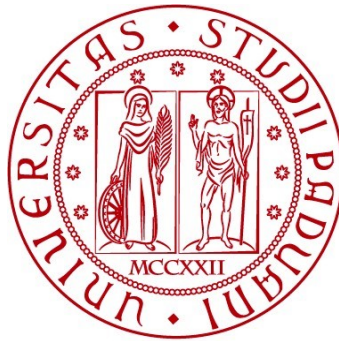


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE: ASPETTI GENERALI E PROSPETTIVE
FUTURE
PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES: GENERAL ASPECTS AND FUTURE
PERSPECTIVES**

Relatore: Chiar.ma PROF.SSA ROBERTA BERTANI

Laureando: MARTINA BANO

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Il fotovoltaico rappresenta una tecnologia rinnovabile, alternativa nella produzione di energia elettrica. Questa nuova forma di tecnologie non è, tuttora, pienamente sviluppata, ma può rappresentare, tramite i forti margini di crescita, una valida alternativa per la fornitura di elettricità.

Si andrà, in seguito, a trattare quelle che sono le principali caratteristiche di questa risorsa, evidenziando il funzionamento del dispositivo fondamentale, la cella solare. Il materiale principalmente trattato, in questa analisi, è il silicio, usato per la fabbricazione delle singole unità, analizzandolo nelle sue caratteristiche. Verrà illustrato quello che è il limite di questa tecnologia e verranno presi in considerazione gli aspetti principali dei componenti che formano il sistema fotovoltaico. Per concludere si tratterà un'analisi, dal punto di vista economica, del fotovoltaico.

Indice

1 Introduzione e spiegazione del concetto di fotovoltaico	5
Cosa è il fotovoltaico	5
Storia del fotovoltaico	7
Costi fotovoltaico, mercati, previsioni e gli obiettivi della ricerca fotovoltaica	13
Futuro delle tecnologie	16
2. Motivazione per l'applicazione e lo sviluppo del fotovoltaico	18
Caratteristiche dell'energia di conversione fotovoltaico.....	18
Teoria di base e suo sviluppo	20
Base tecnologica per la fornitura di energia elettrica, dimensioni e sviluppo del fotovoltaico	23
3. Spiegazione della cella solare	25
Proprietà fondamentali dei semiconduttori	27
Nozioni fondamentali sulle Celle Solari	32
Trasporto di vettori	33
Equazione dei semiconduttori.....	34
Elettrostatica della giunzione pn	36
Fondamentali della cella solare	39
4. Limiti teorici della conversione fotovoltaica.....	46
Sfondo termodinamico.....	47
Le due leggi della termodinamica	48
Funzione termodinamica di radiazione	48
Convertitori fotovoltaici	50
Consistenza termodinamica di Shockly-Queisser. Cella fotovoltaica	53
Limite di efficienza tecnica per i convertitori solari	55
5. Materie prime: il silicio	57
Proprietà fisiche e chimiche del Silicio rilevanti per il fotovoltaico.....	57
Requisiti del silicio per le celle solari cristalline.....	59
Caratteristiche del materiale monocristallino	61
Silicio tri-cristallino	63
Silicio multi cristallino	64
6. Celle e moduli solari in Silicio cristallino	68

Silicio cristallino come materiale fotovoltaico.....	68
Celle solari in Silicio cristallino	69
Processo produttivo	74
Moduli fotovoltaici in silicio cristallino	76
7. Sistemi fotovoltaici.....	77
Introduzione ai sistemi fotovoltaici e varie forme di applicazioni.....	77
Principi del sistema di alimentazione e configurazione del fotovoltaico e applicazioni.....	78
Sistemi solari domestici.....	79
Sistemi fotovoltaici ibridi	80
Dimensionamento di un sistema fotovoltaico.....	81
8. Stoccaggio elettrochimico per il fotovoltaico	83
Introduzione	83
Concetto generale di batteria elettrochimica.....	84
9. Condizioni di potenza per il sistema fotovoltaico.....	86
Controlli e monitoraggio della carica dei sistemi per batterie in sistemi di energia fotovoltaica	86
Inverters	87
10. Analisi economica ed aspetti ambientali del sistema fotovoltaico	90
Sfondo	90
Analisi economica.....	91
Metodologia generale.....	94
Restituzione dell'energia e riduzione dell'inquinamento	95

1 Introduzione e spiegazione del concetto di fotovoltaico

Cosa è il fotovoltaico

Dagli inizi degli anni 70 in poi, l'uomo ha iniziato a fare a gara per creare energia elettrica senza generare e produrre materiali di scarto quali composti fossili o senza ricorrere a reazioni nucleari.

Questo nuovo modo di generare energia elettrica viene applicato in molti ambiti ed è sviluppata in molte località geografiche, garantendo a case ed imprese un nuovo livello di disponibilità e sicurezza energetica.

Il processo consiste in una tecnologia in grado di generare corrente elettrica continua, misurata in Watts (W) o in kilowatt (kW), prodotta da dei semiconduttori¹, quando questi vengono illuminati dai fotoni, ovvero, l'energia delle radiazioni solari è convertita in modo istantaneo e diretto in energia elettrica. Fino a quando la luce illumina le celle solari, questo è il nome attribuito ai singoli elementi del sistema di fotovoltaico, esse generano energia elettrica; qualora questa venga a mancare smettono di produrne.

Le celle non hanno bisogno di ricarica, come le batterie, ma possono funzionare ininterrottamente per 30 anni senza che vi siano problemi per l'operato.

Il processo comporta sia dei vantaggi che degli svantaggi, sia dal punto di vista tecnico che non, dovuti a problemi economici ed alle infrastrutture.

Tabella 1.1: riassume i vantaggi e svantaggi del Fotovoltaico

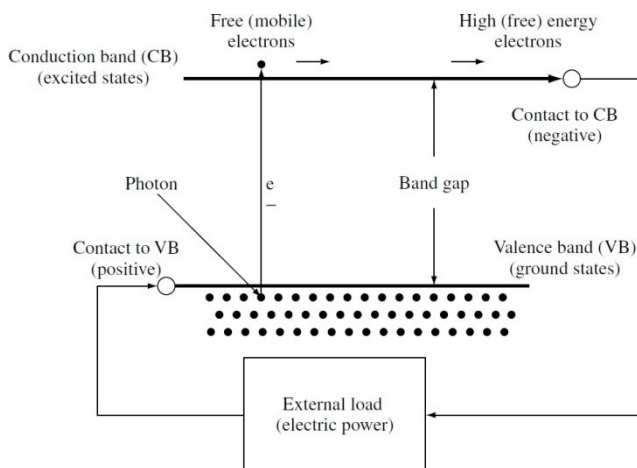
Vantaggi Fotovoltaico	Svantaggi Fotovoltaico
Energia solare è vasta ed illimitata	Fonte di carburante è diffusa ad energia ed a densità bassa
No emissioni, no combustioni e combustione radioattiva per smaltimento materiali di scarto, no inquinamento globale	Alti costi di installazione
Bassi costi operativi	Mancanza di diffusione in commercio, integrazione del sistema e installazione
Nessuna usura dei materiali di produzione	
Funzionamento a temperatura ambiente, senza il raggiungimento di temperature elevate o basse	Mancanza di risparmio energetico economico ed efficiente
Alta affidabilità dei moduli, > 20 anni	Maggiore affidabilità degli ausiliari, compreso lo stoccaggio
Modulare, adattabili alle situazioni	
Veloce installazione	
Moduli installabili nei vecchi e nuovi edifici	
Installato in quasi tutti i punti di utilizzo	
Può soddisfare la domanda locale tramite il suo picco di output	
Elevata accettazione pubblica	
Eccellente documentazione di sicurezza	

¹ *Semiconduttori*: sono materiali, appartenenti alla categoria dei semimetalli, che hanno una resistività superiore a quella dei conduttori ed inferiore a quella degli isolanti, la cui conducibilità dipende in modo diretto dalla temperatura.

Ciò che sta alla base fisica del funzionamento del fotovoltaico sono le celle solari, le quali sono costituite da materiali chiamati semiconduttori che hanno elettroni debolmente legati tra di loro e che occupano una banda di energia chiamata "la banda di valenza"². Quando l'energia supera una certa soglia, chiamata "banda gap energia"³, applicata agli elettroni di valenza, questa rompe i legami tra di essi e divengono "liberi" di muoversi in una nuova banda di energia chiamata "la banda di conduzione"⁴, dove conducono l'elettricità attraverso il materiale. Gli elettroni liberi nella banda di conduzione sono separati dalla banda di valenza tramite la banda proibita, e l'energia necessaria a liberare gli elettroni dai loro legami viene fornita dai fotoni⁵, che sono particelle di luce.

Come riportato in *figura 1.1*, viene rappresentata la relazione tra energia (asse verticale) e i confini spaziali tra le bande, assi orizzontali.

Figura 1.1 Schema di una cella solare.



Gli elettroni sono pompati dai fotoni dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Lì vengono estratti da un contatto selettivo alla banda di conduzione (un semiconduttore con drogaggio n) ad una maggiore (gratuita) energia e consegnati al mondo esterno tramite fili, dove compiono un lavoro utile. Essi poi vengono restituiti alla banda di valenza ad un'energia inferiore (gratuita) di un contatto selettivo alla banda di valenza (un semiconduttore di tipo p). Questo schema evidenzia come i

² *Banda di valenza*: In un isolante o un semiconduttore, quella della struttura elettronica a bande più alta in energia fra quelle occupate da elettroni. Il termine "valenza" è stato attribuito in analogia agli elettroni di valenza di un atomo, che sono quelli del guscio atomico più esterno.

³ *Banda gap energia*: o banda proibita o energia di gap di un isolante o di un semiconduttore è l'intervallo di energia interdetto agli elettroni. Ovvero, in un isolante (o semiconduttore non drogato), non può esistere un elettrone, in uno stato stazionario, che abbia un'energia compresa tra gli estremi nella banda proibita.

⁴ *Banda di conduzione*: banda elettronica a più bassa energia tra quelle non completamente occupate. Dal punto di vista della teoria degli orbitali molecolari, si può dire che la banda di conduzione è il LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital, orbitale molecolare non occupato a più bassa energia).

