignorata posso scrivere:

$$\frac{d}{dx} (J_p^{\text{drift}} + J_p^{\text{diff}}) \approx -q D_p \frac{d^2 p}{dx^2} = q(G - R)$$

da cui posso ricavare:

$$D_p \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} = \frac{\Delta p_n}{\tau_p} - G(x) \quad \text{per le regioni n e} \quad D_n \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} = \frac{\Delta n_p}{\tau_n} - G(x) \quad \text{per le regioni p.}$$

che sono le equazioni di diffusione dei portatori minoritari. Da queste si può notare che i due termini che costituiscono la corrente di diffusione dei portatori minoritari in eccesso sono la generazione dovuta all'energia solare contro la ricombinazione. Queste equazioni saranno molto importanti, perché da esse è possibile ricavare le concentrazioni dei portatori minoritari della cella solare in funzione.

-1.7 Elettrostatica della giunzione pn

Immaginiamo di unire due pezzi di materiale semiconduttore uno di tipo p e l'altro di tipo n (cosa che in pratica non avviene mai). Non appena uniti, nella giunzione si avrà una corrente di diffusione: le lacune nel materiale p cominceranno diffondere verso la regione n dove la loro concentrazione è minore, e analogamente faranno lo stesso gli elettroni spostandosi dalla regione n a quella p. Questo processo ad un certo istante si interrompe: le lacune che sono spostate nella regione n, lasciano dietro di sé degli ioni negativi degli atomi accettori, mentre gli elettroni lasceranno degli ioni positivi donatori nella regione n. Si viene quindi a creare un campo elettrostatico interno che blocca la diffusione. Questa

regione di transizione da zona p a zona n prende il nome di *regione di svuotamento*, (o *regione di carica spaziale*) poiché effettivamente svuotata sia di elettroni che di lacune. Le regioni invece dove gli agenti droganti non sono ionizzati prendono il nome di regioni quasi neutri. La differenza di potenziale elettrostatico risultante dalla formazione prende il nome di potenziale di costruzione (built in voltage) V_{bi} e può essere ricavato eguagliando la corrente di diffusione e quella di deriva all'equilibrio termico.

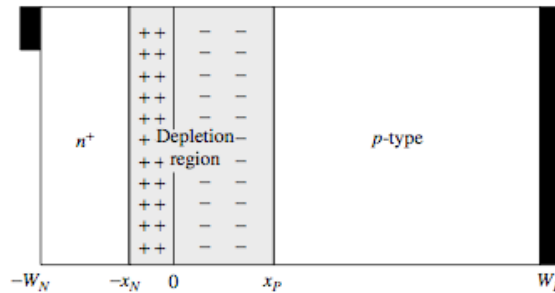


Figura 1.12: giunzione pn. La regione di svuotamento, priva di portatori, è compresa tra $-x_N$ e x_P . (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

L'equazione di Poisson per il diodo è data da:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{q}{\epsilon} (n_0 - p_0 + N_{A,i} - N_{D,i})$$

Nella regione di svuotamento ($-x_N < x < x_P$) n_0 e p_0 possono essere trascurati e si può scrivere:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{-q}{\epsilon} N_D \quad \text{per } -x_N < x < 0 \quad \text{e} \quad \nabla^2 \Phi = \frac{q}{\epsilon} N_A \quad \text{per } 0 < x < x_P.$$

Inoltre: $x_N N_D = x_P N_A$ da cui si può capire che la regione di svuotamento si estende maggiormente nella regione meno drogata del dispositivo.

Nelle zone quasi neutri si assume che il potenziale sia nullo:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad \text{per } x \leq -x_N \quad \text{e per } x \geq x_P.$$

ponendo $\Phi(x_P) = 0$ è facile calcolare: $\Phi(x) - \Phi(x_P) = \int E dx$

$$\Phi(x) = V_{bi}, \quad \text{per } x \leq -x_N;$$

$$\Phi(x) = V_{bi} - qN_D (x + x_N)^2 / 2\epsilon, \quad \text{per } -x_N < x \leq 0;$$

$$\Phi(x) = qN_A(x - x_p)^2 / 2\epsilon, \text{ per } 0 \leq x < x_p;$$

$$\Phi(x) = 0, \text{ per } x \geq x_p.$$

poiché il potenziale elettrostatico dev'essere continuo in $x=0$ posso scrivere:

$$V_{bi} - \frac{qN_D}{2\epsilon}x_N^2 = \frac{qN_A}{2\epsilon}x_p^2 \quad \text{da cui assieme a } x_N N_D = x_p N_A \quad \text{posso ricavare la larghezza}$$

della regione di svuotamento W_D :

$$W_D = x_N + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}}$$

per condizioni di non equilibrio se si applica un potenziale V alla giunzione avremo:

$$W_D(V) = x_N + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - V)}$$

Figura 1.13 mostra il diagramma a bande (a), il campo elettrico (b) e la densità di carica (c) per una cella solare all'equilibrio:

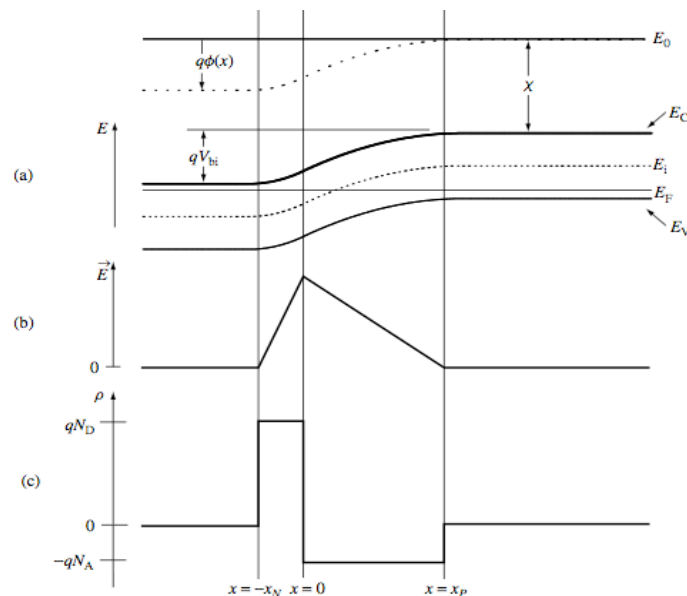


Figura 1.13: diagramma a bande, campo elettrostatico e densità di carica di una giunzione pn in cui non circola corrente. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

dove X rappresenta l'affinità elettronica, ovvero l'energia necessaria per strappare un

elettrone dalla banda di conduzione ed E_0 è l'energia alla quale un elettrone è completamente libero da tutte le forze esterne.

Abbiamo quindi descritto la struttura basilare di una cella solare: una giunzione pn costituita da due regioni quasi neutre e da una regione di svuotamento. Generalmente la zona n è chiamata *emettitore* ed è quella maggiormente drogata e più sottile. La zona p invece è chiamata *base* e ha livelli di drogaggio più bassi. La base è anche chiamata regione di assorbimento, visto che la maggior parte della luce viene assorbita in essa dato lo spessore minimo della zona n. Vi è infatti una forte asimmetria tra le due regioni quasi neutre sia a livello di struttura, sia per quanto riguarda il drogaggio che è molto più forte nella regione n. Questo per far sì che gli elettroni eccitati nella zona p vengono "raccolti" dal campo elettrico della zona di carica spaziale e portati nella zona n. In seguito vengono trasferiti al carico attaccato in parallelo alle celle fotovoltaiche. Il diodo viene utilizzato in maniera inversa rispetto a quelli impiegati nell'elettronica dove il campo elettrostatico della regione di svuotamento viene indebolito dalla tensione applicata con polarizzazione diretta, favorendo la corrente di diffusione e lasciando di fatto passare la corrente imposta.

-1.8 Funzione caratteristica della cella solare

È possibile ricavare la funzione caratteristica della cella solare che legghi corrente e tensione dalle equazioni di diffusione dei portatori minoritari. Per fare questo dobbiamo stabilire le condizioni limite ai contatti ohmici.

A $x=-W_N$ se avessimo un contatto ohmico ideale si avrebbe $\Delta p=0$, ovvero nessun elettrone che si ricombina. Tuttavia a causa del brusco cambiamento dal reticolo cristallino al contatto e allo strato di materiale anti-riflessione (SiO_2 nelle celle solari al silicio) vi sono molte imperfezioni che implicano:

$$\Delta p(-W_N) = \frac{D_p}{S_{F,eff}} \frac{d \Delta p}{dx} \quad \text{per } x=-W_N.$$

$S_{F,eff}$ è la velocità di ricombinazione effettiva di superficie, questa dipende da vari parametri tra cui anche la polarizzazione della cella. Facendo tendere $S_{F,eff}$ a infinito tornano alle condizioni di idealità del contatto ohmico.

Dall'altro estremo del dispositivo, a $x=W_P$ vi è l'altro contatto ohmico. Anche questo idealmente avrebbe un eccesso di portatori minoritari pari a zero, $\Delta n=0$. Per limitare la

presenza di elettroni viene aggiunta una zona sottile a più alto drogaggio di donatori, chiamata Back Surface Field (BSF). Questa aumenta la probabilità che i portatori minoritari vengano “raccolti”. Possiamo quindi scrivere:

$$\Delta n(W_p) = -\frac{D_n}{S_{BSF}} \frac{d \Delta n}{dx} \quad \text{per } x=W_p.$$

Dobbiamo inoltre valutare le condizioni limite alla giunzione, a $x=-x_N$ e $x=x_P$. In condizioni di equilibrio, senza illuminazione e voltaggio applicato, l'energia di Fermi rimane costante per ogni “x”. In condizioni di non equilibrio è invece utile introdurre il concetto di energie di quasi-Fermi. La luce colpendo il materiale semiconduttore promuove degli elettroni nella banda di conduzione, generando delle coppie elettrone lacuna extra. Questi portatori inizialmente hanno un'elevata energia cinetica, che tuttavia perdono velocemente (10^{-12} sec) emanando e assorbendo fononi. Si crea uno stato in cui elettroni e lacune sono entrambi in equilibrio termico con il reticolo e in equilibrio chimico con i fononi, e si ha energia cinetica media $E_{cn}=E_{cp}=(3/2)kT_0$. La densità di elettroni e lacune sono quindi maggiori rispetto a quelle che si avrebbero nell'oscurità: $n>n_0$ e $p>p_0$ da cui $np>n_i^2$. L'energia di Fermi è data dalla temperatura del reticolo, alla quale l'energia cinetica è pari a $E_c=(3/2)kT_0$, tuttavia la concentrazione maggiore di lacune la porterebbe più verso la banda di valenza mentre quella di elettroni verso la banda di conduzione.

La soluzione del dilemma è data dalla seguente spiegazione: esistono sempre due distribuzioni di Fermi, quella f_c con energia di Fermi F_c relativa agli stati occupati nella banda di conduzione e degli elettroni dei donatori, e quella f_v con energia di Fermi F_v relativa agli stati occupati nella banda di valenza e agli elettroni dei donatori (che quindi fornisce la densità di lacune nella banda di valenza). All'equilibrio termico le energie F_v e F_c coincidono. Si può quindi scrivere:

$$p = n_i \exp\left\{\frac{(E_i - F_p)}{kT}\right\} \quad n = n_i \exp\left\{\frac{(F_n - E_i)}{kT}\right\}$$

dove E_i è l'energia di Fermi del semiconduttore intrinseco, generalmente molto vicina alla metà del band gap.

In figura possiamo vedere il diagramma a bande di una cella solare in condizioni di non equilibrio, quando ad esempio la cella è illuminata.

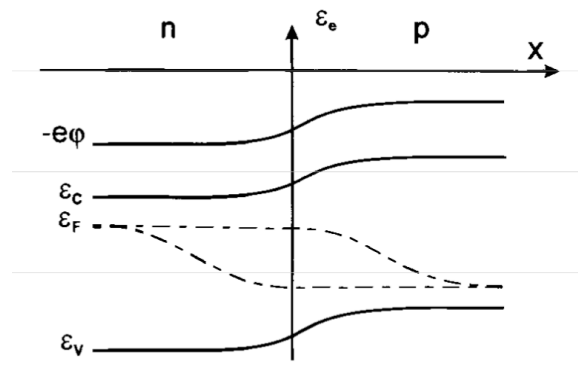


Figura 1.14: diagramma a bande di una giunzione pn a riposo con la rappresentazioni delle energie di Fermi. (dal libro "Physics of Solar Cells")

Il potenziale generato dall'energia solare nella cella fotovoltaica si può quindi scrivere come:

$$qV = F_N(-W_N) - F_P(W_P)$$

Tuttavia nelle regioni quasi neutri le concentrazioni di portatori maggioritari rimangono pressoché costanti. L'energia di quasi-Fermi della banda di conduzione nella zona di tipo n rimane quindi costante e si può scrivere $F_N(-W_N) = F_N(-x_N)$ e analogamente nella zona p $F_P(x_P) = F_P(W_P)$. Assumendo che entrambe le energie di quasi-Fermi rimangano costanti nella regione di svuotamento, si può scrivere:

$$qV = F_N(x) - F_P(x) \quad \text{per } -x_N < x < x_P.$$

Dalle relazioni precedenti è possibile ricavare le leggi di giunzione, le condizioni limite ai lati della regione di carica spaziale, cioè le concentrazioni dei portatori minoritari ai capi della regione di svuotamento:

$$p_N(-x_N) = \frac{n_i^2}{N_D} \exp\{qV/kT\} \quad n_P(x_P) = \frac{n_i^2}{N_A} \exp\{qV/kT\} .$$

Abbiamo quindi ricavato le condizioni nei punti chiave del dispositivo, $-W_N$, $-x_N$, x_P e W_P . È quindi possibile risolvere le equazioni differenziali di diffusione dei portatori minoritari, calcolando le concentrazioni delle lacune e degli elettroni minoritari in eccesso, tenendo conto che $G(x)$ può essere scritta nella cella solare come:

$$G(x) = (1-s) \int_{\lambda} (1-r(\lambda)) f(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha(x+W_N)} d\lambda$$

risolvo l'equazione differenziale $D_p \frac{d^2 \Delta p_N}{dx^2} = \frac{\Delta p_N}{\tau_p} - G(x)$ da cui ottengo:

$$\Delta p_N = A_N \sinh[(x+x_N)/L_p] + B_N \cosh[(x+x_N)/L_p] + \Delta p'_N(x)$$

dove L_p è la lunghezza di diffusione dei portatori minoritari, definita come $L_p = (D_p \tau_n)^{1/2}$.

le soluzioni particolari dovute da $G(x)$, $\Delta p'_N$ sono date da:

$$\Delta p'_N = -(1-s) \int_{\lambda} \frac{\tau_p}{(L_p^2 \alpha^2 - 1)} (1-r(\lambda)) f(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha(x+W_N)} d\lambda$$

usando le condizioni limite è possibile ricavare i termini A_N e B_N . Con procedimento analogo si può ricavare l'espressione per Δn_P :

$$\Delta n_P = A_p \sinh[(x-x_p)/L_n] + B_p \cosh[(x-x_p)/L_n] + \Delta n'_p(x) .$$

Ora che abbiamo ricavato i portatori minoritari in eccesso, possiamo scrivere la formula delle correnti dei portatori minoritari nelle regioni quasi neutre (valide nelle regioni dove sono minoritari) con convenzione attiva, visto che la cella solare si considera come una batteria:

$$\vec{J}_p(x) = -q D_p \frac{d \Delta p_N}{dx} \quad \text{per } -W_N \leq x \leq -x_N$$

$$\vec{J}_n(x) = q D_n \frac{d \Delta n_P}{dx} \quad \text{per } x_P \leq x \leq W_P$$

come si può vedere queste sono solo correnti di diffusione, visto che come discusso in precedenza il campo elettrico è trascurabile nelle regioni quasi neutre.

La corrente totale della cella solare è data da:

$$I = A [J_p(x) + J_n(x)]$$

dove "A" è l'area della cella solare. Questa formula è invece valida in tutta la cella. Possiamo quindi scrivere la corrente $J_n(-x_N)$ uscente totale, unendola a quella dei portatori minoritari, tramite l'integrazione delle equazione di continuità degli elettroni.

$$\int_{-x_N}^{x_P} \frac{d\vec{J}_n dx}{dx} = \vec{J}_n(x_P) - \vec{J}_n(-x_N) = q \int_{-x_N}^{x_P} [R(x) - G(x)] dx$$

La velocità di ricombinazione può essere approssimata considerandola costante nella regione di carica spaziale. La corrente totale può essere riscritta come:

$$I = A [J_p(-x_N) + J_n(x_P) + J_D - q \frac{W_D n_i}{\tau} (\exp\{qV/2kT\} - 1)]$$

dove $J_n(x_P)$ e $J_p(-x_N)$ sono le correnti minoritarie, J_D è la corrente dovuta alla generazione di coppie elettrone lacuna nella zona di svuotamento, e l'ultimo termine rappresenta la ricombinazione sempre nella regione di carica spaziale.

Avendo ricavato Δp_N e Δn_P è possibile raggiungere un'espressione per le correnti minoritarie. Tramite alcuni passaggi algebrici si arriva ad un'espressione finale della corrente:

$$I = I_{SC} - I_{o1} (\exp\{qV/kT\} - 1) - I_{o2} (\exp\{qV/2kT\} - 1)$$

dove I_{SC} è la corrente di corto circuito (short-circuit) costituita dai contributi dell'energia solare nella regione n, in quella p e nella regione di carica spaziale. I termini con segno negativo invece indicano le *correnti di saturazione oscura*, quelle dovute alla ricombinazione: I_{o1} nelle regioni quasi neutre e I_{o2} nella regione di svuotamento, quest'ultima dipende dalla polarizzazione.

Le espressioni di queste correnti sono piuttosto complicate, e dipendono da vari parametri, come la struttura della cella, il materiale utilizzato e le condizioni operative. Tuttavia è stata data un'idea di come si possa arrivare alla relazione generale, che può permetterci di capire il funzionamento della cella solare. Da una parte abbiamo il contributo positivo della luce solare, dall'altra quello negativo delle correnti di saturazione oscura dovute alla ricombinazione. È possibile visualizzare un circuito equivalente.

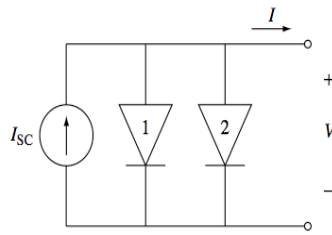


Figura 1.15: Schema equivalente di una cella solare. Un generatore di corrente rappresenta la corrente di corto circuito della cella. Nei due diodi in parallelo scorre la corrente di ricombinazione della regione quasi neutra e di carica spaziale. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

La corrente di corto circuito, quella dovuta solamente al contributo dell'energia solare viene vista come un generatore di corrente. In parallelo ad esso si hanno due diodi, in cui scorre la corrente di ricombinazione delle regioni quasi neutre (diodo 1) e della regione di carica spaziale (diodo 2).

Trascurando la corrente dovuta alla ricombinazione nella regione di svuotamento possiamo quindi tracciare un diagramma I-V:

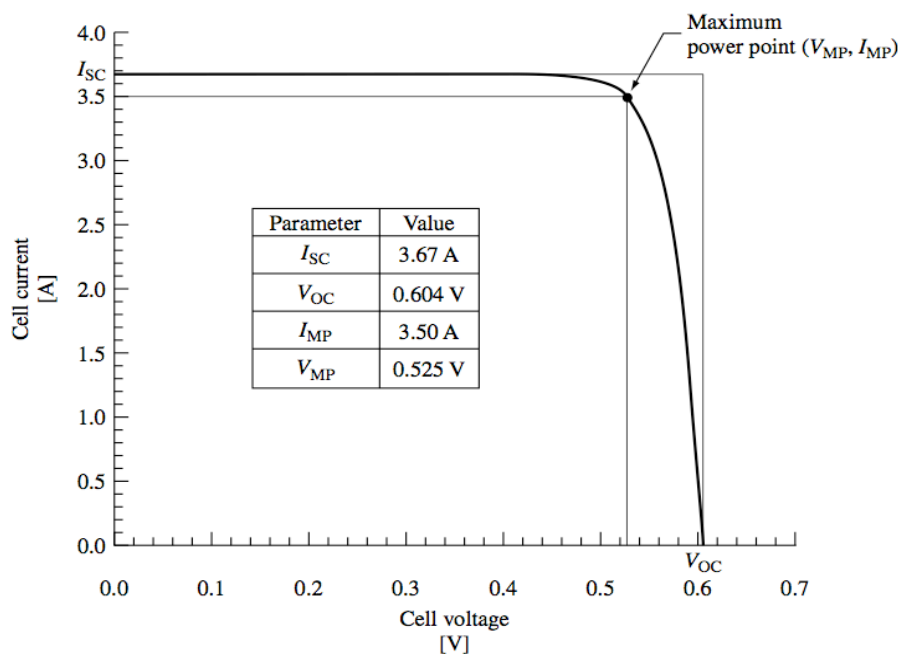


Figura 1.16: Funzione caratteristica della cella fotovoltaica con relative figure di merito. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Qui sono riportate le figure di merito più importanti per la valutazione dell'efficienza della cella solare: la corrente di corto circuito I_{SC} , il voltaggio a circuito aperto V_{OC} e il fattore di riempimento FF (Fill Factor). Per basse tensioni applicate la corrente del diodo è trascurabile e la corrente può essere approssimata a quella a corto circuito. All'aumentare della tensione la corrente di ricombinazione diventa dominante, e la corrente generata

dalla cella solare cala velocemente.

Possiamo calcolare la tensione a circuito aperto imponendo $I=0$ nell'equazione caratteristica:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC} + I_{ol}}{I_{ol}}$$

Bisogna notare che V_{OC} dipende dalla temperatura: alzando la temperatura si ha una maggiore concentrazione di portatori liberi intrinseci n_i che aumenta la corrente di saturazione oscura, ovvero la velocità di ricombinazione. Questo porta ad un abbassamento della tensione a circuito aperto. Per quanto riguarda la corrente di corto circuito, questa non è pesantemente influenzata dalla temperatura per condizioni operative tipiche.

Un'altra figura di merito importante è il *fattore di riempimento* (Fill Factor - FF). Questo può essere calcolato trovando il punto nella funzione caratteristica in cui la potenza è massima, e in figura è rappresentato da (V_{MP}, I_{MP}) . La potenza è costituita dal rettangolo il cui vertice è tale punto. Il FF viene definito come il rapporto tra la potenza massima erogabile dalla cella solare cioè il rettangolo con vertice (V_{MP}, I_{MP}) , e la potenza dovuta al prodotto di I_{SC} e V_{OC} , cioè il rettangolo contenente tutta la funzione caratteristica. In pratica il FF è una figura di merito che indica quanto la funzione caratteristica sia "rettangolare".

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}}$$

La più importante figura di merito è, in ogni caso, l'*efficienza di conversione energetica* della cella solare definita come:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{FF V_{OC} I_{SC}}{P_{in}}$$

cioè il rapporto tra potenza massima erogabile da una cella solare e potenza incidente P_{in} , determinata dalle proprietà dello spettro di luce incidente nella cella solare.

Un'altra figura di merito che possiamo menzionare è l'*efficienza di raccoglimento* definita come il rapporto tra la corrente di corto circuito e la corrente che si avrebbe se tutti i fotoni

con energia maggiore di E_G creassero coppie elettrone lacuna.

$$\eta_C^{ext} = \frac{I_{SC}}{I_{ph}} \quad \text{dove} \quad I_{ph} = qA \int_{\lambda < \lambda_G} f(\lambda) d\lambda$$

L'efficienza di raccoglimento può anche essere definita in un altro modo:

$$\eta_C^{int} = \frac{I_{SC}}{I_{gen}} \quad \text{dove} \quad I_{gen} = q A (1-s) \int_{\lambda < \lambda_G} [1-r(\lambda)] f(\lambda) (1-e^{-\alpha(W_N+W_P)})$$

come si può notare I_{gen} tiene conto anche del fattore ombra dovuto dalla griglia di contatto e delle perdite dovute alla riflessione. Le efficienze si distinguono quindi come interna, dove vengono considerati i fattori di perdita dovuti alla struttura della cella solare, ed esterna, dove invece non se ne tiene conto.

Abbiamo quindi compreso il funzionamento di una cella fotovoltaica, e quali sono i fattori principali che ne determinano l'efficienza. Nella progettazione di tale dispositivo i principali obiettivi sono quindi due:

- Minimizzare la velocità di ricombinazione in tutta la cella
- Massimizzare l'assorbimento dei fotoni con energia maggiore di quella di gap.

-1.9 Celle solari p-i-n

Questo tipo di celle sfrutta la proprietà di alcuni materiali di generare portatori liberi in prossimità della superficie, come avviene per la maggior parte dei semiconduttori a gap diretto che hanno un alto coefficiente di assorbimento. Viene posto del materiale intrinseco, cioè non drogato, tra due strati di semiconduttore drogato di tipo p e di tipo n. Operando in questo modo la regione di svuotamento occupa la maggior parte della cella e il suo campo elettrostatico aiuta la raccolta dei portatori. Questo può permettere l'uso di materiali con tempi di vita dei portatori non elevati, come nelle celle costituite da silicio amorfo. La caratteristica tensione corrente non subisce grosse modifiche. In figura possiamo vedere il diagramma a bande di una tipica cella pin, nel quale si può notare la lunghezza della regione di carica spaziale, che viene definita come:

$$W_D = x_N + W_I + x_P$$

dove W_I è lo spessore dello strato di materiale intrinseco. Non è più necessario il BSF in

quanto S_{BSF} tende ad infinito.

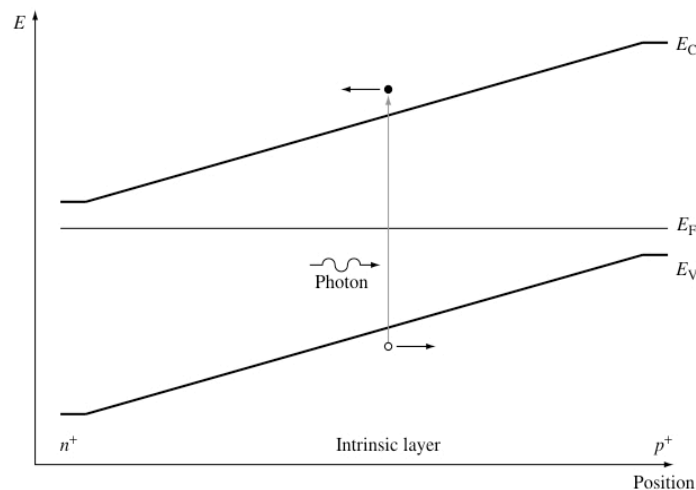


Figura 1.17: diagramma a bande di una cella p-i-n (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

-1.10 Limiti teorici della conversione fotovoltaica

L'efficienza di conversione energetica diventa una questione importante e delicata nel campo delle tecnologia fotovoltaica e, in generale, quando si parla di fonti energetiche. L'energia solare presenta una densità di potenza da una parte abbastanza alta da poter pensare di ricavare da essa una fonte energetica con un rapporto costo-efficienza fattibile, dall'altra abbastanza bassa da rendere questo compito molto difficile.

Nelle celle solari l'efficienza, come abbiamo visto, sta appunto nella capacità del dispositivo di generare coppie elettrone lacuna dall'energia solare e di trasferirle al carico prima che queste si ricombinino. Il processo di ricombinazione, tuttavia, è dovuto da una serie di meccanismi che non possono essere ricollegati ad uno specifico materiale: questo fenomeno è da considerarsi controparte della generazione e risulta impossibile da eliminare del tutto.

Il limite teorico di efficienza calcolato per una cella solare è del 40.7%, per uno spettro di potenza di un corpo oscuro a 6000 gradi Kelvin. Questo non risulta essere particolarmente elevato: ciò è dovuto al fatto che le celle solari non riescono a prelevare del tutto efficacemente l'energia solare. Non tutti i fotoni vengono assorbiti e inoltre tra quelli assorbiti non tutti contribuiscono alla formazione di energia elettrica, a causa della ricombinazione. Il limite di efficienza teorico di Carnot, calcolato su basi termodinamiche, per un motore reversibile in funzione tra un corpo a 300K a uno a 6000K è invece del 95% ed è molto distante da quello delle celle solari.

Vi sono tuttavia delle celle in via di sviluppo il cui obiettivo è quello di abbattere il limite del 40.7%. Queste vengono spesso chiamate celle solari di terza generazione. Le più "vecchie" appartenenti a questa famiglia sono le celle solari a multi-giunzione, che andremo ad analizzare in seguito. Tuttavia si stanno studiando altri tipi di nuove celle che utilizzano le tecnologie più avanzate a partire dalla nanotecnologia. Altri tipi di celle che possiamo menzionare sono i convertitori termofotovoltaici (TPV), i convertitori termofotonici (TPH), le celle solari a banda intermedia (IB) e le celle a portatori caldi, che idealmente possono raggiungere dei rendimenti ideali fino al 85.4%.

CAPITOLO 2

Celle Solari al Silicio Cristallino e Policristallino

-2.1 Alcune proprietà del silicio

Come già detto, attualmente il materiale più utilizzato nella produzione fotovoltaica è il silicio, in particolare quello cristallino. Questo in natura non si trova mai libero, ma sempre in combinazione con l'ossigeno, formando ossidi e silicati. La maggior parte della crosta terrestre è costituita da silice e da miscele di silicio con alluminio, magnesio ed altri elementi. La crosta terrestre è costituita per circa il 26% da silicio, che risulta essere il secondo elemento più abbondante in essa, dopo l'ossigeno.

L'energy gap E_G indiretto del silicio a 25°C è di 1.12 eV, mentre quello diretto supera i 3 eV. Questo ne determina, come avevamo già detto, il basso coefficiente di assorbimento, e quindi l'elevata permeabilità alla luce. A pressione atmosferica il silicio cristallino è un diamante a struttura cubica. A differenza della maggior parte degli elementi, il silicio si espande quando si solidifica e si contrae quando fonde.

Per il drogaggio nel fotovoltaico gli elementi più utilizzati sono il fosforo e il boro. Le concentrazioni di impurezze, espresse come numero di atomi per cm^3 , vanno da 10^{14} a 10^{23} e possono essere misurate direttamente con strumenti adatti. Una misura indiretta è invece effettuata tramite la durata di vita dei portatori minoritari. I metalli di transizione usati, ferro, cromo e nichel deteriorano la durata di vita dei portatori minoritari e quindi le performance della cella solare. La ricombinazione dominante, è quella dovuta ai difetti, relativa ai tempi di vita dei portatori Shockley-Read-Hall. Cristalli molto puri possono avere tempi di vita dei portatori che vanno fino ai 10 000 μs . Il silicio drogato con fosforo o boro ha tempi che vanno da 50 a 300 μs , e le celle solari hanno bisogno di almeno 25 μs . La ricombinazione di Auger invece diventa dominante ad alte concentrazioni di portatori. Per quanto riguarda la ricombinazione da banda a banda essa è generalmente trascurabile, tuttavia è da notare che nelle celle con efficienze record, quelle costituite da materiali molto raffinati, comincia ad avere un certo peso.

Il silicio assorbe molto bene la luce con lunghezza d'onda che va da 0.4 a 1.5 μm , una proprietà che risulta molto importante per il fotovoltaico, visto lo spettro di potenza è massimo in questo intervallo. Ha un indice di rifrazione piuttosto alto, per cui vengono sempre applicati degli strati di materiale anti-riflessione.

Silicio elementare, polisilicio e silicio amorfo sono relativamente inerti e sono considerati non tossici. Nei processi di produzione, invece, vengono prodotti gas inquinanti come CO_2 , NO_x e SO_2 . Tuttavia è da notare che l'energia utilizzata e l'inquinamento provocato dalla fabbricazione di pannelli fotovoltaici vengono "ripagati" nei primi quattro o cinque anni di vita del dispositivo che genera energia pulita e ha una durata di funzionamento di circa 25 anni.

-2.2 Principali differenze tra celle a silicio cristallino e celle a silicio policristallino

Per diversi decenni l'industria del fotovoltaico è stata dominata da substrati di silicio cristallino di Czocharalski di tipo p, anche per via della loro diffusione nel campo dell'elettronica. Tuttavia, a partire dalla fine degli anni ottanta, è entrato in scena anche il silicio policristallino. Questo tipo di materiale ha efficienze più basse, ma presenta il vantaggio di avere costi più convenienti rispetto al silicio cristallino. Inizialmente la figura di merito 'costo per watt generato' era molto simile tra i due materiali, ma recentemente si sono riusciti ad ottenere rendimenti più alti nel silicio policristallino rendendo possibile la sua scesa nel mercato.

Le principali differenze tra materiale policristallino e cristallino sono due:

- la qualità del materiale cristallino è più bassa rispetto al monocristallo, a causa di imperfezioni dovute a bordi di grano e dislocazioni. Ciò provoca un abbassamento della vita dei portatori che porta ad efficienze più basse. Per affrontare questo problema si usano due tipi di strategie: passivazione delle impurezze tramite idrogeno e il loro assorbimento durante il processo produttivo.
- La superficie policristallina è sostanzialmente diversa per cui c'è bisogno di altre tecniche, rispetto al monocristallino, per quanto riguarda l'intrappolamento (tessitura) e l'assorbimento della luce.

Possiamo vedere in tabella il confronto tra silicio cristallino e policristallino nel mercato globale.

Year	Cz-Si solar cells		MC-Si solar cells	
	Output [MW]	Market share [%]	Output [MW]	Market share [%]
1996	48.7	55	28.4	32
2000	92.0	32	146.7	51

-2.3 Superfici

Le superfici della cella solare sono un punto molto delicato, che richiede un'analisi dettagliata. In certe tipologie di celle, infatti, la ricombinazione superficiale diventa determinante, ad esempio in quelle a pellicola sottile (thin-film cells). Possiamo suddividere le superfici in due tipi: quelle in cui ci sono i contatti, con la presenza quindi del metallo conduttore, e quelle senza.