⁵ *Fotoni*: Il termine fotone deriva dal greco e fu introdotto per la prima volta da Gilbert Lewis nel 1926. Il fotone si indica con la lettera greca γ ed è associato ad ogni radiazione elettromagnetica. Pur essendo un fenomeno ondulatorio, la radiazione elettromagnetica ha anche una natura quantizzata che le consente di essere descritta come un flusso di fotoni. Il fotone è una particella che ha vita infinita: può essere creato e distrutto dall'interazione con altre particelle, ma non può decadere spontaneamente. Pur non avendo massa, è influenzato dalla gravità e possiede energia.

semiconduttori permettano una conduzione non trascurabile dovuta al passaggio dei portatori di carica dalla banda di valenza (piena) a quella di conduzione per eccitazione termica.

La luce solare è uno spettro di fotoni, la cui energia è superiore a quella di banda, energia di soglia, e può eccitare gli elettroni dalla valenza alla banda di conduzione, dove possono uscire dal dispositivo e generare energia elettrica.

I fotoni che hanno un'energia inferiore a quella di soglia e che non riescono ad eccitare gli elettroni della cella, cioè non viaggiano attraverso di essa, vengono raccolti nella sua parte posteriore sotto forma di calore. Una caratteristica delle celle è che possono operare a temperature più elevate rispetto a quelle dell'aria ambiente, vedi anche il calore generato dei suddetti fotoni, ed inoltre producono energia senza operare ad alte temperature e senza parti mobili.

Questi ultimi aspetti sono punti di forza del sistema fotovoltaico, i quali gli garantiscono sicurezza, affidabilità e semplicità di funzionamento.

Il processo che sta alla base è la "giunzione pn", la quale consiste nell'avere il fenomeno fisico che si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza del semiconduttore passa alla banda di conduzione a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico, cioè si ha il lato n, con carica molto negativa, e il lato p, con carica molto positiva.

Storia del fotovoltaico

PIONIERI(1839 – 1917)

1839: Edmond Becquerel, a diciannove anni, scoprì l'effetto fotovoltaico durante alcuni esperimenti con celle elettrolitiche⁶, osservando il formarsi di una d.d.p. tra due elettrodi identici di platino, uno illuminato e l'altro al buio; la d.d.p. dipendeva dall'intensità e dal colore della luce. 1873: Willoughby Smith scopre la fotoconducibilità⁷ del selenio. 1876: Due scienziati britannici, Adams e Day, osservarono il selenio convertire la luce del sole direttamente in elettricità, senza riscaldare un fluido e senza utilizzare parti mobili. Giunzioni di selenio e suoi ossidi metallici vengono utilizzate ancor oggi per la produzione di luxmetri⁸. 1883: Fritts descrive il funzionamento di una cella fotovoltaica nel tentativo di simulare l'occhio umano. 1904: Hallwachs scopre

⁶ *Celle elettrolitiche*: In elettrochimica, con il termine cella elettrolitica si indica una particolare cella elettrochimica che permette di convertire energia elettrica in energia chimica. Tale processo viene detto elettrolisi.

⁷ *Foto conducibilità*: aumento di conduttività elettrica in un semiconduttore colpito da una radiazione elettromagnetica.

⁸ *Luxmetri*: strumento di misura per l'illuminamento.

l'effetto fotovoltaico in un dispositivo a base di rame. 1914: il rendimento delle celle al selenio si aggira intorno all'1%. Oggi, in laboratorio, le celle al silicio ad altri materiali raggiungono quasi il 40%. 1917: Kennard e Dieterich usano il concetto di barriera di potenziale per spiegare l'effetto fotoelettrico.

LO SVILUPPO DELLE TECNOLOGIE

I primi dispositivi basati sul silicio si possono osservare già nei primi anni '40. Ma è nella primavera del 1953 che, studiando il silicio e le sue possibili applicazioni nell'elettronica, Gerald Pearson, fisico presso i laboratori Bell, costruì involontariamente una cella solare a silicio molto più efficiente di quella a selenio. Altri due scienziati della Bell – Darryl Chapin e Calvin Fuller – perfezionarono la scoperta di Pearson e realizzarono la prima cella in grado di convertire in elettricità abbastanza energia solare per alimentare dispositivi elettrici di uso quotidiano: il primo giorno di sole del 1954 la cella al silicio funzionava con un rendimento del 6%. Negli anni '60 si cominciò a pensare di produrre "nastri e fogli" di silicio, per cercare di risolvere il problema degli ingenti sprechi di materiale dovuti al taglio dei lingotti. Ancora negli anni '60 Shurland propose l'utilizzo del solfuro di Cadmio, e nel '67 era pronta la prima cella a solfuro di cadmio⁹ depositato su plastica. Negli anni '70 cominciarono ad essere sviluppate, nell'ambito delle applicazioni spaziali, celle all'arseniuro di Gallio¹⁰, le quali presero definitivamente piede nell'ultimo decennio del secolo. Vennero sviluppati procedimenti per produrre silicio policristallino, meno costosi e meno dispendiosi di quelli per il monocristallino. Dopo la crisi petrolifera del '73 Carson ottiene per caso una pellicola sottile di silicio amorfo idrogenato, che nel '76 raggiunge il rendimento del 5,5%. In quegli anni il DOE PV Research and Development Programme sperimentava pellicole sottili al silicio cristallino, e tutta una gamma di nuovi materiali: CIS, CdTe, InP, Zn₃P₂, Cu₂Se, WSe₂, GaAs, ZnSiAs. È interessante notare che l'utilizzo di pellicole sottili era già stato proposto dallo stesso Chapin, all'epoca delle sue prime scoperte. Nei primi anni '80 Barnett, per conto della SERI, si interessò al tellururo di cadmio¹¹ e alle pellicole di silicio policristallino, fondando la società "AstroPower", oggi ben nota. Sempre nei primi anni '80, Martin Green, lavorando alla tecnologia del silicio, sostituì la serigrafia con solchi in rame realizzati con il laser. Nel 1988 i fogli di silicio venivano ricavati da poligoni ottagonali, migliorando il rendimento del processo e diminuendo la fragilità.

⁹ *Solfuro di cadmio*: Il solfuro di cadmio è un composto a reticolo covalente di cadmio e di zolfo. A temperatura ambiente si presenta come un solido di colore giallo-arancio.

¹⁰ *Arseniuro di Gallio*: è un materiale inorganico. È un semiconduttore composto dalla combinazione degli elementi chimici arsenico e gallio. La sua formula chimica è GaAs.

¹¹ *Tellururo di cadmio*: Il tellururo di cadmio è un composto chimico cristallino e stabile formato da cadmio e tellurio con una struttura cristallina di blenda.

Nel 1997 veniva “lanciata” la prima cella a giunzione tripla¹² a silicio amorfo. I ricercatori del FV hanno avuto un ruolo chiave nella scoperta di nuovi materiali semiconduttori e strutture ibride, e diedero importanti contributi alle tecniche di crescita epitassiale e di crescita delle pellicole lattice-matched; una delle prime applicazioni delle strutture ibride a semiconduttore sull’GaAs e le giunzioni III-V, sviluppate originariamente per i campi FV a concentrazione. In 50 anni di ricerche sul fotovoltaico, mentre questo beneficiava dell’esplosione della tecnologia microelettronica del silicio, produceva nel contempo nuove conoscenze a beneficio di quella stessa industria elettronica con cui era intimamente legato.

LE APPLICAZIONI

L’Aeronautica e l’Esercito statunitensi seguirono molto da vicino lo sviluppo della cella solare a silicio presso i laboratori Bell. Entrambi ritenevano che il fotovoltaico potesse costituire la fonte energetica ideale per un progetto top-secret: i satelliti artificiali orbitanti attorno alla Terra. Grazie a un’assidua crociata condotta da Hans Ziegler, del corpo del Genio Trasmissioni dell’esercito statunitense, la Marina Militare installò sui satelliti un sistema energetico a due sorgenti – batterie chimiche e celle solari al silicio – sul satellite Vanguard; mentre le batterie si esaurirono dopo una settimana circa, le celle solari funzionarono per anni. Già dalla fine degli anni ‘50 il fotovoltaico forniva elettricità ai satelliti americani e sovietici. Gli ingegneri del solare progettarono moduli sempre più potenti, mentre il nucleare non realizzò mai le aspettative per i satelliti spaziali. Alla fine degli anni ‘70 le celle solari erano ormai diventate fonte energetica abituale per i satelliti artificiali, e così è ancora oggi. La tecnologia era invece troppo costosa per gli usi terrestri, e lo rimase fino ai primi anni Settanta, quando Elliot Berman, sostenuto finanziariamente dalla Exxon, progettò un modulo solare notevolmente più economico. Il primo acquirente importante di celle solari per uso terrestre fu l’industria petrolifera, che se ne servì in luoghi non serviti dalle linee elettriche: pannelli fotovoltaici vennero usati al posto di batterie tossiche (ingombranti e dalla vita breve) per alimentare le luci di segnalazioni sulle piattaforme petrolifere del Golfo del Messico e nei campi di estrazione del petrolio e del metano, dove servono piccole quantità di elettricità per combattere la corrosione delle teste dei pozzi e dei condotti. Nel 1974 John Oades, ingegnere presso una controllata della GTE, progettò un ripetitore a bassissima potenza per il quale era sufficiente l’energia fotovoltaica.

¹² *Cella a tripla giunzione:* Il dispositivo è stato realizzato utilizzando una combinazione di InGaAs, **arseniuro di gallio e indio** nello strato assorbente inferiore, una caratteristica che ha permesso di aumentare l’area di attività ai bordi della cella fotovoltaica. Al di sopra sono disposti gli altri due strati foto-assorbenti, uno a base di arseniuro di gallio e l’altro, quello superiore, contenente fosforo di indio e gallio. Proprio la particolare composizione degli strati ha permesso di massimizzare l’efficienza di conversione della cella solare.