I contatti di una cella dovrebbero essere selettivi: da una parte dovrebbero permettere di far passare i portatori maggioritari dal silicio al metallo senza perdite energetiche, mentre dall'altra dovrebbero bloccare i portatori del segno opposto, quelli minoritari. I contatti diretti tra silicio e metallo generalmente non godono di questa proprietà, e l'approccio più utilizzato è quello di creare regioni con drogaggi più forti a ridosso del metallo in modo da non avere perdite per i portatori maggioritari, e da abbassare il flusso di portatori minoritari, come nel caso già descritto del BSF (in letteratura per indicare regioni a elevati drogaggi si usano generalmente le notazioni p^+ e n^+). Lo spessore della zona drogata dev'essere maggiore della lunghezza di diffusione dei portatori minoritari e il drogaggio abbastanza elevato da ridurre la resistenza per i portatori maggioritari, ma non eccessivo per evitare gli effetti indesiderati di drogaggio pesante. Nelle regioni p i contatti in alluminio hanno proprietà favorevoli con il boro, garantendo la creazione di regioni a drogaggio elevato profonde e un buon assorbimento dei portatori.

Nelle superfici dove non sono presenti i contatti, invece, si trovano molti "stadi trappola" nella banda proibita dovuti alla brusca interruzione del reticolo cristallino. Questi creano un elevato fattore di ricombinazione che viene affrontato in due modi: nel primo si cerca di eliminare gli stadi proibiti, ripristinando la struttura del reticolo con l'aggiunta di un

materiale isolante appropriato, come l'ossido di silicio SiO_x ; nel secondo si effettua un'operazione analoga a quella descritta nei contatti, riducendo la densità di portatori in eccesso. Questo può essere ottenuto con drogaggio o con cariche nella superficie, come nell'elettrostatica di una struttura MOS.

Si dice, quindi, che le superfici nelle quali si agisce con tecniche del genere vengono rese passive. Generalmente si ottengono migliori risultati nelle zone n o intrinseche che nelle zone p. La passivazione risulta inoltre molto più semplice ed efficace nelle zone prive di contatti.

-2.4 La superficie frontale

-2.4.1 L'emettitore

Nella superficie frontale, ovvero la parte esposta al sole della cella, i contatti sono costituiti da una griglia. Questi sono progettati per avere la minima resistenza col silicio e devono essere stretti e spessi per ridurre la resistenza di serie il più possibile (ricordiamo che la resistenza è inversamente proporzionale alla superficie del conduttore e direttamente proporzionale alla lunghezza).

Sotto le linee metalliche il substrato dev'essere drogato fortemente in modo da rendere i contatti selettivi. L'emettitore, di bassa profondità, si estende lungo tutta la superficie frontale comportandosi come un "*elettrodo trasparente*" consentendo ai portatori minoritari nella base un cammino a bassa resistenza verso i contatti. In figura 2.1 abbiamo alcuni esempi di configurazioni dell'emettitore.

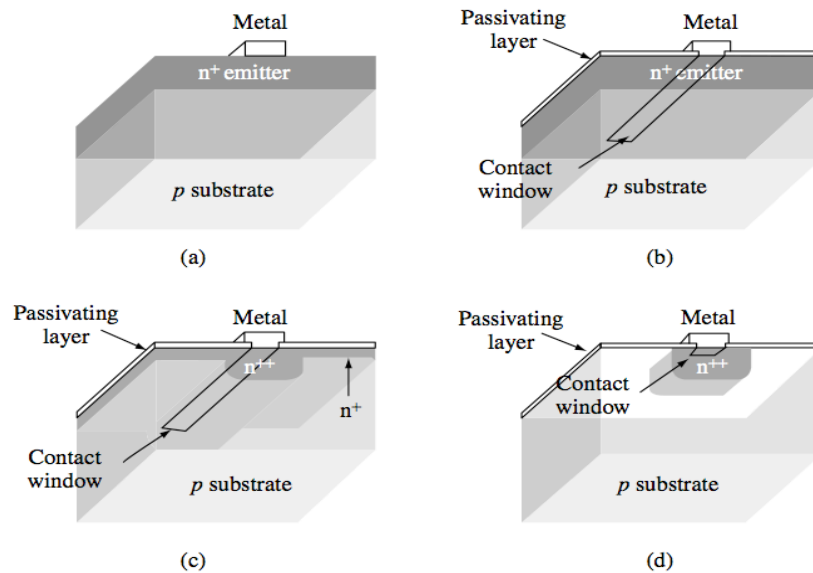


Figura 2.1: Diversi tipi di contatti. In figura a una semplice configurazione, in figura b i contatti con superficie di passivazione, in c e d due tipologie di contatti sepolti. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Se la superficie non è stata resa passiva (figura 2.1 (a)) la regione n dev'essere più sottile possibile: l'elevata concentrazione di trappole rende infatti difficile il cammino dei portatori liberi verso il contatto e si cerca di ridurre la ricombinazione con un alto drogaggio.

Quando invece si utilizza uno strato di passivazione (figura 2.1 (b)) è possibile abbassare il livello di drogaggio, evitando così gli effetti degenerativi del drogaggio pesante. Per mantenere bassa la resistenza di contatto l'emettitore dev'essere tuttavia abbastanza profondo ($1\mu\text{m}$). La superficie di passivazione viene rimossa prima della metallizzazione nei punti in cui si posiziona la griglia: viene creata una finestra di contatto più stretta rispetto alla larghezza della linea di metallo in modo da ridurre la superficie di ricombinazione metallo-silicio.

Si possono inoltre avere altri tipi di design più raffinati. Ad esempio in figura 2.1 (c) dove la zona n presenta due profondità diverse a seconda delle esigenze: più stretta e meno drogata sotto lo strato di passivazione e più profonda e più drogata sotto il contatto. Se si hanno bassissime velocità di ricombinazione superficiale si evita addirittura l'emettitore, creando un contatto localizzato come in figura (d). Questi ultimi due esempi vengono chiamati rispettivamente *emettitori selettivi* e *d emettitori selettivi localizzati*, o *contatti sepolti*. Il loro punto debole è il trasporto: gradienti più forti per portatori minoritari e resistenze di serie più alte per portatori maggioritari a causa dell'elevata concentrazione di corrente vicino ai contatti.

-2.4.2 Rivestimento Antiriflesso (Antireflection Coating ARC)

Il silicio, come abbiamo già detto, ha un indice di rifrazione relativamente alto e riflette più del 30% della luce. Per questo motivo viene impiegato uno strato di materiale non assorbente con un indice di rifrazione più basso.

Se lo strato è spesso, nell'ordine della lunghezza d'onda della luce ($1\mu\text{m}$ per quella solare), al suo interno non si hanno effetti di interferenza. Questo è il caso dell'incapsulamento, dove si ha uno strato laminato di vetro con indice di rifrazione n_{ARC} .

Nel caso del rivestimento antiriflesso, invece, si parla di uno strato di dielettrico progettato per sopprimere il riflesso attraverso l'effetto delle interferenze. La riflessione della luce è minima quando lo spessore dello strato è $n_{\text{ARC}}\lambda_0/4$, dove λ_0 è la lunghezza d'onda nel vuoto. In questo caso infatti le riflessioni di luce, a tale frequenza, si eliminano per interferenza. Per quanto riguarda la riflessione alle altre frequenze non risulta nulla, tuttavia sempre a livello minore o uguale rispetto al non avere affatto il rivestimento. Generalmente lo spessore è di 600nm , dove il flusso di fotoni è massimo per lo spettro solare. Il materiale utilizzato per celle industriali è solitamente TiO_x . È anche utilizzato SiN_x che agisce sia da strato passivante sia da rivestimento antiriflesso. Altri tipi di materiali sono utilizzati nelle celle ad alta efficienza prodotte in laboratorio, come SZn e MgF_2 . Il basso indice di rifrazione dello strato passivante di SiO_x , usato in alcune celle, può ridurre l'effetto del rivestimento, per questo si tende a renderlo più sottile possibile, sempre tenendo conto di non renderlo del tutto inefficace.

-2.4.3 Tessitura

Soluzioni alcaline, come KOH e NaOH , possono corrodere il silicio formando piramidi a base quadrata in posizioni casuali. Le dimensioni di profondità (generalmente di pochi micron) possono essere facilmente regolate controllando la temperatura e il tempo in cui avviene la reazione di corrosione. Questa tessitura dello strato rende possibile il riflettersi della luce da una piramide all'altra aumentando così l'assorbimento.

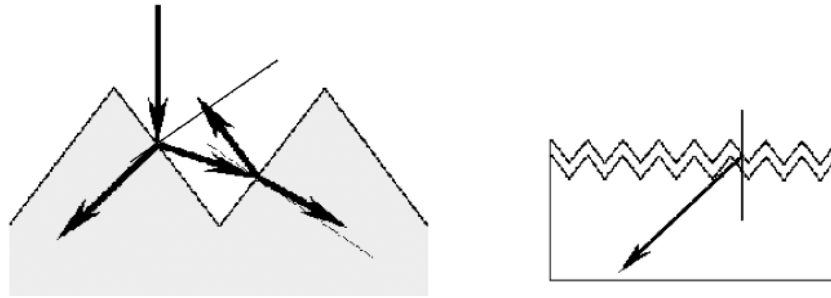


Figura 2.2: Effetto della tessitura superficiale: la luce viene riflessa alle piramidi confinanti aumentando la probabilità di cattura della radiazione luminosa. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

La tessitura è utilizzata sia nelle celle industriali che quelle da laboratorio, e in combinazione con il rivestimento antiriflesso riduce la riflessione.

La luce inoltre entra nella base inclinandosi di più rispetto a una cella senza tessitura. Questo fa sì che l'assorbimento dei fotoni possa avvenire più vicino alla giunzione favorendo la raccolta dei portatori minoritari.

-2.5 Substrato

-2.5.1 Materiali

Le più alte efficienze di una cella solare sono state ottenute con un substrato di silicio monocristallino a zona di flottaggio (FZ-Si), che oltre ad avere una struttura cristallina perfetta presenta pochissime impurezze (O, C, N). Si raggiungono tempi di vita di SRH nell'ordine del millisecondo. Un altro tipo di buon silicio è il wafer di Czochralski magnetico, (MCz-Si) che contiene meno ossigeno rispetto a quello convenzionale di Czochralski. Questi tipi di materiali sono utilizzati nelle celle create in laboratorio ad alta efficienza.

Per quanto riguarda le celle industriali esse sono generalmente ricavate da wafer di Czochralski (Cz-Si), data la loro elevata disponibilità nel campo dell'elettronica. Questi a differenza dei precedenti contengono molte più impurezze, conservando tuttavia una buona perfezione cristallina, e hanno, quindi, tempi di vita dei portatori più corti.

In campo industriale si utilizzano inoltre substrati in policristallino (mc-Si). Questi vengono fatti crescere con procedure specifiche del settore fotovoltaico e presentano, oltre a difetti nel reticolo dovuti a dislocazioni e ai bordi di grano, alte concentrazioni di impurezze di metalli, a causa di una segregazione più bassa durante il procedimento di solidificazione relativamente veloce. Come conseguenza si hanno tempi di vita ancora più bassi.

Tuttavia, durante il processo di fabbricazione delle celle, i tempi di vita dei portatori

minoritari possono essere soggetti a forti variazioni. Mentre nei laboratori si cerca di preservare i tempi di vita già alti dei materiali raffinati, utilizzando trattamenti specializzati (pulitura della fornace, agenti chimici purissimi), nel campo industriale si è di fronte a una situazione più complessa. La soluzione adottata è quella di integrare delle procedure di assorbimento dei difetti durante il processo produttivo, con particolari trattamenti termici. I tempi di vita del substrato possono arrivare da 1 a 10 μs alla fine del processo.

Durante le procedure di assorbimento si crea una regione di accumulo delle impurezze, che non preclude la manifattura del dispositivo, e che spesso può essere rimossa facilmente. Diffusioni di fosforo e alluminio, utilizzate per lo strato del BSF, favoriscono condizioni ottimali per le procedure di assorbimento.

L'assorbimento dovuto al fosforo è effettuato in condizioni di supersaturazione. Il processo lascia tuttavia uno "strato morto" di fosforo inattivo, in prossimità della superficie, che riduce l'efficienza, se non rimosso.

Nella deposizione dell'alluminio, invece, si forma uno strato liquido di Al-Si, dove le impurezze tendono a segregarsi, data la loro elevata solubilità. Queste rimangono nello strato di assorbimento durante il raffreddamento, aumentando i tempi di vita dei portatori nel substrato.

-2.5.2 Drogaggio e Spessore

La scelta del livello di drogaggio è determinata sia dalla struttura della cella, sia dal meccanismo prevalente di ricombinazione del materiale. Alti drogaggi minimizzano la resistenza in serie dei contatti nella parte non illuminata. Nelle celle industriali è utilizzato un drogaggio dell'ordine di 10^{16} cm^{-3} , mentre alte efficienze sono state raggiunte sia con drogaggi di substrato elevati, come nei contatti selettivi, sia per drogaggi bassi.

Anche la scelta dello spessore di substrato è fortemente influenzata dalle proprietà del materiale e, ovviamente, dalla lunghezza di diffusione dei portatori minoritari. Nelle celle con lunghezza di diffusione più elevata dello spessore della cella, il fattore più importante diventa la velocità di ricombinazione superficiale. Celle più sottili inoltre assorbono meno luce, e l'intrappolamento diventa un fattore importante. Le perdite associate al trasporto di portatori estratti alla faccia non illuminata, invece, diminuisce rendendo lo spessore della cella.

Nelle celle industriali la lunghezza di diffusione, di circa 100 μm , è generalmente più bassa dello spessore. Queste infatti non risentono di una eventuale riduzione dello spessore,

perché raccolgono solo i portatori generati relativamente vicino alla superficie, e non vengono colpiti dalla ricombinazione nella superficie anteriore. Si impiegano quindi spessori dai 100 μm ai 300 μm , anche se la tendenza è quella di creare celle più sottili, in modo da risparmiare più materiale possibile.

-2.5.3 Effetti della dimensione

I lati della cella sono superfici ad alta fattore ricombinazione, e possono degradare le prestazioni, nelle celle lunghezze di diffusione elevata. Per le celle a prestazioni elevate si pensa di introdurre degli schemi di passivazione con diffusioni laterali. Nelle celle industriali invece questo tipo di ricombinazione è del tutto trascurabile: infatti la tendenza è quella di avere celle con dimensioni relativamente grandi, come 10 x 10 cm^2 o 12.5 x 12.5 cm^2 . Tuttavia maggiore è la dimensione, maggiore è la corrente da prelevare, e i contatti più lunghi aumentando la resistenza e quindi le perdite per effetto Joule, abbassando il rendimento. Per alleviare il problema, al prezzo di una minore superficie illuminata, i terminali della cella vengono saldati a dei bus presenti all'interno dell'area attiva diminuendo la distanza da dove la corrente viene raccolta.

-2.6 Superficie Posteriore

Come già menzionato, nelle celle industriali la passivazione della superficie posteriore non viene effettuata. Per quanto riguarda invece le celle ad alta efficienza, la passivazione dei contatti diventa essenziale. Viene prodotto un BSF, che può essere ridotto ai punti di contatto per passivazioni di superficie molto buone (analogamente alla superficie frontale). In alcuni casi uno strato di diffusione a drogaggio più leggero, sotto il BSF, può ridurre ulteriormente la ricombinazione superficiale. Questo può essere fatto con drogaggi dello stesso tipo, p^+ oppure n^+ . Tuttavia la giunzione deve preservare un carattere di circuito aperto (giunzione flottante). Come possiamo vedere in figura questa struttura non ha nulla a che vedere con quelle che si trovano a volte nelle celle industriali, dove i contatti sono inseriti all'interno di una diffusione parassita n^+ formatasi durante la diffusione frontale.

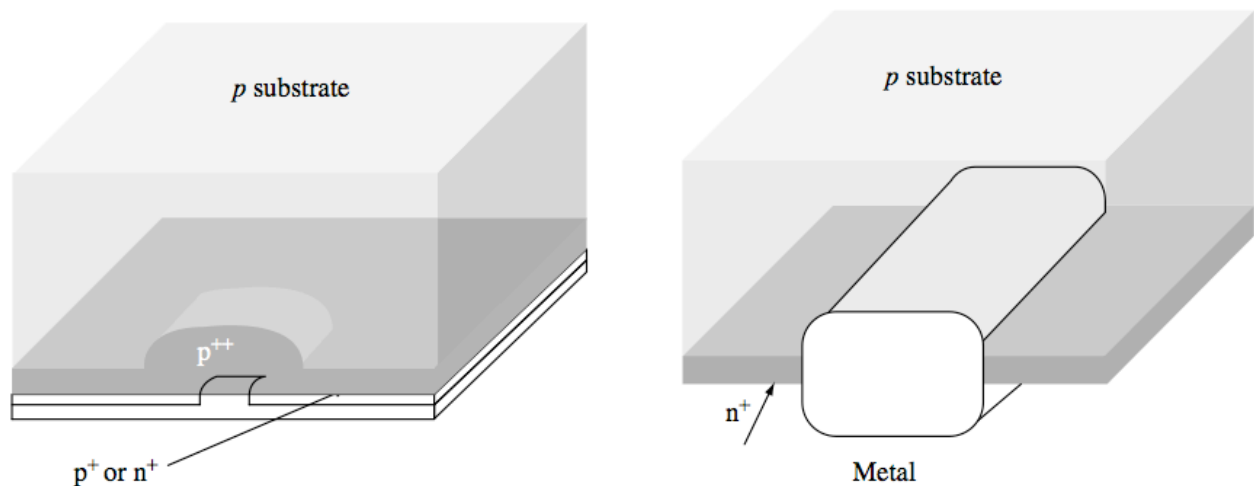


Figura 2.3: Esempi di contatti: a destra un contatto selettivo a giunzione flottante, a sinistra un contatto tipico di una cella industriale. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

-2.6.1 Intrappolamento Luce

Il silicio assorbe i fotoni ad alta energia, cioè ad elevate frequenze, con difficoltà, e spesso questi riescono a uscire dal sottostato senza contribuire alla generazione fotovoltaica. Si cerca quindi di aumentare la riflessione all'interno della cella, in modo da intrappolare i raggi solari per garantire la più alta probabilità di assorbimento possibile.