Così non ci fu più il problema di trasportare carburante o batterie nelle impervie zone montane dove venivano installati i ripetitori, e nelle piccole comunità del West degli Stati Uniti i residenti smisero di percorrere grandi distanze per poter effettuare una telefonata interurbana. L'Australia, con una popolazione relativamente piccola distribuita su un territorio molto ampio, cominciò a installare reti di comunicazione a energia fotovoltaica già nel 1978. Alla metà degli anni '80 le celle solari erano diventate la fonte energetica di elezione per le reti remote di telecomunicazioni in tutto il mondo. Nel 1977 il Capitano Lloyd Lomer, della Guardia Costiera statunitense, diede il via ad un programma fotovoltaico per alimentare le boe isolate e i fari costieri. Oggi la maggior parte degli ausili per la navigazione in tutto il mondo funziona a celle solari. Verso la metà degli anni '70 molte compagnie ferroviarie ricorsero al fotovoltaico per alimentare i dispositivi di segnalamento e di smistamento necessari per la sicurezza del traffico ferroviario, funzionanti grazie ai sistemi di comunicazione a microonde. Le comunicazioni fra le stazioni ferroviarie poterono fare a meno dei pali e dei cavi telefonici lungo i binari. Quando, sempre negli anni '70, la grande siccità colpì la regione del Sahel in Africa, padre Bernard Verspieren avviò un programma di pompaggio fotovoltaico per attingere acqua dalle falde acquifere che fa ormai da modello per il mondo in via di sviluppo. A quei tempi, in tutto il mondo c'erano meno di dieci pompe fotovoltaiche. Oggi ce ne sono decine di migliaia. Negli anni '80 l'ingegnere svizzero Markus Real dimostrò la validità della generazione distribuita installando moduli solari da tre kilowatt su 333 tetti di Zurigo. Da allora, nessuno parla più di centrali elettriche fotovoltaiche, e i vari governi stanno sviluppando piani di incentivazione finanziaria per incoraggiare i cittadini a solarizzare i propri tetti. Poiché il costo dell'installazione delle linee di trasmissione elettrica è estremamente elevato, oltre due miliardi di persone nei paesi in via di sviluppo sono ancora prive di elettricità di rete. Intanto, però, in metà delle famiglie delle isole della Polinesia francese, nelle zone rurali del Kenya, nella 12 Repubblica Dominicana e nel Centroamerica, migliaia di persone alimentano lampadine, televisori e radio con l'elettricità solare. L'affidabilità e la versatilità del fotovoltaico in ambiente spaziale e terrestre hanno impressionato molti addetti ai lavori nell'industria elettrica e delle telecomunicazioni. Oggi la Banca Mondiale e molti organismi internazionali ritengono che le celle solari "abbiano un ruolo importante e sempre crescente nella fornitura di servizi elettrici nelle aree rurali dei paesi in via di sviluppo".

IL FOTOVOLTAICO IN ITALIA

Nell'agosto del '61, in occasione della prima Conferenza Internazionale delle Nazioni Unite sulle Fonti di Energia Nuove e Rinnovabili, svoltasi a Roma, vennero presentate numerose opere sullo stato dell'arte e sulle prospettive del fotovoltaico. Dopo la crisi petrolifera del 1973 il CNR cominciò a fabbricare celle solari, vennero

fondate la Solare S.p.a e la Helios Technology, inizialmente nota come Secies. Nel 1979, al Passo della Mandriola, nella comunità dell'appennino Cesenate, venne installato il primo impianto fotovoltaico italiano da 1 kW, frutto di una collaborazione tra l'istituto LAMEL del CNR, l'ENEL, la Riva Calzoni e la Helios Technology. Negli anni '90 l'Italia era primo posto in Europa per la potenza installata in impianti fotovoltaici (circa 25 MW), e nel 1993 nacque il Piano Fotovoltaico Nazionale, al quale parteciparono, tra gli altri, l'ENEA, l'ENI Eurosolare e l'Helios Technology. Attualmente è stato varato il programma "10.000 tetti fotovoltaici", che avrà termine nel 2007.

1.1 Tabella che riassume gli eventi significativi nello sviluppo delle tecnologie dei sistemi fotovoltaici

1839 Becquerel (FR) scopre l'effetto fotogalvanico degli elettroni
1873 Smith (Regno Unito) ha scoperto la fotoconduttività del solido Se
1877 Adams e Day (Regno Unito) scoprono la fotogenerazione della corrente nelle valvole Se; la prima osservazione di Effetto PV nei solidi
1883 Fritts (Stati Uniti) realizza la prima cella solare di grandi dimensioni con il film Se
1954 Prime celle solari efficienti al 6% segnalate: Si (Bell Lab, Usa) e Cu ₂ S/CdS (Air Force, Usa)
1955 Hoffman Electronics (Usa) offre celle fotovoltaiche Si del 2% a \$1500/W
1958 NASA Vanguard satellite con array solare di backup in Si
1959 Hoffman Electronics (Usa) offre celle fotovoltaiche Si del 10% efficienti
1963 Sharp Corp (JP) produce i primi moduli commerciali
1966 NASA Orbiting Astronomical Observatory lanciato con array da 1 kW
1970 Prime celle solari a eterostruttura GaAs di Alferov, Andreev et al. Nell'URSS
1972 Prima conferenza PV per includere una sessione sulle applicazioni terrestri (IEEE)
1973 La crisi petrolifera mondiale spinge molte nazioni a considerare le energie rinnovabili, inclusa quella del fotovoltaico
1974 Project Sunshine iniziata in Giappone per favorire la crescita dell'industria e delle applicazioni fotovoltaiche; Tyco (Usa) coltiva un nastro Si di lunghezza 2,5 cm per il fotovoltaico, prima alternativa ai wafer Si
1975 Primo libro dedicato alla scienza e tecnologia fotovoltaica di Hovel (Usa)
1980 Prima cella solare a film sottile 10% utilizzando Cu ₂ S/CdS (Usa)
1981 Array di concentratori da 350 kW installati in Arabia Saudita
1982 Primo impianto fotovoltaico su scala utility da 1MW(CA,Usa) con moduli Arco Si in seguito a 2 assi
1984 Array da 6MW installato in Carrisa Plains, Usa
1985 Celle solari Si ad alta efficienza: celle solari Si 20% in condizioni di luce standard
1986 Primo modulo di alimentazione a film sottile commerciale, l'a-Si G4000 di Arco solar, Usa
1987 Quattordici auto ad energia solare completano la gara World Solar Challenger (Australia) di 3200 km con il vincitore ad una velocità media di 70 km/h
1994 Multieffetto del concentratore a 2 terminali GaInP/GaAs >30% (NREL,Usa)
1995 "1000 tetti": progetto dimostrativo tedesco per installare il fotovoltaico sulle case
1996 La cellula solido/ liquido fotoelettrochimica "tinta sensibilizzata" raggiunge l'11% (EPFL,Svizzera)
1997 La produzione fotovoltaica mondiale raggiunge i 100MW all'anno
1998 Le celle solari a film sottile Se ₂ (InGa) raggiungono il 19% di efficienza (NREL,Usa) comparabili con Si multicristallino
1999 Il fotovoltaico cumulativo installato in tutto il mondo raggiunge 1000 MW
2000 Le Olimpiadi in Australia evidenziano un'ampia gamma di applicazioni fotovoltaiche; primo laureato in Ingegneria Fotovoltaica e Ingegneria Solare (UNSW, Australia)
2002 Il fotovoltaico cumulativo installato in tutto il mondo raggiunge i 2000MW. Ci sono voluti 25 anni per raggiungere i primi 1000 MW e solo 3 per raddoppiarli; la produzione di celle Si cristalline supera i 100 MW per anno alla Sharp Corp, Giappone.

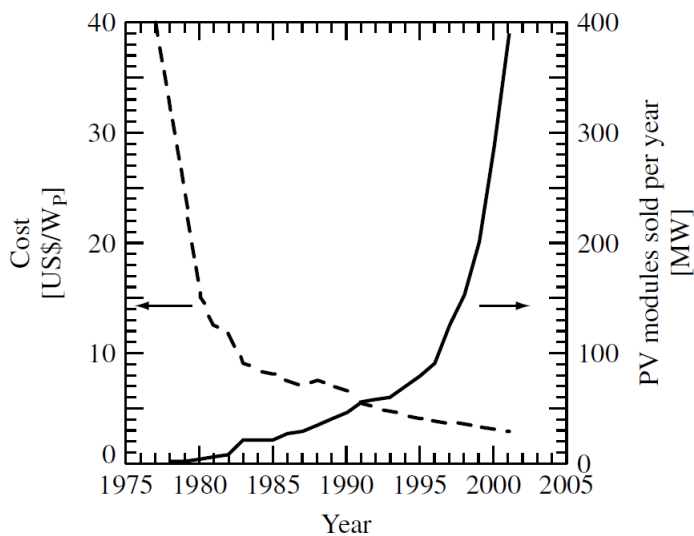
Costi del fotovoltaico, mercati, previsioni e gli obiettivi della ricerca fotovoltaica

Nei primi anni di ricerca, ovvero della metà degli anni '60 alla metà degli anni '80, l'obiettivo principale era quello di rendere il prodotto più efficiente in modo che riuscisse a produrre più potenza. Con lo sviluppo delle tecniche si ebbe un gran balzo in avanti in termini di efficienza delle celle ed i costi per la loro produzione diminuirono, poiché si passò ad un processo semiautomatico per la loro costruzione.

L'unità di misura sul quale ogni modulo è tarato, è la potenza di picco (WP), misurata in Watt: consiste nella potenza che il modulo consegnerebbe, ad un carico perfettamente abbinato, quando viene illuminato con 1kW/m^2 di potenza luminosa di un certo spettro standard a temperatura fissa della cella, pari a 25°C , ovvero è la massima potenza prodotta da un dispositivo fotovoltaico in condizioni standard di funzionamento.

Per avere un'idea dell'andamento del processo, la figura seguente, *figura 1.2*, mostra la relazione costo-sviluppo che si ha avuto nel corso degli anni, in cui da un iniziale costo elevato si è passato ad avere un costo via via sempre più basso nella produzione, in quanto le tecnologie sono andate a migliorare e sempre più si ha avuto una maggiore produzione di energia.

Figura 1.2



Inizialmente i prezzi erano alti, in quanto la produzione di volume era bassa, di conseguenza i costi di sviluppo e di avviamento vennero ripartiti sulle poche unità vendute. Questo prezzo molto elevato escludeva la maggior parte degli acquirenti ad eccezione di applicazioni di nicchia uniche, cioè trasmettitori di telecomunicazioni remote, programmi sponsorizzati dai governi, quali satelliti, stazioni di monitoraggio meteorologico, e curiosi

pionieri benestanti.

Con l'aumento della produzione di volume, i costi diminuirono e la tecnologia diviene ora alla portata economica di più persone con redditi moderati, le quali possono permettersi il prodotto. Il fatto che il prezzo continui a diminuire e che sempre più il mercato riesca ad aprire i suoi orizzonti, stimola la produzione e la capacità di fornire nuove tecnologie in modo da attirare nuovi investitori che contribuiscano allo sviluppo.