Questo è ottenibile facendo sì che la superficie non illuminata della cella agisca come uno specchio. I metalli sono in genere buoni specchi, tuttavia l'alluminio, dopo trattamento termico, ha bassi coefficienti di rifrazione. Una struttura silicio-ossido-metallo può dare buoni risultati.

Alla superficie frontale tale specchio non è ovviamente applicabile, ma si ha comunque un buon intrappolamento dovuto alla rifrazione interna totale. I raggi che colpiscono la superficie frontale possono infatti essere totalmente riflessi se incidono con un determinato angolo. La direzione di questi dentro la cella è del tutto casualmente.

L'effetto di un buon intrappolamento è quello di aumentare lo spessore di assorbimento effettivo della cella, questo è essenziale nelle celle a pellicola sottile. Nell'ottica geometrica è stato dimostrato che per una illuminazione isotropica il massimo fattore di aumento teorico è di $4(n_{Si}/n_{air})^2$, che corrisponde all'imprigionamento di un raggio solare che prima di riuscire a scappare dalla cella attraversa lo spessore della cella per cinquanta volte.

-2.7 Celle industriali e celle prodotte in laboratorio a confronto

In figura possiamo vedere la differenza tra una cella prodotta in laboratorio (a), e una prodotta a livello industriale (b).

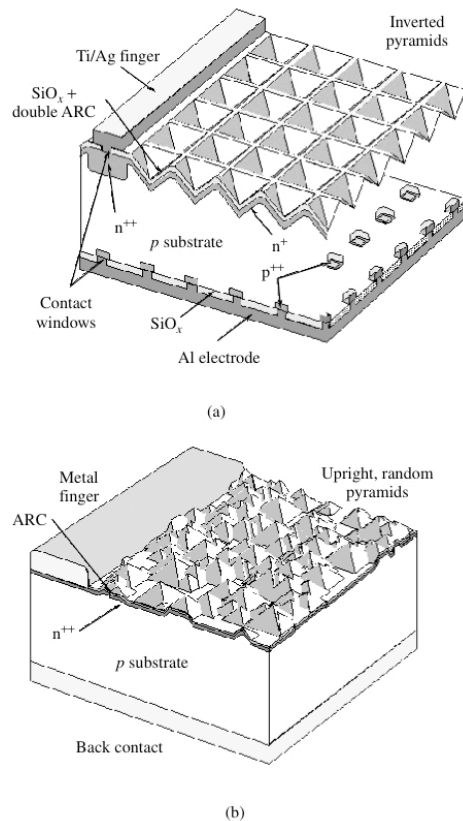


Figura 2.4: confronto tra una cella PERC, prodotta in laboratorio, ed una di tipo industriale. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Una tipica cella da laboratorio può essere quella della tipologia PERC (Passivated emitter and rear locally diffused), che ha un rendimento del 24.7% e fattore di riempimento FF di 0.828. Questa rappresenta il miglior design per velocità di ricombinazione di superficie raggiunto, con contatti selettivi localizzati e basse resistenze silicio-metallo.

La cella industriale tipica, invece, ha un rendimento che si aggira tipicamente attorno al 15% e un FF di 0.740. Come si può vedere in figura, questa non presenta contatti selettivi ed ha una tessitura a piramidi casuali. Tuttavia il continuo miglioramento dei materiali e la tendenza a fare celle più sottili per risparmiare sul silicio utilizzato sta imponendo un introduzione di schemi di passivazione e di superfici selettive anche nel campo industriale.

CAPITOLO 3

Celle solari a multi-giunzione e a pellicola sottile

-3.1 Celle solari a multi-giunzione

-3.1.1 Introduzione

Questi tipi di dispositivo sono celle solari di terza generazione ad alta efficienza. 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. Supponiamo di avere un prisma di vetro che separa i fotoni di un raggio solare in diverse zone a seconda della frequenza. Disponendo di diversi materiali semiconduttori, possiamo pensare di utilizzare delle celle solari con gap energetici adatti ad ogni tipo di fotone, come possiamo vedere in figura (a).

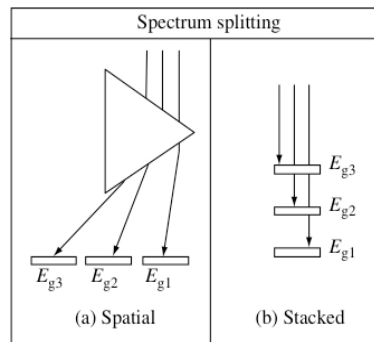


Figura 3.1: due esempi di separazione dello spettro luminoso. In figura (a) attraverso l'uso di un prisma, in figura (b) attraverso il filtraggio delle celle solari (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

In realtà una configurazione come quella appena descritta non viene ovviamente mai utilizzata, e si preferisce usare una struttura simile a quella rappresentata dalla figura 3.1 (b). Le celle solari infatti costituiscono una sorta di filtro di luce: la prima cella assorbe i fotoni con energie più elevate, $h\nu > E_{G3}$, lasciando invece passare quelli con energia minore. La seconda cella assorbe invece i fotoni con energia $E_{G2} < h\nu < E_{G3}$ mentre la terza quelli con energia $h\nu < E_{G2}$. Si utilizzando quindi celle i cui gap energetici devono progressivamente ridursi e le giunzioni stesse agiscono da elementi ottici per distribuire lo spettro.

Le sotto-celle, anche se separate, possono essere unite meccanicamente in un unico

dispositivo compatto, *a pila*. Requisito fondamentale è che tutte le giunzioni siano trasparenti alla luce sotto il rispettivo livello di gap energetico. Un approccio elegante, ed anche il più utilizzato, è quello di fabbricare le giunzioni una sopra l'altra su un singolo substrato. Questo tipo di celle vengono anche chiamato *tandem*. In questa sezione andremo a focalizzare la nostra attenzione nelle celle a due giunzioni, le quali hanno un limite teorico di efficienza del 37 %. Le celle multi-giunzione vengono generalmente costruite con materiali a gap diretto, semiconduttori costituiti da elementi del III e V gruppo, come GaAs, GaInP, InP, GaInAs e altri.

-3.1.2 Configurazione Terminali

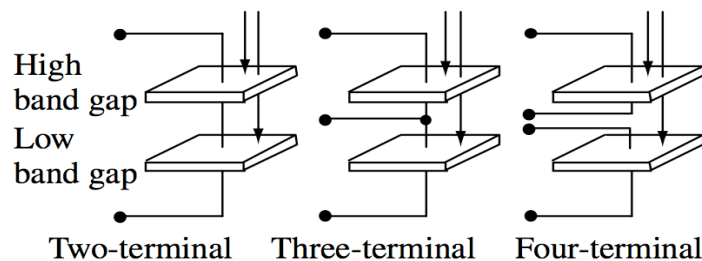


Figura 3.2: Varie configurazioni dei terminali in una cella multi-giunzione: a due, tre e quattro terminali. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Ci sono diversi modi di configurare i terminali di uscita per una cella a due giunzioni, e a seconda della scelta di progettazione si possono ottenere diversi gradi di isolamento elettronico tra le sub-celle che formano il dispositivo.

Nella configurazione a quattro terminali, le celle costituenti sono totalmente indipendenti le une dalle altre garantendo un isolamento elettronico. Non si hanno quindi limiti nella scelta delle polarità della cella (ad esempio p/n a ridosso di un dispositivo n/p), né nella corrente, né nel voltaggio. Tuttavia la realizzazione di tale struttura risulta complicata, sia a livello di progettazione che di produzione.

Nella configurazione a tre terminali le sotto-celle non sono elettricamente isolate: la cella superiore si trova collegata con la faccia posteriore alla faccia anteriore della cella sottostante. Questo tipo di struttura è più facile da realizzare rispetto a quella a quattro terminali, ma la struttura a due terminali è ulteriormente più semplice.

La configurazione a due terminali presenta tuttavia il maggior numero di restrizioni: le polarità delle sotto-celle devono coincidere e le fotocorrenti prodotte devono essere adattate l'una all'altra. Tuttavia, l'esistenza di una giunzione-tunnel monolitica garantisce

un collegamento di alta qualità. La realizzazione di tale dispositivo risulta avere la stessa semplicità di quella di una cella solare a singola giunzione, con i contatti posti solamente nella faccia anteriore e posteriore.

-3.1.3 Schema Generale di una Cella Multi-giunzione

Uno schema di una cella multi-giunzione GaInP/GaAs è rappresentato in figura 3.3. Nella parte superiore si ha una cella in GaInP, con un gap energetico che va da 1.8 a 1.9 eV. Questa viene fatta crescere, in modo monolitico, al di sopra di una giunzione-tunnel che presenta un reticolo adattato ai due materiali. Sotto la giunzione-tunnel è posta una cella in GaAs, con un E_g di circa 1.42 eV, cresciuto in uno substrato di Ge, dove può essere inserita una terza giunzione. Regolando lo spessore della cella superiore è possibile adattare le foto-correnti delle celle a diversi spettri solari.

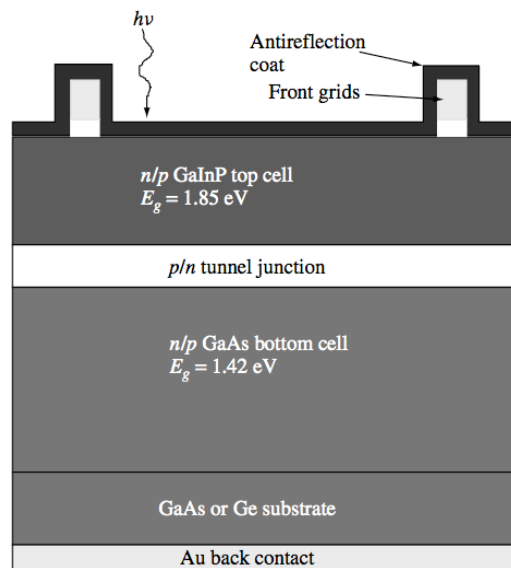


Figura 3.3: Schema generale di una cella multi-giunzione GaInP/GaAs. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Il record di efficienza per una cella di questa tipologia raggiunto, con un sistema di concentrazione che raggiunge 180 soli, è del 30.3 %.

Nel 1994 inoltre è stato scoperto che la cella GaInP/GaAs ha una buona tolleranza alle radiazioni e che quindi poteva essere utilizzata nel settore aerospaziale.

Questo tipo di cella è la multi-giunzione più usata. Altri tipi di materiale e combinazioni sono stati proposti per la formazioni di altre celle a tandem con rendimenti teorici che andavano dal 36 al 40%; tuttavia non hanno avuto il medesimo successo a causa delle

difficoltà riscontrate nell'adattamento del reticolo cristallino (ad esempio tra GaAs e GaInAs o tra GaAsP e Si) e nella produzione dei materiali semiconduttori (ad esempio l'elevata sensibilità ai livelli di ossigeno durante la crescita di AlGaAs).

-3.2 Celle solari a pellicola sottile (Thin-Film Solar Cells)

Le celle solari a pellicola sottile sono una nuova tipologia che, come suggerisce il nome, punta a dei dispositivi più sottili possibile. Gli obiettivi che si pone chi produce o sviluppa questo tipo di tecnologia sono due: utilizzare meno materiale per la fabbricazione e aumentare l'efficienza ottenuta da substrati low-cost grazie a un design innovativo.

Un abbassamento dello spessore della cella, per un determinato materiale, può portare ad effetti benefici: si ha infatti un aumento della tensione a circuito aperto V_{OC} e del fattore di riempimento, dovuto ad una diminuzione della ricombinazione nel sottostrato più sottile e ad una corrente di saturazione oscura minore. Inoltre non è richiesta una lunghezza di diffusione troppo elevata, dato lo spessore ridotto, e quindi si possono utilizzare materiali meno raffinati.

La ricombinazione superficiale diventa in questo caso il fattore rilevante per il rendimento della cella. Quindi un effettivo miglioramento nella riduzione di volume della cella può essere garantito solo se alla diminuzione di spessore della cella avviene un parallelo miglioramento della ricombinazione superficiale. Inoltre nonostante si ottengano tensioni maggiori si ha una diminuzione della corrente che dev'essere impedita attraverso tecniche efficaci di intrappolamento della luce. Si mira inoltre alla fabbricazione di celle leggerissime e flessibili.

Una cella a pellicola sottile in silicio sarebbe un grande risultato, data l'elevata reperibilità del materiale e le sue proprietà. Tuttavia la produzione di un dispositivo del genere non è affatto semplice. Come sappiamo uno dei difetti del silicio è sicuramente il suo basso coefficiente di assorbimento. Questo implica un sistema di intrappolamento della luce efficace, simile a quello visto nella cella PERL.

Anche la tessitura risulta un problema: non si possono infatti applicare le stesse tecniche utilizzate nelle celle al silicio standard, dato lo spessore ridotto. Una soluzione è che la tessitura avvenga intrinsecamente con la crescita delle pellicole. Una tessitura naturale può essere ottenuta in pellicole policristalline depositate a temperature vicine a quelle di fusione o tramite fase gassosa, e appare come un effetto dovuto alla formazione dei bordi

di grano. Nella deposizione a fase gassosa l'elevata energia ai bordi di grano fa sì che gli atomi di silicio migrino verso l'interno dei grani portando a una diminuzione di volume nella superficie. Nella deposizione tramite fusione la tessitura è dovuta all'elevata tensione superficiale tra silicio liquido e silicio solido ad alte temperature. Profondità e forma di tessitura possono essere regolate con cambiamenti nella grandezza dei grani. Uno dei problemi della tessitura è che aumenta la superficie e quindi anche la ricombinazione superficiale.

Una delle principali difficoltà nella fabbricazione di questa tipologia di celle è il supporto utilizzato durante la produzione. È infatti necessario un substrato che abbia proprietà favorevoli alla crescita delle pellicole. Possono essere utilizzati, ad esempio, sottostrati di silicio cristallino o policristallino per la crescita di pellicole a silicio cristallino. Si stanno studiando inoltre supporti di vetro per la crescita di silicio policristallino. Questo tipo di supporti porterebbe ad un rilevante abbassamento dei costi. Tuttavia i metodi di produzione e le tecniche di intrappolamento della luce sono ancora in via di sviluppo.

CAPITOLO 4

Celle solari a silicio amorfo

-4.1 Struttura del Silicio Amorfo

Un materiale amorfo presenta una struttura chimica analoga a quella che si trova in un cristallo con la differenza che il reticolo risulta del tutto disordinato. Sia nel silicio amorfo che in quello cristallino, infatti, ogni atomo è legato ad altri quattro attraverso un legame covalente. Per formare un reticolo disordinato, tuttavia, è necessaria la presenza di legami diversi da quelli tra due atomi di silicio. Una grossa percentuale di atomi, nel silicio amorfo utilizzato per la produzione di celle solari, forma tre legami con altri tre atomi di silicio, mentre il quarto con un atomo di idrogeno, permettendo la formazione di un reticolo del tutto disordinato.

In figura possiamo osservare una rappresentazione del reticolo disordinato, dove sono visualizzati gli atomi di idrogeno che possono presentarsi isolati, nella così detta fase diluita, o in coppia, nella fase di accumulo.

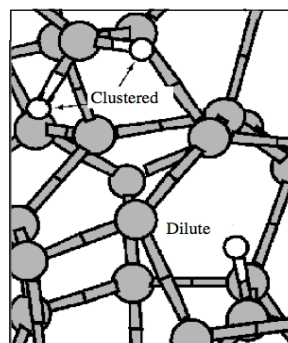


Figura 4.1: Rappresentazione del reticolo disordinato del silicio amorfo. In alto a destra un esempio la fase di accumulo dell'idrogeno, in basso a sinistra una fase diluita. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Nella fase diluita un atomo di idrogeno si trova distante almeno un nanometro da un altro atomo del suo stesso tipo, mentre nella fase di accumulo due o più atomi di idrogeno possono essere legati allo stesso atomo di silicio, come si può vedere in figura 4.1.