Questa relazione tra la produzione cumulata di moduli fotovoltaici in MWP (M) e il prezzo in \$/WP(p) può essere descritta da una curva di esperienza, che è caratterizzata da il parametro E, esponente dell'esperienza:

$$\frac{p(t)}{p_0} = \left[\frac{M(t)}{M_0} \right]^{-E}$$

M₀: mercato cumulativo

p₀: prezzo iniziale arbitrario

t=0: inizio della commercializzazione iniziale

GLI SCENARI:

Entro il 2030 il fotovoltaico produrrà 2.600 miliardi di kWh, pari al 14% circa della domanda globale di elettricità, oltre quella fornita attualmente dal nucleare, grazie all'installazione di pannelli solari in tutto il mondo. La crescita di questo mercato e settore porterà energia pulita a due terzi della popolazione mondiale: 1.3 miliardi di persone in regioni urbanizzate, ed oltre 3 miliardi in aree non ancora raggiunte dall'elettricità. Il costo di un kWh da fotovoltaico risulterà pienamente competitivo con le altre tecnologie, come già avvenuto dal 2015. I benefici saranno anche dal punto occupazionale, poiché verranno creati nuovi posti di lavoro.

Dal 1998, il fotovoltaico ha avuto una crescita annua media superiore del 35%, aspetto che ha superato tutte le previsioni più ottimistiche.

Questi, in estrema sintesi, i dati più significativi contenuti nel 5 rapporto Solar generation, realizzato da Greenpeace ed EPIA (European Photovoltaic Industry Association), aggiornato al settembre 2008.

Tabella 1.2

Potenza totale cumulata del fotovoltaico	1.864 GW
Produzione elettrica	2.646 TWh
Utilizzatori connessi alla rete	1.280 miliardi
Utilizzatori isolati dalla rete	3.216 miliardi
Potenziati posti di lavoro	10 milioni
Giro d'affari	454 miliardi di €/anno
Costo dell'elettricità solare	0,07-0,13 €/kWh
Emissioni di CO2 evitate (cumulativo)	8.953 miliardi di tonnellate

Il 5° rapporto Solar generation, nel tentativo di stimare la potenzialità del fotovoltaico da qui al 2030, ipotizza due diversi scenari:

1. **Uno Scenario Avanzato** (Advanced Scenario), proposto da EPIA (European photovoltaic industry association) e Greenpeace, in cui la crescita del fotovoltaico è supportata e sostenuta da numerosi programmi governativi, consentendo un'elevata crescita e diffusione. Così facendo il mercato avrà un grande slancio e con economie di scala si avrà l'abbattimento dei costi di produzione.

tabella 1.3 TASSI DI CRESCITA DEL MERCATO nello SCENARIO AVANZATO,

Tasso di crescita medio 2007-2010	40%
Tasso di crescita medio 2011-2020	28%
Tasso di crescita medio 2021-2030	18%

2. **Uno Scenario Prudente** (Moderate Scenario), in cui si ha uno scarso apporto politico, il quale rallenta lo sviluppo delle tecnologie. Questo si converte in una perdita di slancio del mercato e quindi una riduzione poco marcata dei costi.

tabella 1.4 TASSI DI SCESITA DEL MERCATO nello SCENARIO PRUDENTE

Tasso di crescita medio 2007-2010	30%
Tasso di crescita medio 2011-2020	21%
Tasso di crescita medio 2021-2030	12%

Per agevolare e facilitare lo sviluppo del fotovoltaico si sta cercando di ridurre i costi e migliorare le prestazioni. Visto che l'obiettivo generale è quello di produrre un sistema fotovoltaico a basso costo, c'è il bisogno di avere celle solari a basso costo, di un sistema a basso costo, compreso il montaggio hardware, elettronica di condizionamento, fusibili, cavi, archiviazione, rilevamento. La ricerca e sviluppo di queste aree è stata minore rispetto all'impegno che si è dedicato alle celle solari fotovoltaiche ed ai moduli.

Tabella 1.5 Obiettivi dell'attuale ricerca e produzione di celle solari

Utilizzare meno materiale semiconduttore realizzando celle più sottili
Utilizzare materiali meno costosi dei semiconduttori. Questi tendono ad essere meno puri e meno perfetti.
Migliorare le prestazioni delle celle solari con semiconduttori meno costosi e meno perfetti
Anche con questi materiali più poveri si possono mantenere alti rendimenti di produzione, cioè ridurre il numero di celle o moduli respinti dal controllo qualità
Aumentare l'utilizzo del materiale riducendo sprechi nella produzione di semiconduttori o celle
Aumentare il flusso delle celle solari sulle celle solari utilizzando concentratori senza aumentare il costo, viene utilizzato meno materiale semiconduttore
Aumentare l'utilizzo della radiazione solare assorbendo di più dallo spettro in modo più efficiente
Aumentare la velocità e la produttività dei processi di produzione
Semplificare le fasi di elaborazione (riducendo i costi di fabbricazione ed aumentare la resa) e riduzione costi delle attrezzature
Ridurre i costi e migliorare l'affidabilità di BOS (elementi ausiliari)

Futuro delle tecnologie

Il pannello fotovoltaico classico è costituito da celle al *silicio cristallino* (monocristallino o policristallino); quando gli atomi di silicio si dispongono in modo tale da creare un unico cristallo, una sorta di lingotto, si parla di celle fotovoltaiche a silicio monocristallino, quando gli atomi di silicio si dispongono in modo tale da costruire vari cristalli uniti tra di loro si parla invece di celle fotovoltaiche a silicio policristallino.

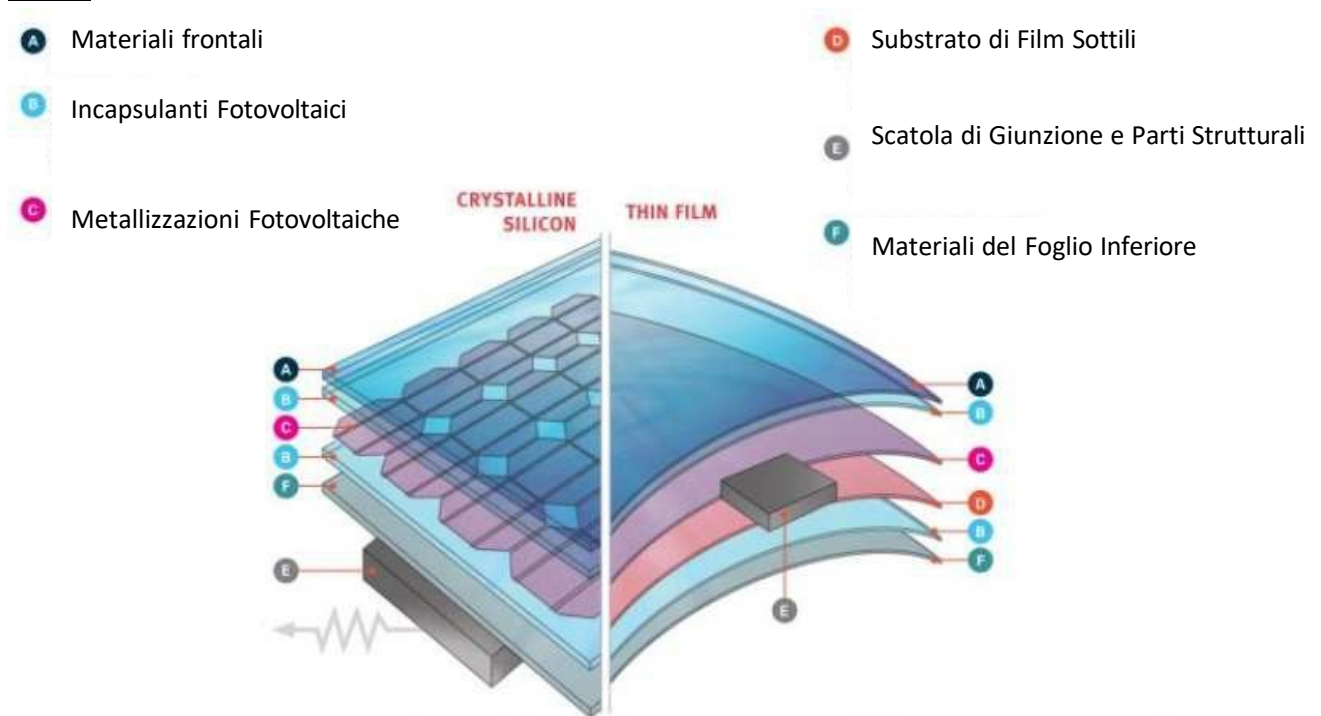
Se, invece, si utilizzano altre tipologie di semiconduttori al posto del classico silicio, i quali vengono posizionati sopra ad una lastra di vetro, plastica oppure di metallo, si parla di *celle a film sottile* (thin film).

Uno di questi materiali è il silicio amorfo, variante di quello cristallino in quanto più grezzo, ma ugualmente capace di attivare l'effetto fotovoltaico, rivestendo il supporto con un unico film sottile dello spessore di pochi millimetri. Tra le tecnologie alla base del film sottile, che si distinguono per semiconduttore utilizzato, sono presenti: quella dell'A-Si (Silicio Amorfo), quella CIGS o CIS (Seleniuro di rame, indio e gallio la prima, Diseleniuro di rame e indio la seconda) e la GaAs (Arseniuro di gallio). Sono presenti dei moduli a film sottile in

Tellurio di cadmio, il CdTe contenente una grande quantità di cadmio che è una sostanza cancerogena e quindi non rappresenta la tecnologia migliore dal punto di vista per l'impatto ambientale.

Le tecnologie citate sopra hanno diverse caratteristiche che le contraddistinguono, ovvero alcune sono più adatte in larga scala, altre in piccola scala, altre hanno maggiore resa, per cui la tecnologia da applicare va vista in funzione del contesto specifico. Nonostante questo nuovo ramo della tecnologia non sia ancora ampio, rappresenta solo il 3%, i processi relativi al suo sviluppo sono solo agli inizi ed hanno grandi margini di crescita, mentre quelli del tradizionale pannello iniziano ad aver un rallentamento nel loro sviluppo. Per questo motivo è giusto prendere in considerazione i vantaggi che queste nuove tecnologie possono offrire. I costi di produzione del film sottile sono minori rispetto alla cella tradizionale, costa meno produrlo ed ha una maggiore versatilità di utilizzo; costano meno perché hanno bisogno di lunghe superfici e pertanto vengono usati su larga scala (in ambito industriale, per scuole o università). Sono produttivi con poca luminosità o con un'inclinazione non ottimale, hanno una grande opportunità di crescita in ambito residenziale, aventi design innovativo e anche per la loro flessibilità e spessore ridotto. Il punto di forza di questa tecnologia è che il *thin film module* può rivestire intere facciate di edifici, può integrarsi in vetrate, tetti a "cupola" e ad elementi architettonici irregolari. Può essere installato in posizione verticale o orizzontale, non perfettamente a sud, sfruttando le sue caratteristiche di lavorare bene ad alte temperature o con luce diffusa, garantendo comunque un rendimento maggiore rispetto ai pannelli in silicio cristallino.