Questo tipo di silicio amorfo, chiamato anche silicio amorfo idrogenato (a-Si:H), viene ottenuto dall'idruro di silicio o silicano SiH_4 , tramite un procedimento chiamato *scarica a*

bagliore e presenta buone proprietà fotoelettriche. La scarica a bagliore è un processo utilizzato generalmente nelle lampade al neon, dove un gas, in determinate condizioni, viene sottoposto ad una corrente elettrica che eccita le molecole gassose le quali emanano luce. Con questa tecnica, chiamata anche *deposizione al plasma*, si può produrre un silicio amorfo con caratteristiche favorevoli all'utilizzo fotovoltaico. Il drogaggio è possibile aggiungendo fosfina gassosa PH_3 , per il tipo n, o diborano gassoso B_2H_6 , per il tipo p, al silicio durante la deposizione. Il silicio amorfo ottenuto tramite scarica a bagliore contiene una percentuale significativa di atomi d'idrogeno, e sono proprio questi che garantiscono le buone proprietà fotoelettriche. La tecnologia di fabbricazione è relativamente semplice e molto meno costosa rispetto a quella della crescita cristallina.

-4.2 Struttura di una cella a-Si:H

Il silicio amorfo idrogenato presenta un coefficiente di assorbimento $\alpha(h\nu)$ diverso rispetto a quello del silicio cristallino, molto più simile a quello di un semiconduttore a gap diretto. Come conseguenza questo assorbe la luce più in superficie. Per ricavare la stessa energia, una cella costituita da silicio amorfo sarà quindi più sottile rispetto ad una a silicio cristallino. Si può quindi pensare ad un risparmio nella quantità di materiale.

La struttura delle celle a silicio amorfo è quella *pin, positive-intrinsic-negative*. La parte della cella con silicio amorfo intrinseco costituisce la maggior parte della cella. Due sottili strati, uno con drogaggio di tipo p e uno di tipo n formano i due elettrodi del dispositivo. Nella zona intrinseca viene quindi generato un campo elettrostatico dovuto al fatto che la zona n dona gli elettroni in eccesso alla zona p, lasciando queste zone rispettivamente cariche positivamente e negativamente. Quando la luce penetra nel dispositivo, attraversando la zona p, forma una coppia elettrone lacuna nella zona intrinseca che viene separata dal campo elettrostatico, generando così corrente. Questo tipo di struttura viene adottata perché nelle zone drogate del silicio amorfo i portatori minoritari hanno tempi di vita molto brevi. Infatti un fotone assorbito in una zona drogata del dispositivo viene considerato sprecato.

A causa del coefficiente di assorbimento elevato la cella assorbe efficacemente la luce e risulta di spessore ridotto, tipicamente $1\ \mu\text{m}$. È necessario quindi un supporto. Una soluzione può essere quella del superstrato, in cui la luce penetra in un supporto trasparente e isolante, generalmente costituito da vetro o plastica. Prima della zona p del

dispositivo è necessario uno strato conduttivo chiamato “Transparent Conductive Oxide” (TCO) per prelevare la corrente. Infine nella parte posteriore della cella viene disposto uno strato riflettente per l'intrappolamento della luce che funziona anche da elettrodo per la zona n del fotodiiodo. Un'altra soluzione può essere quella inversa, dove viene utilizzato un substrato opaco e la cella posta al di sopra di questo. In figura possiamo vedere la cella pin e i design di substrato e superstrato.

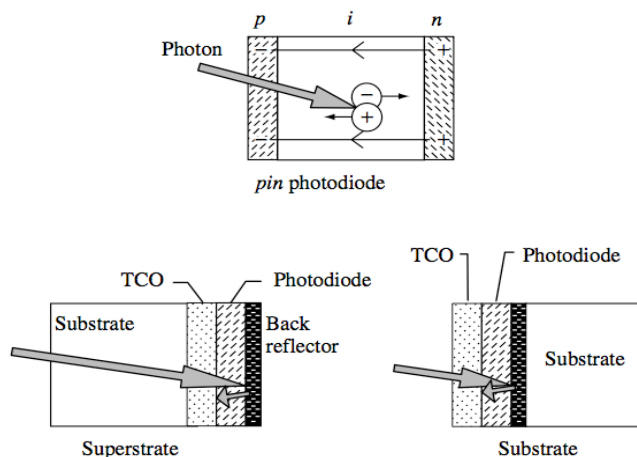


Figura 4.2: In alto una giunzione pin utilizzata nel silicio amorfo. In basso a destra una configurazione a superstrato, alla sua sinistra la configurazione a substrato. (dal libro “*Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering*”)

Sono utilizzate anche configurazioni a multi-giunzione, in cui una cella in silicio amorfo a-Si:H che assorbe fotoni con energia maggiore di 1.9 eV viene posizionata al di sopra di una costituita da una lega di silicio e germanio amorfo che raccoglie i fotoni ad energia minore.

-4.3 Effetto Staebler-Wronski

Uno dei problemi delle celle solari costruite con silicio amorfo è il significativo declino dell'efficienza in seguito ad un'esposizione alla luce per qualche centinaio di ore. Dopo le prime 1000 ore di utilizzo, infatti, la cella può perdere fino al 30% del suo rendimento. Questo problema è anche conosciuto come *effetto Staebler-Wronski*, effetto indotto dalla luce e dipendente dal materiale utilizzato. Questo può essere annullato in seguito ad un riscaldamento del materiale a 160°C per un paio di minuti. Inoltre si assiste ad un variare del rendimento durante le stagioni. In figura 4.3 possiamo vedere la variazione del rendimento di una cella a tripla giunzione durante i primi mille giorni di lavoro.

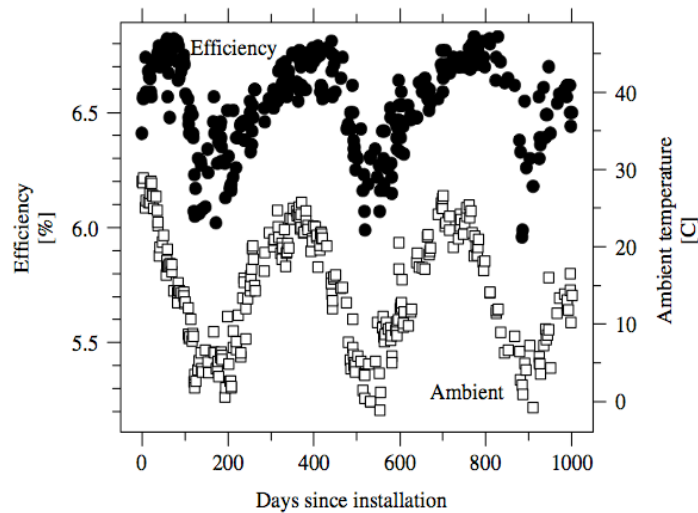


Figura 4.3: variazioni stagionali dell'efficienza. In ascissa il tempo calcolato in giorni, in ordinata l'efficienza (in puntini neri), e la temperatura media giornaliera in gradi centigradi (quadrati bianchi). (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

I punti in nero indicano il rendimento medio della giornata mentre i quadrati la temperatura dell'ambiente. Come si può notare il dispositivo ha rendimenti migliori durante i periodi caldi dell'anno. Una possibile interpretazione di tale fenomeno può essere data dalla presenza di difetti nel materiale. Il principale difetto che si trova nel silicio amorfo, chiamato anche "*D-center defect*", e corrisponde alla mancanza di un atomo, che rende un legame disponibile. Attualmente si pensa che la principale causa dell'effetto Staebler-Wronski sia l'aumento di difetti di legami disponibili dovuto all'esposizione alla luce. La forte relazione tra difetti e idrogeno ha portato a pensare che l'illuminazione fornisca l'energia necessaria allo spostamento di un atomo di idrogeno da una fase diluita con la creazione di un legame disponibile. Si pensa che gli atomi di idrogeno raggiungano una configurazione metastabile, ovvero in una condizione di equilibrio che non corrisponde però ad un minimo di energia. Se viene infatti fornito del calore questa condizione viene meno e si ha un ritorno dell'idrogeno al suo stato iniziale. Secondo questa teoria dunque da una parte la luce porta alla formazione di difetti metastabili che abbassano il rendimento, mentre dall'altra il calore li cancella ripristinandolo. Da qui una possibile interpretazione delle variazioni stagionali del rendimento e del suo decadimento iniziale.

-4.4 Energy gap

Per cristalli perfetti la banda di valenza e la banda di conduzione hanno energie ben definite, ed è quindi facile ricavare un energy gap. Per un materiale amorfo invece determinare il gap energetico risulta difficile. Le densità di stati della banda di conduzione e di valenza possono essere ricavate tramite misurazioni di foto-emissione di elettroni, dell'assorbimento ottico e delle mobilità di deriva dei portatori. Come risultato si ottengono delle densità di stati con andamenti esponenziali, come possiamo vedere in figura.

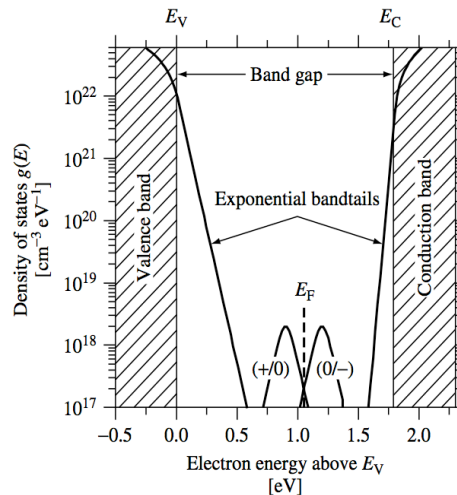


Figura 4.4: diagramma a bande del silicio amorfo idrogenato. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Le aree tratteggiate indicano gli stadi delocalizzati nella banda, a cui seguono con andamenti esponenziali delle code di stadi localizzati con distribuzione esponenziale. Nel mezzo sono presenti le densità relative ai difetti. Questi difetti, D-center, hanno un comportamento anfotero: possono infatti avere tre tipi di cariche, $-e$, 0 , $+e$.

Ricavare l'energia dei fronti di banda per un materiale amorfo diventa quindi un problema. Ci sono diversi modi ottenere queste energie. Il metodo più utilizzato per ricavare E_G è quello di ottenerlo attraverso il coefficiente di assorbimento attraverso la formula:

$$\alpha(h\nu) = (A/h\nu)(h\nu - E_T)^2$$

Dove E_T è il gap energetico ottico detto anche di Tauc. Un valore tipico che si ricava per il silicio amorfo idrogenato è 1.75 eV. Tuttavia l'energy gap effettivo può variare a seconda delle condizioni di deposizione, o se si utilizzano leghe di germanio o carbonio con il silicio, come ad esempio nelle celle amorphe a multi-giunzione.

Ad altri risultati si può giungere dalle misurazioni della mobilità dove i fronti di banda sono considerati come l'energia che separa gli orbitali localizzati da quelli delocalizzati, chiamati

fronti di mobilità.

-4.5 Drogaggio

Il drogaggio nel silicio amorfo funziona in un modo molto diverso rispetto a come avviene nel silicio cristallino. Ad esempio il fosforo può assumere una forma elettronica trivalente. Infatti mentre la rigidità del reticolo nel cristallo impedisce questa sua configurazione, nell'amorfo, dove il reticolo è disordinato, il fosforo può presentarsi in forma ibrida, dove ha due atomi nell'orbitale s che non partecipano a nessun legame e sono fortemente legati all'atomo, ed altri tre negli orbitali ibridi più esterni. Sembra quindi che il drogaggio non dovesse portare a nessuna modifica nelle proprietà elettriche del materiale, visto che non viene aggiunto un elettrone donatore, come avviene nel silicio cristallino. Tuttavia in alcuni casi è possibile la formazione indipendente e parallela di uno ione positivo P_4^+ con atomi di fosforo tetraivalenti e di un difetto D-center. In questo caso un elettrone donatore entra a far parte del sistema. Quindi la maggior parte degli atomi droganti non contribuisce alla formazione di un elettrone libero ed inoltre per quelli che si generano si ha una parallela formazione di una trappola per lacune. Un fotone assorbito in una regione drogata, quindi, è generalmente un fotone perso.

-4.6 Deposizione del silicio amorfo

Il metodo più utilizzato per la deposizione del silicio amorfo è quello a scarica a bagliore del silicene indotta da voltaggio a radio frequenza, nota anche come *plasma enhance chemical vapor deposition (PECVD)*. Una miscela di gas contenente silicene e idrogeno viene inserita in una camera sotto vuoto. Qui sono installati due elettrodi collegati ad un generatore ad alta frequenza. Per una determinata gamma di pressioni il gas può assumere lo stato di plasma. Questo genera ioni e radicali che diffondono nei substrati che vengono posti negli elettrodi, i quali sono riscaldati per ottenere una migliore qualità delle pellicole che si vanno a depositare.

La macchina utilizzata per la deposizione è costituita da varie parti fondamentali: un sistema di inserimento dei gas, la camera di deposizione con gli elettrodi, gli attacchi per i substrati e il sistema per il loro riscaldamento, il generatore di tensione a radio frequenza, un sistema di pompaggio per il controllo della pressione all'interno della camera e uno di

scarico. La crescita delle pellicole di silicio avviene tramite i seguenti passi: diffusione dei gas primari, dissociazione attraverso impatto di elettroni, reazione chimica nella fase gassosa, diffusione dei radicali e infine deposizione. Il radicale SiH_3 è ritenuto responsabile della crescita di una pellicola di alta qualità.

Per ottenere buoni risultati nella deposizione del silicio amorfo le condizioni del processo devono essere controllate e rimanere in un determinato campo di variazione. Tipicamente si utilizza una pressione compresa fra 0.5 e 1 Torr. A pressioni più basse la deposizione non avviene uniformemente, mentre a quelle più alte sono desiderabili per ottenere pellicole micro-cristalline.

La potenza del generatore a frequenza radio ottimale è compresa tra 10 e 100 mW/cm². Per potenze più basse lo stato di plasma non è raggiungibile, mentre per quelle più alte la velocità di reazione nel gas può provocare la formazione di una polvere di silicio che può contaminare la crescita. Questo problema può essere evitato utilizzando pressioni molto basse o usando quantità di idrogeno maggiori.

La temperatura tipica del substrato è compresa tra 150 e 350°C. Minore è la temperatura maggiore sarà la quantità di idrogeno nel silicio amorfo, e maggiore sarà E_G . Un altro aspetto importante è la contaminazione dovuta all'ossigeno, carbonio e elementi metallici. Fortunatamente il silicio amorfo ha una tolleranza maggiore rispetto a quello cristallino, ma è comunque un aspetto che va controllato per garantire buoni rendimenti nei dispositivi.

Soluzioni gassose con idrogeno fortemente diluito riducono la densità di difetti nel silicio amorfo e migliorano la stabilità del materiale all'esposizione alla luce. Tuttavia aumentando la diluizione la velocità di deposizione diminuisce e se troppo elevata la pellicola diventa microcristallina.

La frequenza a cui generalmente si opera per la scarica a bagliore è $f=13.56$ MHz. A frequenze più alte si ottengono velocità di deposizione maggiori e inoltre l'effetto della formazione delle polveri di silicio viene eliminato. Tuttavia la deposizione non avviene in modo uniforme. Inoltre l'accoppiamento tra generatore e elettrodi risulta molto difficile. Questo tipo di deposizione è ancora in via di sviluppo.

Un altro metodo di deposizione in via di sviluppo che permette una velocità di deposizione elevata, è quello della deposizione chimica a filo caldo (Hot Wire Chemical Vapor Deposition). Il procedimento è simile a quello utilizzato nella *PECVD*, solo che al posto

degli elettrodi vengono utilizzati dei filamenti riscaldati a temperature che vanno dai 1800 ai 2000 °C. Il gas, composto da una miscela di silicio idrogeno ed elio, viene eccitato termicamente e decomposto in radicali o ioni che si depositano nel substrato. Il silicio prodotto presenta minori quantità di idrogeno e una stabilità maggiore per quanto riguarda l'effetto Staebler-Wronski.

-4.7 Conclusioni

L'utilizzo di celle a silicio amorfo sembra promettente da molti punti di vista. Primo fra tutti quello del costo. Le celle realizzate sono molto sottili, quindi si utilizza poco materiale, e questo grazie alle proprietà benefiche del coefficiente di assorbimento. Il metodo di produzione è low cost e garantisce che l'energia utilizzata per la fabbricazione venga recuperata nei primi anni di utilizzo della cella. Celle con efficienza del 15%, e con un'efficienza stabile del 13%, sono state prodotte. Tuttavia vi sono ancora diversi problemi da risolvere, come il calo dell'efficienza per effetto Staebler-Wronski, multigiunzioni con band gap minori in modo da prelevare efficacemente luce da tutto lo spettro solare, migliorare i tempi di vita nelle zone dove è presente drogaggio ed un metodo di deposizione veloce ed efficace.

CAPITOLO 5

Sistemi fotovoltaici

-5.1 Introduzione

La natura modulare della tecnologia fotovoltaica permette la sua applicazione in una vasta gamma di potenze, dai milliwatt, come ad esempio nelle calcolatrici o in alcuni orologi, ai chilowatt per sistemi a stand alone, fino all'ordine dei megawatt nelle centrali fotovoltaiche.

Il fotovoltaico è sicuramente un mezzo piuttosto costoso per produrre energia. Tuttavia in alcune situazioni risulta conveniente, come ad esempio nei luoghi non raggiunti dalla rete elettrica dove l'attacco ad essa potrebbe risultare difficile e più costoso che un impianto fotovoltaico. Inoltre, anche nelle località raggiunte dalla rete, un numero sempre maggiore di privati, compagnie e governi stanno investendo in questa tecnologia perché fonte di energia pulita non inquinante. Un parallelo abbattimento dei costi dovuto ad una produzione di massa di sistemi fotovoltaici facilita e può rendere attrattivo il loro impiego in moltissimi campi.

Sempre più spesso è possibile intravedere dei pannelli installati nei tetti di case private e di altre strutture come generatori di corrente elettrica di supporto per la rete, anche se la loro applicazione principale, almeno nell'ultimo decennio, è stata per la maggior parte in zone non raggiunte dalla rete, come ad esempio in prodotti di consumo per piccole potenze, applicazioni industriali in stazioni di telecomunicazione, e in abitazioni remote con sistemi fotovoltaici domestici.

-5.2 Sistemi fotovoltaici per piccoli dispositivi e applicazioni domestiche indipendenti dalla rete

Dispositivi con piccoli carichi di potenza, dai pochi milliwatt a qualche centinaio di watt, possono essere progettati con un sistema di alimentazione ad energia solare. Questo tipo di scelta può essere dovuta sia a un'effettiva convenienza economica nella produzione rispetto ad un dispositivo con alimentazione tramite rete, sia da altri vantaggi, come la portabilità, l'affidabilità e l'indipendenza da forme di energia inquinanti.

In piccoli sistemi, come calcolatrici o orologi da polso, l'alimentazione può essere costituita solamente da poche celle solari. Per dispositivi con un carico più pesante è necessario un sistema di immagazzinamento dell'energia, tipicamente costituito da una batteria al nichel-cadmio o da altri dispositivi con funzione analoga. Nel caso di un sistema fotovoltaico domestico, in cui durante il giorno viene immagazzinata energia e durante la notte utilizzata, è necessaria una batteria industriale a servizio pesante che riesce a sopportare i cicli giornalieri di caricamento e scaricamento. La scelta della batteria diventa una questione delicata visto che condiziona fortemente i prezzi e il tempo di vita del sistema fotovoltaico stand alone.

Un regolatore di carica è spesso indispensabile per garantire tempi di vita buoni per le batterie. Questo, grazie ad un interruttore, evita che la pila si carichi o si scarichi eccessivamente, isolandola, e deve garantire il minimo consumo di potenza possibile. Sono inoltre utilizzati convertitori di tensione cc/cc (corrente continua/corrente continua) che adattano la tensione al carico. Se il carico richiede una corrente alternata, devono essere utilizzati degli inverter cc/ca. Seguono alcuni esempi di sistemi a energia solare indipendenti dalla rete.

Calcolatrici, bilance elettroniche od altri dispositivi sono spesso pensati per essere utilizzati solo in condizioni di luce. I display LCD di questi dispositivi, infatti, sono generalmente difficili da leggere al buio. Di conseguenza non viene utilizzato nessun sistema di immagazzinamento energetico.

Sistemi idraulici per il ricircolo dell'acqua in fontane presenti in piazze o parchi pubblici richiedono spesso poca energia e il loro funzionamento notturno non è sempre richiesto. Una pompa può essere alimentata da pochi pannelli solari.

Punti per chiamate d'emergenza con connessione radio possono essere alimentati da un pannello solare che genera pochi watt evitando la connessione alla rete elettrica. Questi possono inoltre rilevare ed inviare dati statistici su condizioni meteorologiche e traffico.

Un'altra applicazione del fotovoltaico interessante, sia per aspetti ecologici che per aspetti sociali, è la sostituzione dell'illuminazione a carburante fossile. In molti paesi in via di sviluppo infatti è ancora molto utilizzata l'illuminazione tramite lampade al petrolio. Queste possono essere rimpiazzate da un dispositivo di illuminazione con alimentazione fotovoltaica. Il sistema, costituito da un pannello, una batteria ricaricabile e un controllore di carica, immagazzina energia durante il giorno che viene sfruttata per l'illuminazione notturna con risultati migliori rispetto alla lampada a petrolio, avendo una luminosità tre

volte superiore.

Per abitazioni senza connessione alla rete, che si trovano in paesi in via di sviluppo, in luoghi rurali o di montagna, un sistema fotovoltaico domestico può rappresentare una buona soluzione per provvedere ad una fonte di energia elettrica. In figura possiamo vedere uno schema di tale sistema.

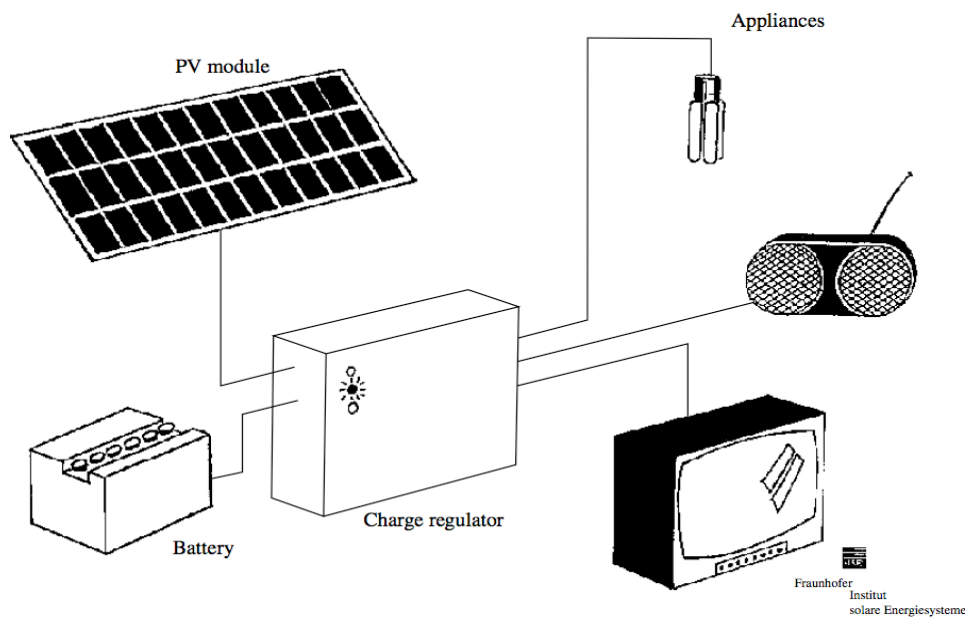


Figura 5.1: schema del sistema fotovoltaico domestico costituito da un pannello fotovoltaico, una batteria, un controllore di carica e gli elettrodomestici di carico. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Un pannello fotovoltaico, tipicamente di dimensione $50 \times 100 \text{ cm}^2$, può generare energia sufficiente per tre lampade, un televisore bianco e nero ed una radio. Una batteria al piombo con un controllore di carica va a costituire il sistema di accumulo energetico. Questo sistema fotovoltaico domestico può costare in media 900 dollari, e il prezzo può variare a seconda delle tasse, dal venditore dei componenti di manifattura locale arrivando ad un massimo di 1500 dollari. In molte situazioni un sistema di elettrificazione come questo può risultare conveniente. Infatti se la densità di popolazione è bassa e le distanze sono lunghe, un aggancio alla linea elettrica può costare fino a 10 000 dollari. In molte circostanze un generatore elettrico a gasolio può sembrare una soluzione molto più economica. Tuttavia, tenendo conto dei costi del carburante, di quelli per la manutenzione e di riparo e il tempo di vita, un sistema fotovoltaico rappresenta un'alternativa competitiva anche a livello economico.

Un sistema ibrido può diventare un'ottima soluzione se sono richieste potenze più elevate, sia a livello domestico, sia per quanto riguarda stazioni meteorologiche o di telecomunicazione. Generalmente è richiesta una corrente alternata a 230 o 110 Volt. I sistemi ibridi sono la combinazione di due o più fonti di energia: solare, eolica, idrica, geotermica, e a combustibile fossile. Un sistema di controllo gestisce la batteria e decide da quale fonte prelevare l'energia. Tipicamente il combustibile fossile è l' "ultima spiaggia": il motore a gasolio, oltre ad essere inquinante, è rumoroso e può essere utilizzato per tempi limitati. Uno schema di un sistema ibrido a energia eolica, solare e combustibile è riportato in seguito.

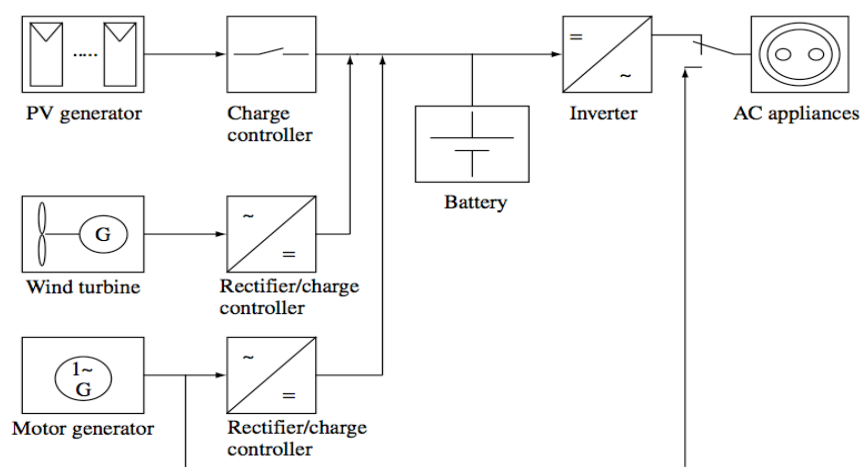


Figura 5.2: schema di un sistema fotovoltaico autonomo ibrido. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

I sistemi di questo genere vengono comunemente chiamati sistemi accoppiati in corrente continua. Come si vede dallo schema le correnti generate dalle fonti di energia sono continue e vengono solo in seguito invertite, prima di giungere al carico. Ogni fonte energetica ha una tensione che viene adattata da un proprio convertitore ed un controllore di carica indipendente. Si capisce quindi che il problema di questo schema è che ci si trova di fronte ad un sistema di controllo che può avere costi di installazione piuttosto elevati, maggiore è il numero di generatori.

Uno schema alternativo è quello ad accoppiamento in corrente alternata: in questo caso viene utilizzato un convertitore bidirezionale ed un unico controllore di carica. L'energia ricavata viene utilizzata e solo quella in surplus va ad essere immagazzinata nelle batterie. L'invertitore bidirezionale è un dispositivo che permette di caricare e scaricare la batteria. Questa soluzione semplifica di molto il sistema di controllo, tuttavia i convertitori

bidirezionali sono dei dispositivi che richiedono una configurazione molto accurata.

-5.3 Batteria

Come abbiamo detto per un sistema fotovoltaico stand alone è necessario un mezzo di immagazzinamento dell'energia. Questo viene generalmente costituito da una batteria elettrochimica, la quale ha il vantaggio di poter essere ricaricata in corrente continua rendendo possibile un collegamento diretto con il generatore fotovoltaico.

La batteria rappresenta il punto debole del sistema: lo si può vedere dai costi, che costituiscono circa il 30% durante la vita di un sistema. Questa ha infatti un tempo di vita limitato e dev'essere sostituita dopo un certo periodo di utilizzo. Inoltre è un elemento piuttosto delicato, e, più la si trascura, prima bisognerà sostituirla.

Attualmente le batterie al piombo sono le più utilizzate nonostante altri tipi di tecnologia siano in via di sviluppo. Un buon sistema, in condizioni atmosferiche sfavorevoli, deve avere una batteria che riesca ad erogare potenza sufficiente al carico per almeno tre o quattro giorni. Questo implica che lo scaricamento giornaliero non dev'essere minore del 25 o 30% della sua capacità nominale, tipicamente di 10 ore. Bisogna tenere conto del dimensionamento dei pannelli solari che devono garantire la ricarica della batteria a seconda dell'energia media consumata giornalmente.

La batteria si trova generalmente di fronte a due condizioni operative, l'una opposta rispetto all'altra. Nel primo caso, che rappresenta le condizioni ottimali di utilizzo, siamo di fronte a un clima favorevole, ad esempio d'estate, durante il quale la batteria raggiunge ogni giorno la massima tensione di soglia e si ricarica del 100%. Durante la notte questa si scarica raggiungendo circa il 70% della sua capacità e il giorno seguente verrà ricaricata nuovamente. Nel secondo caso invece andiamo ad analizzare il caso peggiore: in caso di condizioni climatiche sfavorevoli, ad esempio durante l'inverno, se il sistema non è sufficientemente sovradimensionato la batteria si troverà spesso in condizioni limite. La tensione, in pochi giorni raggiunge quella di soglia minima. Salvo che l'utilizzatore non vada volontariamente a diminuire il proprio consumo di potenza, il sistema di protezione taglierà la corrente fino a quando la batteria non viene ricaricata raggiungendo un livello di carica ragionevole. L'utilizzo della batteria sotto questa condizione va a degradare il suo tempo di vita. Tra questi due casi c'è ovviamente quello intermedio in cui l'energia immagazzinata non raggiunge né il valore minimo né quello massimo.

-5.4 Dimensionamento

Il dimensionamento del generatore fotovoltaico è quindi una questione delicata. Se non si utilizzano abbastanza pannelli, non solo ci si troverà spesso con il sistema che non fornisce energia, ma inoltre, facendo operare la batteria in condizioni non ottimali, si sarà costretti a cambiarla più spesso a causa di una diminuzione del suo tempo di vita. Un sovradimensionamento del sistema è quindi generalmente indispensabile, in modo da far sì che la batteria operi sempre nelle condizioni ottimali e per garantirne tempi di vita maggiori.

Per determinare il dimensionamento generalmente si seguono i seguenti passi:

1. *Determinazione e ottimizzazione della domanda energetica dell'utilizzatore:* In questa fase si cerca di determinare, con la massima precisione possibile, la potenza che l'utilizzatore andrà a consumare. Si cerca inoltre di minimizzarla il più possibile, considerando varie possibilità.
2. *Sviluppo del concetto:* viene scelta la tensione ed il tipo di corrente, alternata o continua, e la presenza di eventuali sistemi energetici di supporto.
3. *Scelta e dimensionamento dei componenti di sistema:* si vanno a scegliere i vari convertitori necessari per i vari adattamenti in tensione. L'efficienza di questi ultimi non dev'essere trascurata.
4. *Dimensionamento del generatore solare e della batteria*
5. *Dimensionamento del regolatore di carica*
6. *Dimensionamento dei cavi:* le cadute di tensione che si possono verificare a causa di induttanze parassite nei cavi non devono essere ignorate, soprattutto in caso di tensioni basse.

Spesso la ripetizione dei primi quattro passi è necessaria. Si possono presentare varie problematiche come, ad esempio, una variazione nello sviluppo di concetto dovuta a vari fattori, come la difficoltà nell'installazione. Inoltre bisogna contare anche i fattori affidabilità, costo e manutenzione.

Il periodo ottimale in cui operare il dimensionamento è quello in cui la radiazione luminosa è la minore possibile, in modo da calcolare anche il migliore posizionamento dei pannelli e l'angolo di incidenza ottimale.

-5.5 Apparecchi Domestici a risparmio energetico

Una famiglia media tedesca consuma circa 3500 kWh per anno, trascurando il riscaldamento della casa e dell'acqua. Per poter far fronte a questa domanda energetica bisognerebbe costruire un sistema fotovoltaico che fornisca 4 kW equivalente a un modulo di 40 m². Con un modulo il cui prezzo è 4 euro al watt di potenza nominale si andrebbe a spendere 16 000 euro dei soli pannelli. Risulta evidente che di fronte ad un investimento di questo genere, piuttosto che l'acquisto di un sistema così grande, è più conveniente cercare di diminuire la potenza utilizzata il più possibile attraverso l'uso di apparecchiature a risparmio energetico.

Se il risparmio energetico viene affrontato seriamente una famiglia può riuscire a consumare solamente 700 kWh l'anno. Da qui si capisce l'importanza dell'uso di apparecchiature moderne con risparmio energetico.

-5.6 Sistemi fotovoltaici decentralizzati connessi alla rete elettrica

Attraverso uno specifico inverter è possibile connettere un sistema fotovoltaico alla linea elettrica pubblica. In questi casi la parte di immagazzinamento energetico del sistema non è necessaria. Nelle giornate di sole il sistema provvede alla potenza utilizzata nell'abitazione. Quella prodotta in eccesso viene fornita alla rete. Durante la notte invece il sistema non è in funzione e la potenza viene fornita dalla rete.