Figura 1.3 Cella Silicio Cristallino- Cella a Film Sottile.



2.Motivazione per l'applicazione e lo sviluppo del fotovoltaico

Il fotovoltaico è il simbolo tecnologico di un futuro sistema di approvvigionamento sostenibile in molti paesi. Su questa nuova tecnologia vengono investite ingenti fonti di denaro per la ricerca e per lo sviluppo; diversi governi hanno avviato importanti programmi di introduzione sul mercato e l'industria investe in impianti di produzione sempre più grandi. Questa nuova fonte di energia riceve molto apprezzamento da parte del pubblico ed è sempre in forte crescita ed evoluzione; ciò è dovuto al fatto che l'elettricità fotovoltaica (PV) è considerata meno costosa rispetto a quella della rete elettrica convenzionale.

Caratteristiche dell'energia di conversione fotovoltaico

Il fotovoltaico punta su due aree di applicazione. Una per la rete di dispositivi professionali e sistemi di alimentazione (ad esempio apparecchiature di telecomunicazioni, sistemi casa solare) e l'altra è la produzione di energia elettrica su larga scala come sostituta ai processi produttivi di energia presenti oggi. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, il potenziale dell'energia fotovoltaica è di fondamentale importanza.

Tabella 2.1

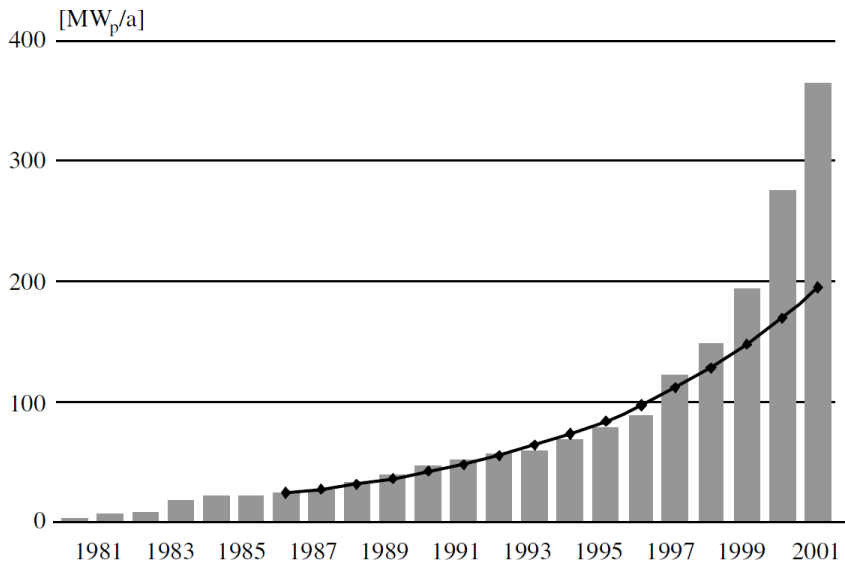
Risorse	Uso Corrente	Potenziale Tecnico	Potenziale Teorico
Energia Idrica	9	50	147
Energia Biomasse	50	>276	2900
Energia Solare	0,1	>1575	3900000
Energia Eolica	0,12	640	6000

La tabella illustra l'uso corrente delle fonti energetiche rinnovabili attraverso il potenziale tecnico e teorico. Il potenziale teorico non prende in considerazione le restrizioni sull'uso del territorio, le efficienze di conversione, i requisiti di stoccaggio. Il potenziale tecnico non deve essere confuso con il potenziale economico, in quanto i requisiti patrimoniali per attivare le varie fonti su larga scala non sono stati considerati. La tabella illustra che nel corso degli anni il sistema energetico globale basato sull'energia solare sarà il principale sistema a fornire energia elettrica, poiché anche in presenza di forti restrizioni dell'area, ad esempio utilizzo di una piccola percentuale della superficie terrestre, porterebbe comunque alla produzione di energia

più tecnica rispetto alle altre fonti rinnovabili, in quanto la radiazione solare è di gran lunga la più grande e la più disponibile. Questo fa sì che vengano sviluppati sia impianti termici solari che fotovoltaici. I moduli fotovoltaici possono essere applicati praticamente ovunque e convertire la radiazione diffusa e diretta (raggio) con circa la stessa efficienza. La conversione di energia fotovoltaica soddisfa i requisiti importanti di produzione di energia. Durante il funzionamento non ci sono emissioni nocive o trasformazioni di materia, generazioni di inquinamenti, né alcuna produzione di rumore o di qualche altro sottoprodotto. Questo non riguarda, però la produzione dei moduli, infatti la produzione delle varie componenti dei dispositivi include la trasformazione dei materiali e la produzione di rifiuti; per limitare questo aspetto è importante realizzare i moduli conformi e rispettosi dell'ambiente. Un' altro aspetto positivo del PV è che può essere visto come un settore di sviluppo per il mercato dei semiconduttori. Questo facilita un forte trasferimento di tecnologia da un'industria affermata, come quella dello sviluppo delle tecniche, ad una emergente, quella fotovoltaica.

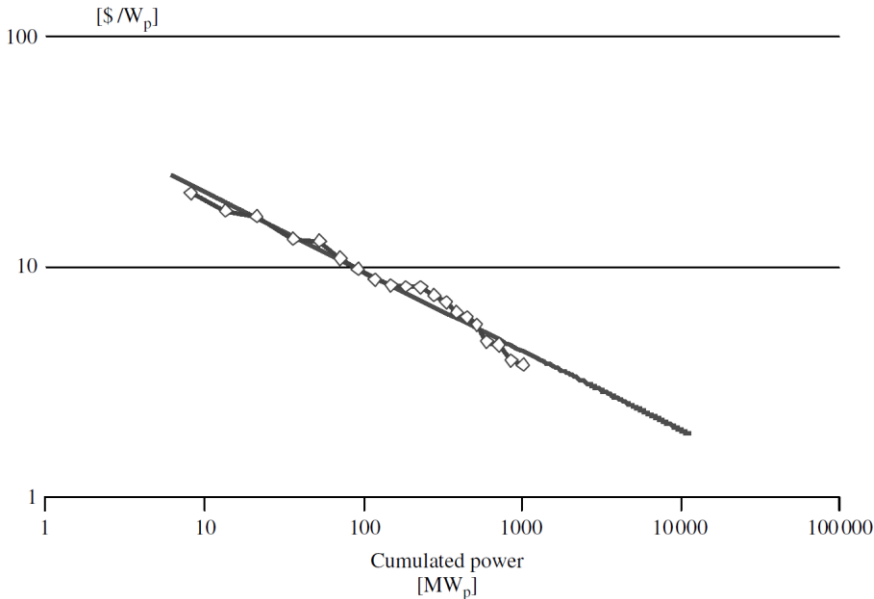
Questi continui sviluppi e l'abbassamento dei prezzi per i materiali fotovoltaici hanno comportato una forte crescita per l'installazione e la diffusione del fotovoltaico dagli inizi fino ad adesso.

Figura 2.1 Andamento del fotovoltaico dai primi anni fino ai tempi più contemporanei.



Evoluzione del mercato globale del fotovoltaico. Fino al 1996 il tasso di crescita era circa del 15% all'anno. I tassi di crescita attuali annui sono del 30%.

Figura 2.2 Andamento del prezzo nel corso degli anni



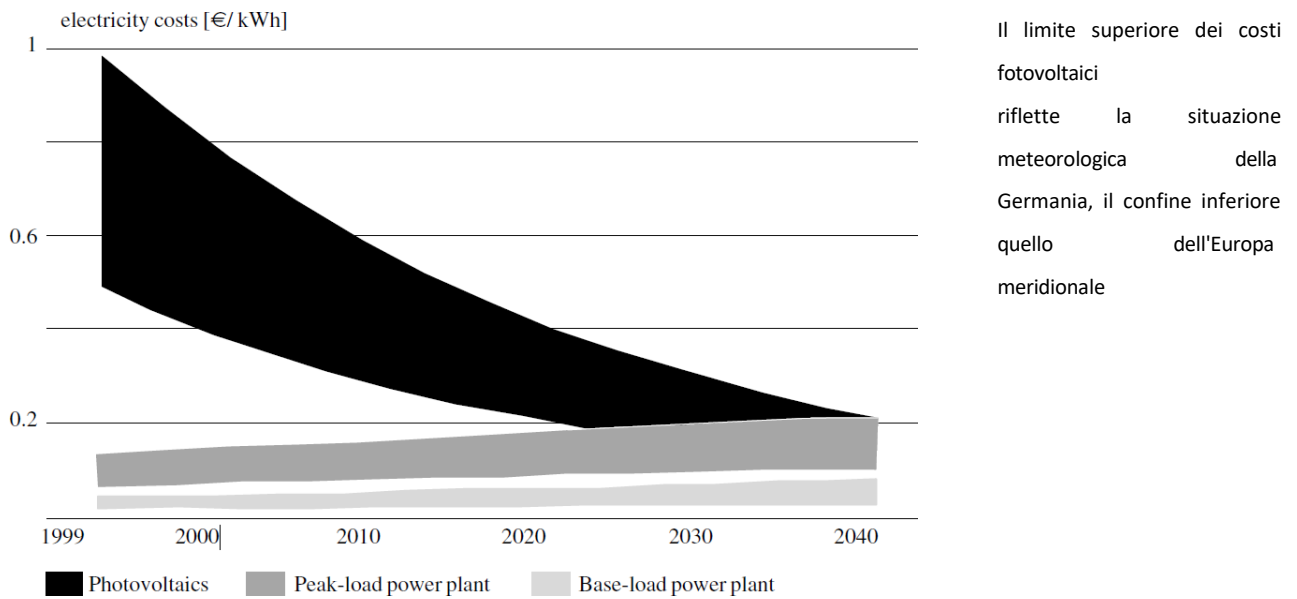
Curva di prezzo-esperienza del mercato fotovoltaico fino al 2000. Scala: doppio logaritmico.

La pendenza della curva è caratterizzata da un fattore $f = 0,8$. Questo significa che un raddoppio della spedizione fotovoltaica ha comportato una riduzione del prezzo fino all'80%

Teoria di base e suo sviluppo

Uno sviluppo sostenibile deve rispettare alcuni limiti. Rispetto al sistema di approvvigionamento energetico, questi sono principalmente determinati dal problema del riscaldamento globale, CO₂. Un riscaldamento annuo globale di oltre 2°C (rispetto al pre-industrializzato periodo) e un tasso di riscaldamento di 0.2°C per decennio sembra essere il limite massimo che può essere tenuto sotto controllo. Questo obiettivo può essere raggiunto solo se le tecnologie rinnovabili vengono applicate in tutto il mondo in larga scala, energia eolica, delle biomasse e per quanto riguarda l'energia elettrica si tratta dello sviluppo del fotovoltaico. Con rispetto di questi parametri bisogna valutare due sotto-problemi: il primo quanto velocemente può l'industria produrre i necessari sistemi di conversione dell'energia fotovoltaica su vasta area e secondo se è possibile stabilire un forte meccanismo di guida del mercato che duri nel tempo e conforme alle idee di oggi di un mercato competitivo. Negli ultimi anni, i tassi di crescita del mercato annuale, e quindi l'aumento della produzione fotovoltaica industriale, è stata dell'ordine del 15-30%. Uno dei principali motivi di questa crescita impressionante sono gli investimenti che i diversi governi e i consumatori fanno per migliorare questa tecnologia, in quanto vedono e sentono la necessità di trasformare l'energia attraverso tecniche sostenibili per l'ambiente. Per facilitare questa crescita, sono stati sviluppati dei meccanismi di supporto finanziario, il quale è giustificato dall'elevato potenziale dell'energia fotovoltaica e dal suo carattere ecologicamente benevolo.

Figura 2.3 Proiezioni dei costi per l'elettricità fotovoltaica.



Si possono trarre molte conclusioni da questo grafico, basato in parte su un insieme di parametri arbitrari. Ad esempio, se uno si prefigge, in modo efficiente, di incentivare la trasformazione di energia elettrica tramite il fotovoltaico, si potrebbe proporre una tassa sull'energia derivanti da fonti non ecologicamente e socialmente benigne, al fine di creare situazioni di mercato competitive. Questa opzione potrebbe essere basata sull'internalizzazione dei costi esterni delle diverse tipologie di approvvigionamento energetico, al fine di consentire un'evoluzione graduale verso la sostenibilità. I ricavati, dopo l'introduzione di questa imposta, verrebbero investiti nella ricerca e sviluppo nel campo delle energie rinnovabili, questo consentirebbe la continuità della riduzione dei costi del fotovoltaico, della domanda lorda di energia e quindi degli oneri finanziari connessi ad essa.

È stato dimostrato, finora, che se è possibile mantenere un'evoluzione di esperienza del prezzo, e se i governi applicassero una tassazione dell'energia, prodotta da fonti non rinnovabili, l'energia ricavata dal fotovoltaico potrebbe diventare economicamente conveniente tra il 2015 (potenza di picco) e il 2030 (potenza di rete); questo comporterebbe lo sviluppo di mercati che investirebbero sulle nuove tecnologie nel futuro prossimo.

Una domanda alla quale , però non è ancora stata data risposta, è “quanto contribuirà il fotovoltaico alla generazione di energia globale?”

A partire dal livello attuale ci vorranno almeno tre o quattro decenni per far sì che il fotovoltaico contribuisca in modo sostanziale alla domanda globale di energia; dopo questo periodo iniziale, esso potrebbe diventare un fornitore principale di energia elettrica. Un tasso di crescita pari al 15% in più all’anno è un fattore di crescita di quattro volte oltre un decennio.

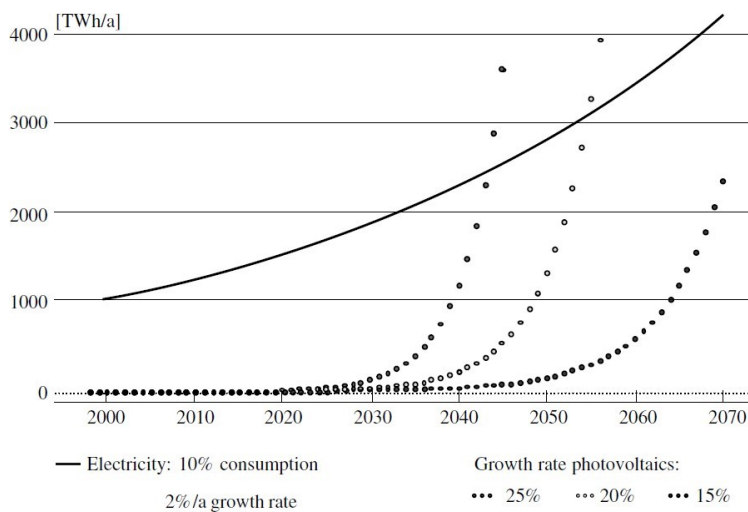


Figura 2.4 Andamento produzione energia per mezzo del fotovoltaico.

Scenari di produzione globale di elettricità fotovoltaica sotto l'assunzione costante di tassi di crescita del 25% / anno, 20% / anno e 15% / anno. La curva solida rappresenta il 10% della domanda globale di energia elettrica assumendo un tasso di crescita costante del 2% / anno. Una scala lineare è usato per l'asse dell'energia. Quindi, anche se cresce in modo esponenziale, la produzione di energia per mezzo del fotovoltaico non è visibile sulla scala utilizzata fino all'anno 2020

La liberalizzazione del mercato dell'energia ha portato a concetti nuovi e innovativi, soprattutto nel settore elettrico. Uno di questi è la generazione distribuita:

schema - kilowatt a diverse installazioni e il megawatt, che vanno a sostituire l’unità centrale del gigawatt di gamma. I suoi principali vantaggi sono la cogenerazione di calore ed energia dispersa sul posto, si ha una stabilizzazione di elettricità delle reti, soprattutto in quelle a basso voltaggio, i quali consentono riserve distribuite nel caso di problemi di fornitura e situazioni di investimento in parte favorevoli. La generazione di elettricità fotovoltaica è ben adattata allo schema di generazione distribuito. Questo è particolarmente il caso se si considerano condizioni di carico di picco, fortemente correlate alla insolazione solare: unità di raffreddamento e climatizzazione. Inoltre, l'estrema modularità del fotovoltaico risulta essere vantaggiosa per la generazione distribuita di centrali elettriche.

Base tecnologica per la fornitura di energia elettrica, dimensioni e sviluppo del fotovoltaico

Due miliardi di persone in tutto il mondo non hanno accesso all'energia elettrica commerciale. Quando possibile coprono il loro fabbisogno di servizi, basati sull'elettricità, mediante batterie primarie, ricaricabili, quali quelle per auto, o piccoli gruppi elettrogeni alimentati da combustibili fossili. In molti casi questi schemi di offerta sono molto costosi, scomodi, inaffidabili e non sempre ecologicamente sostenibili. Questa mancanza si traduce, per questa parte della popolazione terrestre, come impossibilità di usufruire di servizi basilari alla vita quotidiana, quali acqua pulita e potabile, servizi per la salute, telecomunicazioni, la stessa luce viene a mancare. In conclusione la non possibilità a non usufruire di una stabile fornitura elettrica comporta l'ostacolamento allo sviluppo di molte aree remote e rurali, poiché vengono a mancare quei benefici che essa comporta, come il commercio, l'istruzione e gli affari. Tutto ciò non è accettabile: può comportare una destabilizzazione delle regioni e favorire megalopoli; queste conseguenze non possono essere considerate socialmente sostenibili. Per portare energia elettrica a queste aree vengono presi maggiormente in considerazione sistemi diesel e sistemi fotovoltaici.

Quest'ultimo è maggiormente consigliato:

- Alta affidabilità
- Vita alta
- Bassa manutenzione
- Nessun carburante richiesto
- Estensibilità favorevole (modularità)
- Facile da trasportare (modularità)
- Adatto per condizioni ambientali ostili
- Adatto per l'alimentazione di energia mobile
- Ecologicamente favorevole (senza rifiuti, rumore, trasporti di carburante)

Queste caratteristiche favoriscono la preferenza dello sviluppare il fotovoltaico come mezzo per fornire l'elettricità fuori rete da trasmettere. Lo svantaggio principale è iniziale, in quanto si ha un investimento relativamente elevato per il costo di installazione. D'altro canto, i sistemi diesel producono investimenti iniziali relativamente bassi ma costi alti di gestione, soprattutto a causa del fabbisogno di carburante.

Il fotovoltaico è una soluzione eccellente per la fornitura di energia elettrica a basso consumo nelle aree rurali e nelle aree remote nei paesi in via di sviluppo; esso ha un mercato simile, ma più piccolo anche nei paesi industrializzati. In totale, un terzo della popolazione mondiale odierna potrebbe beneficiare di installazioni

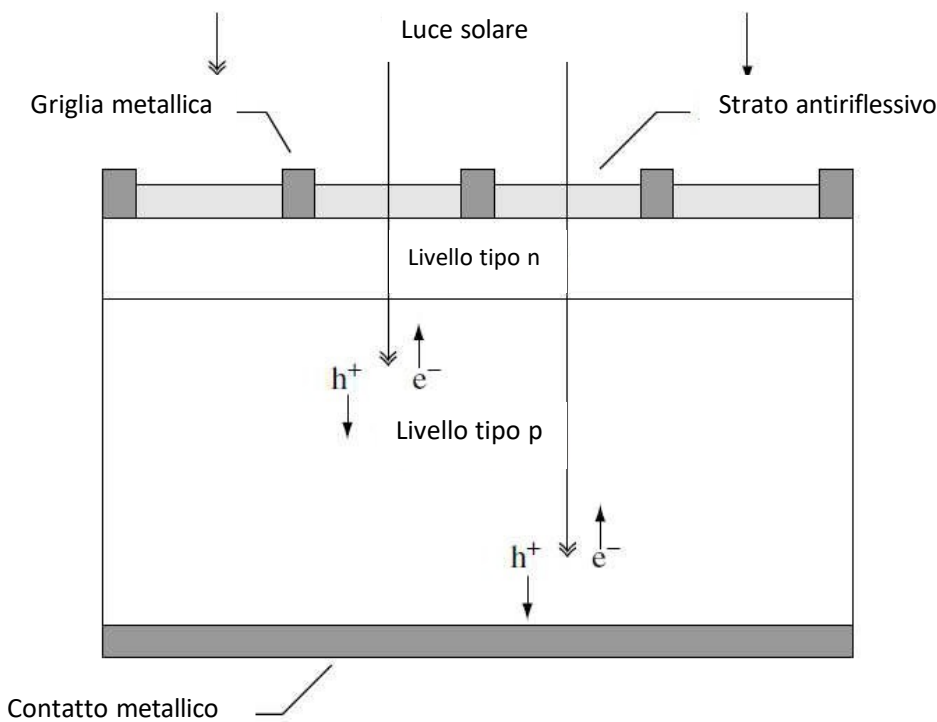
fotovoltaiche off-grid¹³. L'elettronica di sistema e le batterie di stoccaggio devono essere ulteriormente sviluppate per affrontare il mercato in modo ottimale.