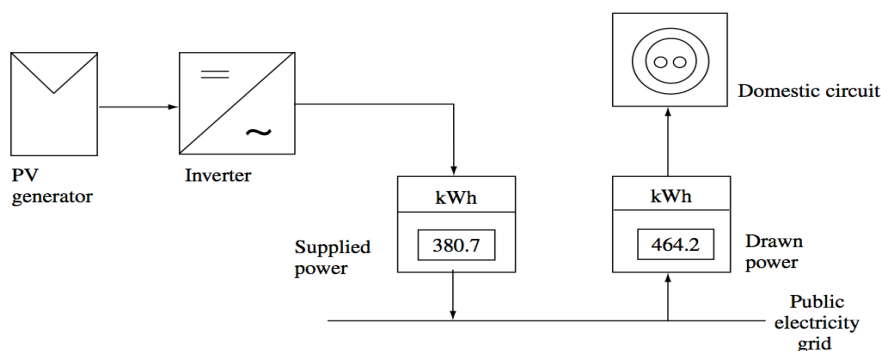


Figura 5.3: schema di un sistema fotovoltaico decentralizzato connesso alla rete elettrica. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

Questo tipo di approccio, ovvero l'operare parallelo dei sistemi fotovoltaici e della rete ha un alto potenziale sia dal punto di vista ecologico che dal punto di vista energetico. Tuttavia risulta molto difficile che un privato decida di acquistare un sistema del genere,

dati i costi elevati. Fortunatamente in parecchi paesi industrializzati sono presenti programmi che aiutano finanziariamente il cliente interessato a questa tecnologia, in modo da promuovere questa fonte di energia pulita. Tra i programmi più intensi spiccano quelli del Giappone e la Germania.

I moduli standard sono i più utilizzati dato che sono poco invasivi nell'estetica dell'edificio dove vengono installati. Vengono generalmente posti nei tetti, utilizzando una struttura di sostegno. Anche l'installazione nelle pareti perimetrali esterne o al posto di vetrate è possibile, anche se più rara. Moduli fino a 6 m², e celle di diversi colori (nero, blu scuro, blu chiaro, viola) sono disponibili. Grazie all'incapsulamento con rivestimento vitreo i pannelli possono inoltre svolgere la funzione di isolanti sonori. Il posizionamento va comunque calibrato in modo da massimizzare l'esposizione solare.

In questo tipo di sistemi è di enorme importanza l'inverter. La scelta di questo determina infatti il tipo di sistema che si vuole installare. Il generatore fotovoltaico viene configurato a seconda delle condizioni di input, in modo da adattare la tensione continua. La funzione principale dell'inverter è, infatti, quella di convertire la corrente continua generata dall'impianto fotovoltaico in una corrente alternata a 50 Hz conforme alla rete elettrica.

Tuttavia questo dispositivo possiede altre utilità, ad esempio è suo il compito di cominciare a fornire energia la mattina, quando il generatore fotovoltaico comincia ad erogare potenza sufficiente. Una partenza non corretta richiede energia dalla rete e dev'essere evitata da un buon controllore.

Un inverter intelligente include inoltre un sistema di rilevamento del punto di massima potenza della caratteristica I-V, che può variare a seconda della luminosità e della temperatura, garantendo un trasferimento di potenza ottimale. Nel caso di variazioni di corrente nella rete, inoltre, l'inverter funziona anche da dispositivo di protezione, disconnettendo il collegamento ai pannelli solari. I dispositivi più moderni raccolgono informazioni statistiche sul lavoro dell'impianto, come correnti, tensione e potenza erogata, che possono essere visualizzate da un computer.

Il sistema di fornitura elettrico, nei paesi industrializzati, è generalmente costituito da grandi centrali elettriche che riforniscono la popolazione tramite una vasta rete elettrica. Questa struttura, a causa della sua poca flessibilità nella scelta delle sorgenti energetiche primarie, riesce difficilmente ad essere ottimizzata, sia a livello di flussi d'energia che di

costi. Diventa sempre più difficile inoltre ottenere permessi per la creazione di nuove centrali e di estensioni della rete. Nei paesi in via di sviluppo, inoltre, un approccio del genere è generalmente difficile a causa dei costi elevati.

Vi sono diverse metodologie, in via di sviluppo, per affrontare il problema che mirano ad un nuovo concetto di rete elettrica con una possibile ottimizzazione della rete nei paesi industrializzati e creazione di reti nei paesi in via di sviluppo. Questi sono pensati in modo da avere un sistema decentralizzato, costituito da generatori di corrente elettrica di piccola e media stazza. Qui dovrebbero entrare in gioco tutti i nuovi tipi di fonti energetiche moderne, come appunto il fotovoltaico e tutte le altre fonti di energia rinnovabile.

Tuttavia, a causa dei limiti operativi di questi componenti, è necessario lo sviluppo di nuovi dispositivi che riescano ad ottimizzare l'uso parallelo di queste nuove tecnologie: elementi di immagazzinamento energetico a breve termine, costituiti ad esempio da batterie installate localmente e un sistema di gestione della potenza intelligente che sia in grado di comunicare tra i vari generatori sono alcuni esempi di come in futuro una rete elettrica possa essere pensata.

-5.7 Applicazione nel settore Aerospaziale

Il settore aerospaziale ha sempre trovato nella tecnologia fotovoltaica un ottimo metodo per poter fornire energia ai propri mezzi. I satelliti che orbitano attorno alla terra sono più di 2300, e vengono utilizzati per vari scopi: ricerca astronomica, come nel caso del famoso satellite Hubble, studi sull'atmosfera terrestre, mezzi di comunicazione e navigazione, meteorologia e esplorazione dello spazio. Ogni anno vengono lanciati nello spazio fino a 5000 mezzi dei quali alcuni ritornano a terra, ed altri invece ricadono quando la loro orbita decade.

La stazione spaziale internazionale, ad esempio, rappresenta uno dei progetti più ambiziosi e complicati della storia. Questa, creata grazie alla collaborazione delle maggiori potenze tecnologiche mondiali, è attualmente ancora in fase di assemblaggio. La stazione completa misurerà 120 metri in larghezza per 95 metri di lunghezza. L'impianto di alimentazione è costituito da 6560 moduli da 256 kW, ognuno dei quali formato da 40 celle solari monocristalline di 16 cm². Queste hanno un rendimento del 14.5 %. Sfortunatamente la produzione dell'impianto cominciò nel 1988, quando la tecnologia delle

GaAs, con il loro rendimento del 26%, non era ancora disponibile. La maggior parte dei moduli fotovoltaici sono stati prodotti negli Stati Uniti.

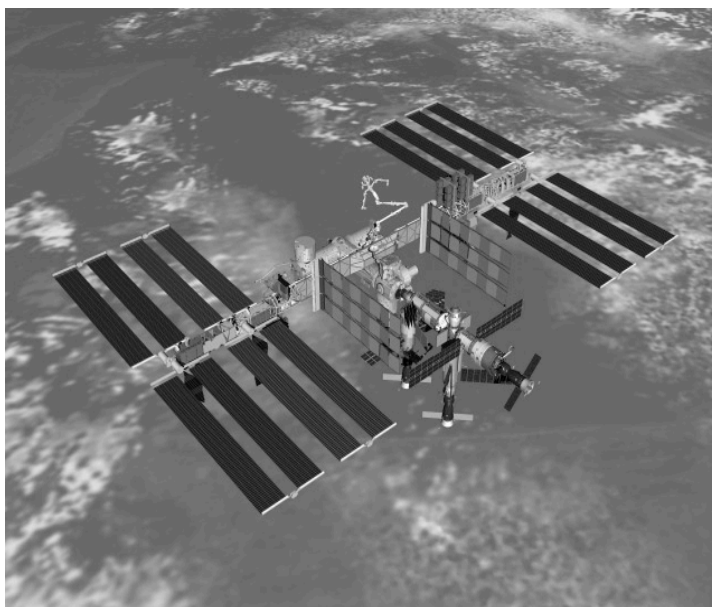


Figura 5.4: Stazione Spaziale Internazionale (dal sito <http://www.nasa.gov>)

Il fotovoltaico viene anche utilizzato in alcuni prototipi aerei della NASA. Ad esempio il Pathfinder, un prototipo che può raggiungere altitudini elevatissime, fino ai 30 km, pensato per studiare i cambiamenti climatici. Questo mezzo, a controllo remoto, può restare in volo per settimane e viene alimentato da pannelli solari. È costruito con materiali moderni e nonostante l'apertura alare di trenta metri pesa solamente 300 kg.



Figura 5.5: Prototipo Helios (dal sito <http://www.nasa.gov>)

Un altro prototipo, sempre studiato dalla NASA, è l'Helios. Questo ha dimensioni maggiori rispetto al Pathfinder con un estensione alare che arriva fino a 80 metri, ed è sviluppato

per usi commerciali. Viene prodotto con prezzi relativamente bassi ed è totalmente eco-compatibile. Le sue potenziali applicazioni possono essere molte: grazie alle altitudini che riesce a raggiungere può essere utilizzato come stazione radio per comunicazione, stazione meteorologica ed è in grado di raccogliere informazioni in caso di eruzioni vulcaniche o terremoti.

CAPITOLO 6

Analisi Economica dei Sistemi Fotovoltaici

-6.1 Introduzione

Come abbiamo visto l'energia solare ha un vastissimo campo di impiego, tuttavia il fotovoltaico si trova ad avere come concorrenti molte tecnologie già ben sviluppate, come ad esempio quella dei combustibili fossili o quella idroelettrica. In molte applicazioni, anche grazie ai vantaggi pratici, i sistemi fotovoltaici sono fortemente competitivi, mentre in altre sussidi finanziari da fonti pubbliche o private possono renderli attrattivi.

Il costo dell'energia fornita dagli impianti a energia solare è una caratteristica fondamentale ed è influenzato da molti fattori, primo fra tutti quello tecnologico, ma anche da quello dei costi dei componenti costituenti. La scelta inoltre ricade su altre problematiche, come locazione geografica, presenza di una rete elettrica o fattori ecologici, politici e umanitari.

Un'analisi economica risulta necessaria quando bisogna decidere la tecnologia a cui rivolgersi ed è diversa a seconda dei casi. Ad esempio nei paesi industrializzati la scelta ricade nella tecnologia con criteri economici che più si avvicinano a quelli di una determinata applicazione. Nei paesi in via di sviluppo, invece, si va ad indagare sulla presenza di risorse finanziarie sufficienti per poter costruire un sistema.

-6.2 Concetti chiave

L'investimento di capitali in un sistema fotovoltaico viene fatto alla luce del fatto che questo porti dei benefici, nella forma di corrente elettrica prodotta, durante il suo tempo di vita. Altri benefici, come la riduzione dei gas effetto serra, possono essere presi in considerazione. Questi benefici, in particolare il valore della corrente fornita, sono generalmente realizzati in un periodo piuttosto lungo, che oscilla dai 10 ai 30 anni. Un calcolo di questi benefici al tempo dell'acquisto risulta molto utile per la scelta del sistema di fornitura elettrica, che potrebbe avvenire tramite altre tecnologie rivali come ad esempio un motore a gasolio, pile a combustibile o elettricità dalla rete. Naturalmente vanno considerati non solo i benefici, ma anche gli eventuali costi futuri, come quelli per la

manutenzione, ad esempio. Infine benefici qualitativi, come l'indipendenza energetica o il futuro aumento dei costi energetici, andrebbero presi in considerazione.

È facile intuire che il valore futuro dei costi e dei benefici non equivale a quello presente, dove ad esempio si ha la sola spesa dell'impianto. Viene quindi creato un prospetto per il futuro dei benefici e dei costi che si dovranno affrontare attraverso un *flusso di cassa*. In figura 6.1 è possibile vedere uno di questi prospetti, dove per ogni anno vengono calcolate le spese e i guadagni di un teorico un sistema fotovoltaico.

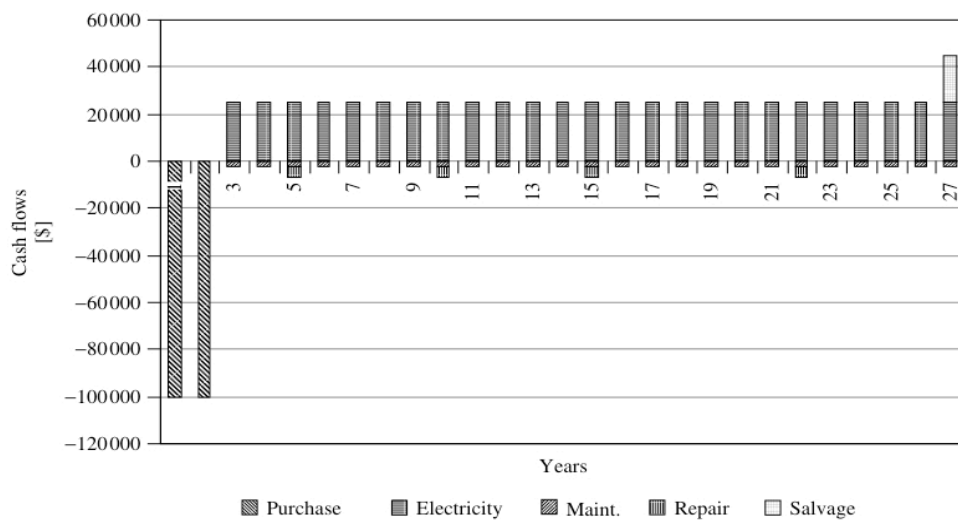


Figura 6.1: Flusso di cassa di un sistema fotovoltaico nel corso di 27 anni. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

I valori dell'energia prodotta dal sistema sono visti come positivi. Nei primi due anni si considerano le spese di installazione del sistema che equivalgono a 100 000 \$ per anno. Il valore di elettricità generata ogni anno equivale a 25 000 \$ e si valuta in base ai costi evitati grazie all'impianto, ad esempio quelli della rete elettrica pubblica. Bisogna far notare che la produzione annuale di potenza in chilowatt-ora, generata dal sistema, è compresa nel grafico e riportata sotto forma di costo. Ogni cinque anni si è considerata una spesa di 5000 \$ dovuta a costi di riparazione. Nell'anno 27 si valuta un ricavo totale di 20 000 \$.

Per porre un singolo valore a questi flussi, l'approccio più usato è quello di riferire tutti i benefici e i costi in un punto ben preciso nel tempo, generalmente il presente, sommando i valori dei vari flussi e confrontando le somme. Queste somme prendono il nome di *valore presente* o *capitale presente* del sistema. Calcolando il valore presente di più sistemi è possibile metterli a confronto a livello economico.

Una somma ricevuta o spesa nel presente ha un certo valore presente P, mentre una somma ricevuta o spesa nei futuri 'n' anni ha un valore futuro F. Se P è investito con un tasso di interesse di percentuale annua i, è possibile calcolare F. Ad esempio alla fine del primo anno avrò:

$$F = P + iP = P(1+i) \quad , \text{ nel secondo anno invece: } F = [P(1+i)](1+i) = P(1+i)^2$$

è facile ricavare la formula generale di F per n anni:

$$F = P(1+i)^n \quad \text{da cui posso ricavare} \quad P = \frac{F}{(1+i)^n} .$$

È possibile notare che il valore presente viene ridotto di un fattore $(1+i)^n$.

Il fattore 'i' può rappresentare il tasso di interesse offerto da una banca, ma nel nostro caso viene chiamato *tasso di sconto*, ovvero il valore che l'acquirente stima nel capitale investito, spesso chiamato anche costo di opportunità. Questo è il tasso previsto nel prossimo eventuale investimento. Nel flusso di contanti analizzato in precedenza si era supposto che l'energia fornita dall'impianto ammontasse ad una somma annua, uniforme, di 25 000 \$ che chiameremmo 'a'. Il valore futuro di ognuno di questi guadagni può essere scritto come:

$$F = a[1 + (1+i) + (1+i)^2 + \dots + (1+i)^{1-n}] = a \sum_{k=0}^{n-1} (1+i)^k = a \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

Da cui posso ricavare il valore presente della serie di questi ricavi annuali:

$$P = a \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

Da queste equazioni possiamo quindi ottenere un esempio semplificato del flusso di cassa rappresentato in precedenza. Il valore presente è calcolato all'inizio dell'anno 3, nel quale il sistema comincia a produrre energia e risulta uguale alla somma:

$$P_S = P_{\text{investimento}} + P_{\text{elettricità}} + P_{\text{manutenzione}} + P_{\text{riparazione}} + P_{\text{recupero}}$$

Supponendo un tasso di sconto dell' 8% è possibile ricavare P_s dalla tabella che segue:

Flusso di Contanti			Valore presente	
Categoria	Spesa/Guadagno [\$]	n	Equazione	P [\$]
Investimento anno 1	-100 000	2	$F=P(1+i)^n$	$P_{\text{investimento}} = -116\ 640$
Investimento anno 2	-100 000	1	$F=P(1+i)^n$	$P_{\text{investimento}} = -108\ 000$
Elettricità fornita anni 3-27	25 000	25	$P = a \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$	$P_{\text{elettricità}} = 266\ 869$
Riparazione anno 5	-5 000	5	$P = \frac{F}{(1+i)^n}$	$P_{\text{riparazione}} = -3403$
Riparazione anno 10	-5 000	10	$P = \frac{F}{(1+i)^n}$	$P_{\text{riparazione}} = -2316$
Riparazione anno 15	-5 000	15	$P = \frac{F}{(1+i)^n}$	$P_{\text{riparazione}} = -1576$
Riparazione anno 20	-5 000	20	$P = \frac{F}{(1+i)^n}$	$P_{\text{riparazione}} = -1073$
Manutenzione anni 3-27	-2 000	25	$P = a \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$	$P_{\text{manutenzione}} = -21\ 350$
Valore di Recupero anno 27	20 000	25	$P = \frac{F}{(1+i)^n}$	$P_{\text{recupero}} = 2920$
totale				$P_s = 15\ 431$

Il sistema ha quindi un valore presente positivo, e si può dire che ha un recupero di 15 431 \$ calcolato all'inizio dell'anno 3.