¹³ *Fotovoltaico off-grid*: I carichi (dell'abitazione, ma possiamo parlare anche di illuminazione stradale per esempio) possono essere alimentati sia in corrente alternata che in continua. Il sistema a isola immagazzina l'energia solare, prodotta dai moduli fotovoltaici, nella batteria e la utilizza all'occorrenza di sera, di notte o in condizioni meteo avverse. Così facendo, è possibile disporre di energia elettrica anche dove non arriva la rete pubblica, utilizzando all'evenienza un generatore come backup oppure abbinando il nostro impianto ad altre fonti di energia rinnovabile. Gli esempi di applicazione classici sono appunto il lampione stradale, la baita in montagna, il camper o l'imbarcazione, sistemi di pompaggio dell'acqua.

3. Spiegazione della cella solare

Le celle solari a semiconduttore sono dispositivi fondamentalmente semplici. Essi hanno la capacità di assorbire la luce e di fornire una parte dell'energia dei fotoni assorbiti ai portatori di corrente elettrica, elettroni e fori. Un diodo¹⁴ a semiconduzione separa e raccoglie la corrente elettrica che si genera in una direzione preferenziale. La cella solare è quindi un diodo che è stato progettato e costruito per assorbire e convertire efficientemente l'energia della luce del sole in energia elettrica.

Figura 3.1 Schema cella fotovoltaica



Uno schema di una semplice cella solare convenzionale. Creazione di coppie elettrone-lacuna¹⁵, e^- e h^+ .

¹⁴ *Diodo*: Tubo elettronico a due elettrodi impiegato o come raddrizzatore o come rivelatore, spec. nelle telecomunicazioni;estens., elemento semiconduttore costituito essenzialmente da un cristallo (germanio, silicio) o da uno strato (detto di sbarramento) di particolare sostanza (ossido di rame, selenio), impiegato per gli stessi scopi.

¹⁵ *Coppia elettrone-lacuna*: quando un elettrone passa dalla banda di valenza a quella di conduzione si forma una coppia Elettrone-lacuna (generazione)

La luce del sole è incidente dalla parte superiore sulla parte anteriore della cella. Si forma una griglia metallica, la quale è uno dei contatti elettrici del diodo, e consente di cadere sul semiconduttore tra le linee della griglia, e quindi di essere convertita in energia elettrica. Lo strato antiriflesso tra le linee della griglia aumenta la quantità della luce di essere trasmessa ai semiconduttori. Il diodo a semiconduttore è formato da un semiconduttore di tipo n e di un semiconduttore di tipo p, i quali vengono uniti per formare una giunzione metallurgica. Questo è tipicamente raggiunto attraverso la diffusione o l'impianto di specifiche impurità (droganti) o tramite un processo di deposizione. L'altro contatto elettrico del diodo è costituito da uno strato metallico sul retro della cella solare.

Tutte le radiazioni elettromagnetiche, inclusa la luce solare, sono composte da particelle chiamate fotoni, che trasportano quantità specifiche di energia. I fotoni mostrano anche un carattere ondulato, lunghezza d'onda λ , che è in relazione con l'energia del fotone E_λ :

$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda}$$

E_λ = Energia del fotone
 h = costante di Plank
 c = velocità della luce
 λ = lunghezza d'onda

Solo i fotoni con energia sufficiente a creare una coppia di elettroni-fori, cioè quelli con energia maggiore della fessura della banda dei semiconduttori (E_G), contribuirà al processo di conversione dell'energia. In conclusione la natura spettrale della luce solare è una considerazione importante nella progettazione di celle solari efficienti. La grande distanza della Terra dal sole comporta che quei fotoni emessi direttamente nella direzione della Terra contribuiscono allo spettro solare; pertanto, per scopi pratici, la luce che cade sulla Terra può essere pensata come flussi paralleli di fotoni.

Appena sopra l'atmosfera terrestre, l'intensità della radiazione, o Solar Constant, è circa , 1.335 kW/m² e la distribuzione spettrale è indicata come uno spettro di radiazioni air mass zero (AM0); questa è una misura di come l'assorbimento nell'atmosfera influisca sul contenuto spettrale e sull'intensità del raggiungimento della radiazione solare sulla superficie della Terra.

$$\text{Air Mass} = \frac{1}{\cos \theta}$$

θ = angolo di incidenza, è pari a 0 quando il sole è direttamente sopra la testa.

Il contenuto spettrale della luce solare, sulla superficie terrestre, ha una componente indiretta, diffusa a causa di dispersione e riflessione nell'atmosfera e nel paesaggio circostante, e può rappresentare fino ad un 20% in più incidente sulla cella solare.

Proprietà fondamentali dei semiconduttori

Per la fabbricazione delle celle fotovoltaiche vengono impiegati vari materiali, il più usato è il silicio (Si), cristallino, policristallino ed amorfo; altri materiali sono GaAs, GaInP, Cu. La tipologia di materiale, con il quale esse vengono costruite, influisce sulle caratteristiche di assorbimento che esse riescono ad offrire ed incide anche nel costo di fabbricazione.

La maggior parte delle celle sono in silicio, questo è dovuto alle sue caratteristiche di assorbimento, in quanto sono abbastanza buone per lo spettro solare, e la tecnologia di fabbricazione di questo materiale è ben sviluppata poiché è un materiale molto usato anche nel campo dell'industria elettronica.

I semiconduttori di grado elettronico sono materiali cristallini molto puri; la loro natura cristallina indica che i loro atomi sono allineati in una matrice periodica regolare, tra questi anche il suddetto silicio. Questa periodicità, accoppiata con le proprietà atomiche degli elementi componenti, è ciò che dà ai semiconduttori le loro proprietà elettriche.

Tabella3.1 Periodicità degli elementi

I	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	O
		Al	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te

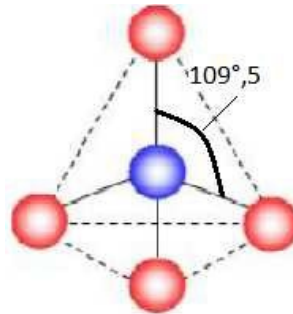
Il Silicio è nella colonna IV, cioè ha quattro elettroni di valenza, ovvero quattro elettroni che possono essere condivisi con atomi vicini per formare legami covalenti¹⁶ con quelli vicini. Nel silicio cristallino gli atomi sono disposti in un reticolo diamantato, con legame tetraedrico, dove l'angolo tra due qualsiasi legami è di 109°,5.

¹⁶ *Legame Covalente:* In chimica, è un legame chimico in cui due atomi mettono in comune delle coppie di elettroni. Ciò avviene perché gli atomi tendono al minor dispendio energetico possibile ottenibile con la stabilità della loro configurazione elettronica (ad esempio l'ottetto).

Figura 3.2 Configurazione elettronica Silicio (Si)



Figura 3.3 Reticolo cristallino Silicio



Un altro aspetto da valutare, per la fisica delle celle, è come la struttura del periodo cristallino del semiconduttore stabilisce le sue proprietà elettriche. Un elettrone in movimento in un materiale semiconduttore è analogo ad una particella confinata in una scatola tridimensionale, la quale ha una complessa struttura interna dovuta ai campi potenziali, quello del nucleo dell'atomo e quelli degli atomi che sono strettamente legati ad esso.

Il comportamento dinamico dell'elettrone può essere stabilito dalla funzione d'onda elettronica Ψ , che si ottiene risolvendo l'equazione di Schödinger:

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

m = massa dell'elettrone

\hbar = costante di Planck¹⁷ ridotta

E = energia dell'elettrone

$U(r)$ = energia potenziale periodica all'interno del semiconduttore

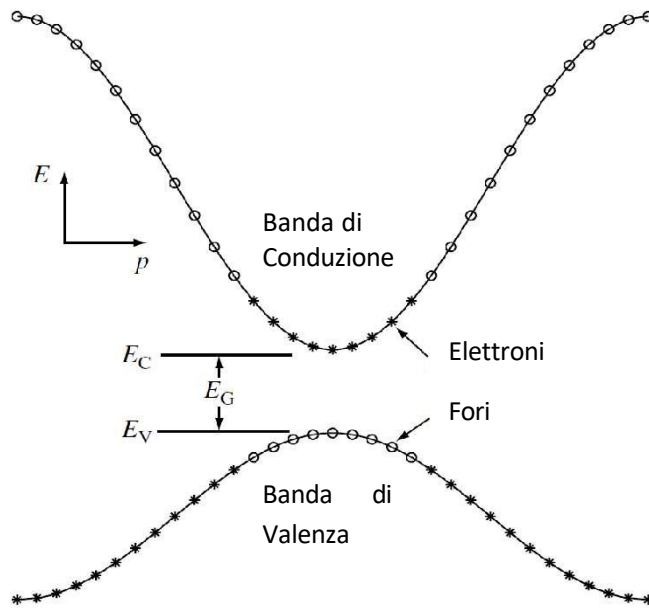
La soluzione dell'equazione definisce la struttura della banda, le energie degli elettroni consentite e la relazione tra energia e il momento dell'elettrone, del semiconduttore. Inoltre, da questa soluzione, si evince che il moto quantico dell'elettrone all'interno del cristallo è, con buona approssimazione, come quello di un elettrone nello spazio libero, se al posto della massa m dell'elettrone, si sostituisce una massa m^* , massa efficace, nella legge di Newton della meccanica classica:

¹⁷ Costante di Planck: è anche detta quanto d'azione e indicata con h , è una costante fisica che rappresenta l'azione minima possibile, o elementare. Essa determina che l'energia e le grandezze fisiche fondamentali ad essa legate non evolvano in modo continuo, ma siano quantizzate, ovvero possano assumere solo valori multipli di tale costante. La costante di Planck ha le dimensioni di un'energia per un tempo e nel sistema di unità di misura delle unità atomiche compone l'unità di misura del momento angolare. Essa permette la quantizzazione di grandezze come l'energia, la quantità di moto e il momento angolare, e la sua scoperta ha avuto un ruolo determinante per la nascita e la successiva evoluzione della meccanica quantistica.

$$F = m^* a$$

F= Forza applicata
a= Accelerazione dell'elettrone

Figura 3.4 Diagramma a banda di energia semplificato a $T > 0$, Semiconduttore a banda diretta (E_G)



Gli elettroni vicini ai massimi della banda di valenza sono stati eccitati termicamente verso gli stati vuoti, vicini ai minimi della banda di conduzione, lasciando i buchi. Gli elettroni eccitati e i fori rimanenti sono le cariche mobili negative e positive che conferiscono ai semiconduttori le loro proprietà di trasporto uniche.