Nell'analisi appena compiuta, tuttavia, abbiamo trascurato alcuni elementi che possono portare a risultati diversi. Uno di questi è che il valore annuo 'a' è stato considerato costante durante tutto il periodo. Ad esempio si potrebbe pensare che questo aumenti costantemente ogni anno a causa di un'inflazione nei costi dell'elettricità, e ciò può avvenire anche per i costi di manutenzione, ma con un'inflazione diversa. Inoltre, nel

nostro esempio, l'inflazione del dollaro stesso non è stata presa in considerazione. Quando si fa una valutazione trascurando queste ipotesi, tutti i valori monetari e il loro potere d'acquisto vengono mantenuti costanti a quelli del presente; si opera dunque a *dollaro costante*. Quando invece si va ad affrontare un'analisi tenendo conto di questi fattori, la quantità di denaro nel flusso di contanti viene calcolata in base al *dollaro corrente*.

Dato che il calcolo del valore presente è generalmente compiuto per confrontare sistemi, è discutibile se attuare un confronto a dollaro corrente piuttosto che a dollaro costante. Se i risultati sono palesemente a favore di un sistema verso un altro si capisce immediatamente qual è quello più conveniente. Se invece i risultati sono molto simili, attuare un'analisi considerando anche l'inflazione è consigliabile.

Andiamo ora a considerare un caso generale di flusso di contanti, per una organizzazione a profitto, con misure economiche addizionali, specifiche del fotovoltaico. Per un dato anno 'n' di flusso di cassa netto X_n basato sul bilancio dell'investimento effettuato.

$$X_n = (R_n - C_n - I_n) - T(R_n - C_n - I_n - D_n) - K_n + S_n + B_n - P_n \pm W_n$$

I termini dell'equazione sono:

- R_n entrate generali dovute al sistema nell'anno n, generalmente il valore di elettricità generata.
- C_n costi associati alle operazioni di manutenzione del sistema, inclusa manodopera, i materiali e i pezzi di ricambio
- I_n interessi del debito pagati nell'anno n, sul prestito necessario alla formazione del sistema
- D_n tasso di deprezzamento del sistema, assumendo che la tassazione applicabile al proprietario permetta la detrazione del deprezzamento, calcolata in base alla legge della tassa
- T tasso di rata marginale del proprietario, il secondo termine nell'equazione, dunque, rappresenta le tasse pagate in entrata dal proprietario
- K_n spesa di capitale nell'anno n, quantità totale della spesa di patrimonio
- S_n valore di recupero nell'anno n

- B_n quantità di denaro in prestito proveniente da fonti esterne e usato nelle spese di capitale
- P_n pagamenti principali nel capitale di debito (B)
- W_n aumento netto nel capitale lavorativo nell'anno n , con segno negativo se è necessario un aumento nel capitale lavorativo (il capitale lavorativo rappresenta i fondi impiegati ad esempio nelle retribuzioni o nelle scorte).

La definizione di flusso di cassa netto qui utilizzata viene basata sul bilancio tra utile netto e capitale di rischio noto come *return on equity*. Questo perché le organizzazioni a profitto tendono a dare un giudizio sul loro rendimento in base a questo rapporto.

Il flusso di cassa netto di ogni anno viene quindi inserito nell'equazione:

$$NPW = \sum_{n=0}^L \frac{X_n}{(1+m)^n}$$

dove L è la lunghezza di vita del sistema, ed m è l'equivalente matematico del tasso di sconto, solamente rapportato al return on equity. Si va a calcolare quindi il valore netto presente del sistema (*NPW net present worth*) inserendo in quest'equazione il flusso di cassa calcolato per ogni anno di vita del sistema. Si opera con un ordine diverso, con espressioni più generali, arrivando approssimativamente allo stesso risultato della tabella. Bisogna far notare che il proprietario del sistema può vendere energia. Se ciò avviene il reddito è tassabile, altrimenti si pone $T=0$, com'era avvenuto nell'analisi precedente nella tabella.

Un metodo meno sofisticato può essere quello del tempo impiegato dal sistema per il recupero del denaro investito inizialmente, che si può ricavare dall'equazione:

$$\sum_{n=0}^{PB} X_n = 0$$

Questo tipo di calcolo tuttavia non va a considerare né i flussi di cassa né il valore del denaro nel tempo. Risulta molto comodo per un proprietario di un sistema molto piccolo.

Un altro calcolo possibile, che utilizza gli stessi schemi matematici usati in precedenza, è quello del *costo di energia livellato* (in inglese: Levelized Energy Cost -LEC). Grazie a questo si riesce a raggiungere un costo dollari per chilowatt-ora (\$/kWh) che è costante nel tempo. Questo metodo è molto comodo per venditori di energia elettrica, dato che risulta semplice fare un confronto con altre fonti di energia convenzionali o rinnovabili.

I concetti sono sempre quelli dei flussi di cassa e del tasso di sconto. I flussi di cassa netti di ogni anno vengono utilizzati per ricavare un unico valore presente che viene diviso per l'energia nominale prodotta annualmente.

-6.3 Metodologia Generale

Una volta scelto il design da utilizzare nel sistema fotovoltaico che si vuole andare a finanziare, si può procedere ad un'analisi economica. Il primo passo è la determinazione del costo del sistema. Questo avviene in due modi diversi, a seconda del fatto che si vada ad utilizzare una tecnologia disponibile in commercio o meno.

Per entrambe le scelte i componenti e materiali del sistema, tolte le celle solari, sono generalmente disponibili commercialmente ed i prezzi possono essere ottenuti dalla manifattura o dai distributori. I prezzi di tutti i componenti e del lavoro vanno osservati con cura: celle e moduli fotovoltaici, moduli di supporto, strutture di controllo, eliostato (dispositivo utilizzato per seguire il percorso del sole e focalizzarne la luce in un punto), sistema di raffreddamento, unità di potenza, cavi e interconnessioni, terra su cui costruire il sistema, tasse, permessi, costi di finanziamento durante la costruzione, costi dei lavori di installazione. Per grossi sistemi la cui installazione può durare mesi o anni, un piano di lavoro e di spedizione dettagliato sarà necessario per valutare la spesa economica.

Se la scelta ricade invece su una tecnologia non in commercio i cui costi non sono disponibili, i prezzi possono essere predetti dal modello del processo di manifattura adottato da un'ipotetica azienda. Un metodo per effettuare quest'analisi è stato sviluppato dall'istituto di ricerca EPRI (Electronic Power Research Institute). L'intento è quello di calcolare i costi per un volume di produzione specifico, prodotto nell'arco di un anno. Questi costi divisi per il volume di produzione danno il *prezzo ricavato* della cella o del modulo da produrre. In questo prezzo ricavato vengono inclusi tutti i costi diretti e indiretti, comprese le tasse di profitto e rappresenta quindi il prezzo minimo. Naturalmente sarà poi il mercato a determinare l'effettivo prezzo di vendita.

Le operazioni di manifattura sono pensate utilizzando il concetto di *workstation*, definita come una serie di macchine uguali ognuna delle quali opera in parallelo. Nel modello vengono calcolate il numero di macchine necessarie, basate su uno specifico volume finale di produzione e sulle caratteristiche della workstation stessa. La quantità di lavoro viene calcolata utilizzando i parametri delle macchine, la loro disponibilità, la velocità di produzione ideale e altri vari fattori. Vengono valutati anche i costi dei materiali, degli spazi necessari, del personale e dell'amministrazione. Il risultato è un'analisi molto dettagliata, sotto tutti gli aspetti, che porta alla previsione del prezzo del prodotto minimo.

Calcolati i capitali da investire nel progetto, si effettua una stima sull'energia che il sistema va a produrre annualmente e del suo valore presente. Questo viene ricavato considerando le condizioni di luminosità solare della zona e le prestazioni del sistema. Infine viene eseguita l'analisi economica, ad esempio attraverso il costo dell'energia LEC. Questo permette di confrontare il sistema con altre fonti di energia ai quali è stata applicata la stessa analisi.

-6.4 Restituzione dell'energia e diminuzione dell'inquinamento

Se da una parte con un'analisi economica si va a capire se i capitali investiti in un sistema fotovoltaico vengono restituiti nel corso della sua vita, esiste anche un altro tipo di problematica, sulla quale si è dibattuto molto, che può essere riassunta nelle seguenti domande: quant'è l'energia generata in più da questi sistemi durante il loro periodo di utilizzo rispetto a quella che si investe nella produzione del sistema stesso? C'è un netto beneficio energetico verso la società attraverso l'uso di questa tecnologia? La risposta a questo tipo di domande prevede un'analisi di tipo energetico-ecologico, che porta al calcolo del tempo impiegato dal sistema per generare la stessa energia utilizzata durante la sua produzione.

La raffinazione, purificazione e l'estrazione dei materiali semiconduttori utilizzati nella tecnologia fotovoltaica richiede generalmente un utilizzo elevato di energia. Un calcolo di questa energia può estendersi anche all'energia utilizzata per i trasporti e per la produzione dei componenti ausiliari. Nel ricavare il tempo di restituzione dell'energia vengono tipicamente analizzati i seguenti fattori:

- Il design del sistema fotovoltaico, che comprende anche tutti i suoi componenti
- La locazione del sistema
- Il tempo di vita del sistema
- La porzione della catena di consumo d'energia nella manifattura

Nel design vengono determinati l'efficienza di conversione e i contenuti energetici utilizzati nei vari componenti. La locazione del sistema e la sua lunghezza di vita determinano l'energia totale fornita durante il periodo di funzionamento dell'impianto. L'energia ricavata dipende anche da quanto indietro si va nella catena produttiva. Ad esempio, parlando di silicio cristallino, i materiali vengono presi da quelli di scarto nel ramo della microelettronica e può essere ragionevole ignorarne il contenuto energetico. In generale, comunque, l'analisi parte dai materiali base.

Tempi di restituzione dell'energia variano a seconda della tecnologia utilizzata. Attualmente per moduli a silicio cristallino e policristallino si parla di quattro anni, anche se in futuro si arriverà sicuramente a due anni. Per sistemi a pellicola sottile invece si stimano tre anni mentre per quelli a silicio amorfo solamente uno. In questi infatti il materiale utilizzato è molto meno e sono soprattutto i costi del substrato a giocare un ruolo pesante.

Dato un periodo di vita che va fino ai 30 anni, un tempo di restituzione energetica che va da 1 a 5 anni risulta abbastanza lungo, tuttavia non proibitivo. In futuro, gradualmente miglioramenti nell'efficienza dei dispositivi e nelle tecniche di produzione andranno comunque ad accorciare questo tempo sempre di più.

Questa analisi, dunque, è strettamente di tipo ecologico. Una domanda che ci si può porre è: la creazione di sistemi fotovoltaici, che comunque generano sostanzialmente un'energia superiore a quella utilizzata durante la produzione, rappresenta un utilizzo saggio dei combustibili fossili? Una questione valida è la riduzione dei gas effetto serra da parte dell'energia pulita del fotovoltaico rispetto a quella prodotta dai combustibili fossili. Se i governi imponessero delle penalità alla generazione d'energia fossile a favore di quella solare sicuramente si potrebbe avere una spinta maggiore nello sviluppo e vantaggi economici migliori. Senza contare che per la produzione di energia fotovoltaica è possibile

utilizzare energia proveniente da impianti fotovoltaici.

Bisogna tener conto, inoltre, che per un confronto con altri tipi di energia è necessaria un'analisi dello stesso tipo: ad esempio anche all'energia a combustibile fossile possono essere associate energie utilizzate per la raffinazione del gasolio, per la produzione di motori, per il trasporto e per lo sviluppo.

BIBLIOGRAFIA

- Antonio Luque, Steven Hegedus - *“Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”* Wiley, 2003.
- Peter Würfel *“Physics of Solar Cells - From Principles to New Concepts”* Wiley-VHC, 2005.
- Tom Markvart, Luis Castafier *“Practical Handbook of Photovoltaics - Fundamentals and Applications”* Elsevier Ltd, 2003.
- Antonio Martì, Antonio Luque - *“Next Generation Photovoltaics”* IOP Publishing Ltd, 2004.
- Safa Kasap - *“Principles of Electronic Materials and Devices”* McGraw-Hill, 2002
- Warren B Jackson - *“Hydrogen in amorphous silicon”* Current Science, 1996.
- Xiao Liu, R. O. Pohl - *“Low-energy excitations in amorphous films of silicon and germanium”* Phys. Rev. B 58, 9067–9081, 1998.
- Tining Su, P.C. Taylor, Shenlin Chen, R.S. Crandall, A.H. Mahan *“Molecular hydrogen in amorphous silicon revisited”*, Journal of Non-Crystalline Solids 266-269, 2000
- Y.-S. Su, S. T. Pantelides - *“Diffusion Mechanism of Hydrogen in Amorphous Silicon: Ab Initio Molecular Dynamics Simulation”* Physical Review Letters Volume 88, 2002
- Howard M. Branz, Robert Reedy, Richard S. Crandall, Harv Mahan, Yueqin Xu, Brent P. Nelson - *“Fermi-level dependence of the charge state of diffusing hydrogen in amorphous silicon”* Journal of Non-Crystalline Solids 299–302, 2002
- Jia Zhu, Ching-Mei Hsu, Zongfu Yu, Shanhui Fan, Yi Cui - *“Nanodome Solar Cells with Efficient Light Management and Self-Cleaning”* American Chemical Society, 2009

Siti Internet:

www.wikipedia.org

www.nasa.gov

www.rinnovabili.it/fotovoltaico

INDICE

<i>Abstract</i>	3
<i>Capitolo 1: Funzionamento della Cella Fotovoltaica</i>	
-1.1 Introduzione	5
-1.2 Proprietà dei Semiconduttori	6
-1.3 Assorbimento della luce	14
-1.4 Ricombinazione	16
-1.5 Trasporto dei portatori	18
-1.6 Equazioni dei semiconduttori	20
-1.7 Elettrostatica della giunzione pn	21
-1.8 Funzione caratteristica della cella solare	24
-1.9 Celle solari p-i-n	31
-1.10 Limiti teorici della conversione fotovoltaica	32
<i>Capitolo 2: Celle solari al Silicio Cristallino e Policristallino</i>	
-2.1 Alcune proprietà del silicio	35
-2.2 Principali differenze tra celle a silicio cristallino e celle a silicio policristallino	36
-2.3 Superfici	37
-2.4 La superficie frontale	
-2.4.1 L'emettitore	38
-2.4.2 Rivestimento Antiriflesso (Antireflection Coating ARC)	40
-2.4.3 Tessitura	40
-2.5 Substrato	
-2.5.1 Materiali	41
-2.5.2 Drogaggio e Spessore	42
-2.5.3 Effetti della dimensione	43
-2.6 Superficie Posteriore	43
-2.6.1 Intrappolamento Luce	44
-2.7 Celle industriali e celle prodotte in laboratorio a confronto	45
<i>Capitolo 3: Celle solari a Multi-giunzione e a pellicola sottile</i>	
-3.1 Celle solari a multi-giunzione	
-3.1.1 Introduzione	47
-3.1.2 Configurazione Terminali	48
-3.1.3 Schema Generale di una Cella Multi-giunzione	49
-3.2 Celle solari a pellicola sottile (Thin-Film Solar Cells)	50
<i>Capitolo 4: Celle Solari a Silicio Amorfo</i>	
-4.1 Struttura del Silicio Amorfo	53
-4.2 Struttura di una cella a-Si:H	54
-4.3 Effetto Staebler-Wronski	55
-4.4 Energy gap	57
-4.5 Drogaggio	58
-4.6 Deposizione del silicio amorfo	58
-4.7 Conclusioni	60
<i>Capitolo 5: Sistemi Fotovoltaici</i>	
-5.1 Introduzione	61
-5.2 Sistemi fotovoltaici per piccoli dispositivi e applicazioni domestiche indipendenti dalla rete	61
-5.3 Batteria	65
-5.4 Dimensionamento	66
-5.5 Apparecchi Domestici a risparmio energetico	67
-5.6 Sistemi fotovoltaici decentralizzati connessi alla rete elettrica	67

-5.7 Applicazione nel settore Aerospaziale	69
<i>Capitolo 6: Analisi Economica dei Sistemi Fotovoltaici</i>	
-6.1 Introduzione	73
-6.2 Concetti chiave	73
-6.3 Metodologia Generale	79
-6.4 Restituzione dell'energia e diminuzione dell'inquinamento	80
Bibliografia	84