Si noti che la massa efficace non è costante all'interno di ciascuna banda. Inoltre, vicino a la cima della banda di valenza, la massa efficace è effettivamente negativa. Gli

elettroni (*) riempiono gli stati dal basso verso l'alto e gli stati vicini alla cima della banda di valenza sono vuoti, questo è dovuto al fatto che alcuni elettroni che sono eccitati termicamente nella banda di conduzione. Questi stati vuoti possono convenientemente essere considerati portatori di carica positiva di corrente, i quali vengono denominati fori con una massa efficace positiva.

La parte superiore della banda di valenza e il fondo della banda di conduzione ha una forma parabolica e quindi la massa effettiva dell'elettrone m_n^* , vicino al fondo della banda di conduzione è costante, così come la massa efficace del foro m_p^* , vicino alla cima della banda di valenza. Questa è un'ipotesi molto pratica che semplifica enormemente l'analisi dei semiconduttori.

La dinamica del movimento degli elettroni in un semiconduttore è stata approssimata da una particella caricata negativamente con massa m_n^* , nella banda di conduzione, e positivamente con massa m_p^* , nella banda di valenza, le quali hanno le rispettive densità di stato¹⁸.

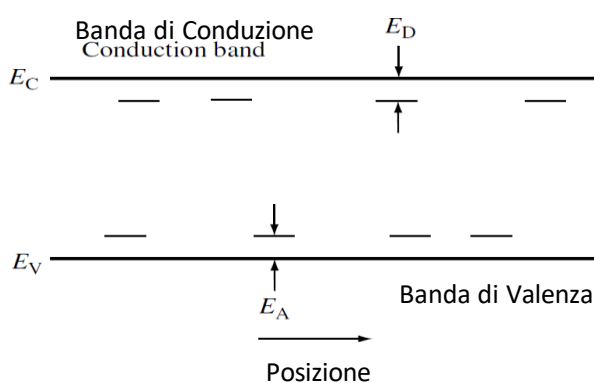
Il numero di elettroni e fori nelle rispettive bande, e quindi la conduttività del semiconduttore, può essere controllata attraverso l'introduzione di specifiche impurità, o droganti, chiamati donatori o accettori.

Ad esempio, se il silicio viene drogato con il fosforo, un elettrone è donato alla banda di conduzione per ogni atomo di fosforo che viene introdotto. Questo è dovuto al fatto che il fosforo ha cinque elettroni liberi, quelli di valenza, dei quali quattro di questi vengono usati per formare legami covalenti con il silicio, che ne ha quattro, e il quinto è disponibile per riempire uno stato vuoto nella banda di conduzione.

Tutte le impurità introducono ulteriori stati elettronici localizzati, spesso all'interno della banda proibita tra E_C ed E_V , come illustrato in *figura 3.5*. Se l'energia dello stato, E_D , introdotta da un atomo donatore è sufficientemente vicina alla fascia di conduzione, entro pochi kT , sarà sufficiente dell'energia termica per consentire all'elettrone in più di occupare uno stato nella banda di conduzione, lo stato del donatore sarà quindi caricato positivamente, ionizzato.

Allo stesso modo, un atomo accettore introdurrà uno stato di carica negativa, ionizzato, all'energia E_A . L'introduzione controllata di un donatore e di un accettore di impurità, in un semiconduttore, consente la creazione del tipo n, gli elettroni sono la fonte primaria di conduzione elettrica, e il tipo p, i fori sono la fonte primaria di semiconduttori elettrici. Questa è la base per la costruzione di tutti i dispositivi a semiconduzione, incluse le celle.

Figura 3.5 Livelli di donatore e accettore in un semiconduttore.



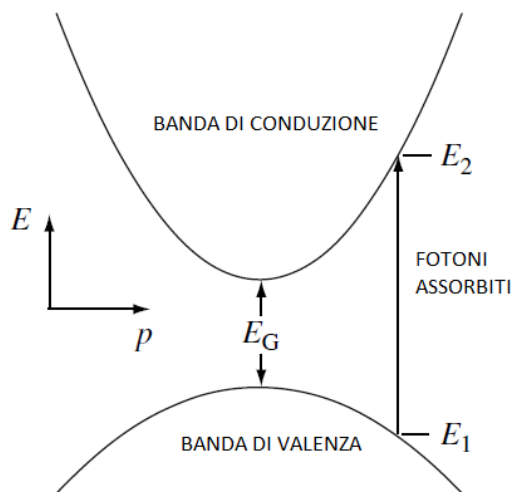
La distribuzione spaziale non uniforme di questi stati rafforza il concetto che questi sono stati localizzati

¹⁸ *Densità di stato*: In meccanica quantistica, un sistema non può assumere energie arbitrarie, ma è invece vincolato ad occupare dei livelli energetici discreti. A ciascun livello possono corrispondere uno o più stati quantistici. In questo contesto, la densità degli stati è una distribuzione usata in fisica statistica e dello stato solido per indicare quanti stati siano potenzialmente disponibili ad un dato sistema quantistico ad una data energia.

La creazione di coppie elettrone-lacune, attraverso l'assorbimento della luce solare, è fondamentale per il funzionamento delle celle solari. L'eccitazione di un elettrone direttamente dalla banda di valenza, che lascia un buco dietro, alla banda di conduzione si chiama assorbimento fondamentale.

Sia l'energia totale che la quantità di moto di tutte le particelle coinvolte nel processo di assorbimento devono essere conservate. Dal momento che la quantità di moto del fotone, $p\lambda = h/\lambda$, è molto piccola rispetto a la gamma del momento cristallino, $p=h/l$, il processo di assorbimento del fotone deve, per scopi pratici, conservare la quantità di moto dell'elettrone¹⁹. Il coefficiente di assorbimento per una data energia fotonica, $h\nu$, è proporzionale alla probabilità, P_{12} , della transizione di un elettrone dallo stato iniziale E_1 allo stato finale E_2 , la densità degli elettroni nel stato iniziale, $g_V(E_1)$ e la densità degli stati finali disponibili, ed è quindi sommato su tutte le possibili transizioni tra stati dove si assume che tutti gli stati della banda di valenza siano pieni e tutti gli stati della banda di conduzione siano vuoti. L'assorbimento si traduce nella creazione di una coppia elettrone-lacuna, poiché un elettrone libero lo è quando viene eccitato dalla banda di conduzione e lascia un buco libero nella banda di valenza.

Figura 3.6 Assorbimento di fotoni in un semiconduttore a band gap diretto per un fotone incidente con energia $h\nu = E_2 - E_1 > E_G$



¹⁹ *Quantità di moto del fotone:* La lunghezza d'onda della luce solare, λ , è dell'ordine di un micron (10^{-4} cm), mentre la costante del reticolo è di pochi Angstrom (10^{-8} cm). Quindi, il momento di cristallo è di diversi ordini di grandezza più grande del fotone impulso.

Nozioni fondamentali sulle Celle Solari

Quando un semiconduttore torna all'equilibrio termico, ad esempio mediante illuminazione e/o iniezione di corrente, la concentrazione di elettroni (n) e di fori (p) tendono a formare un nuovo equilibrio attraverso un processo chiamato di "ricombinazione", in cui un elettrone, una volta eccitato, cade dalla banda di conduzione alla banda di valenza, eliminando così un foro dalla banda di valenza. Ci sono diversi meccanismi di ricombinazione importanti per le operazioni delle celle solari, quali: ricombinazione attraverso trappole (difetti) nel gap proibito, ricombinazione radiativa (da banda a banda) e ricombinazione Auger.

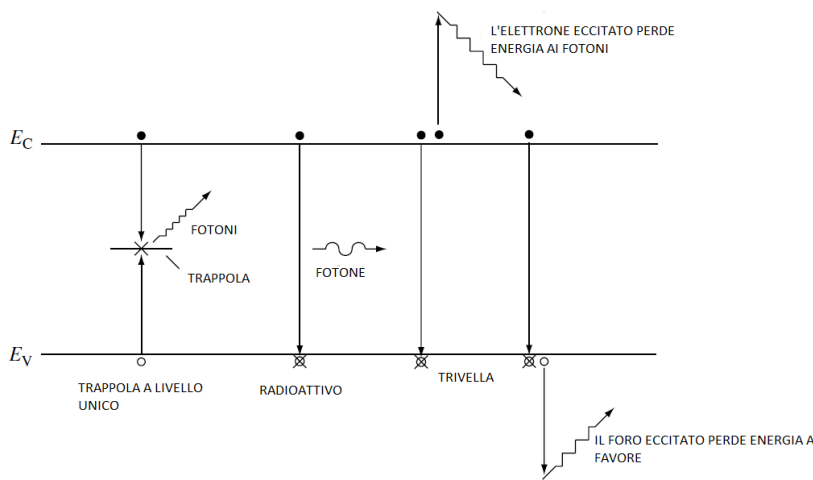


Figura 3.7 Sono illustrate le varie tipologie di ricombinazione che si possono avere. Da destra a sinistra, la ricombinazione SRH, quella a radiazione luminosa e quella di Auger

La sezione trasversale di cattura può essere pensata come la dimensione di un bersaglio su cui viaggia un vettore attraverso il semiconduttore con una certa velocità. Una vita breve, del viaggiatore, corrisponde ad elevato tasso di ricombinazione. Se la trappola presenta un grande bersaglio per il vettore, il tasso di ricombinazione sarà alto. Se la velocità, con cui viaggia il vettore, è elevata, ha più opportunità entro un dato periodo di tempo di incontrare una trappola e quindi la sua vita è bassa. Più trappole sono presenti più il tasso di ricombinazione è elevato e quindi sarà meno lunga la vita del portatore che viaggia.

Se il materiale è di tipo p ($p \approx p_0 \gg n_0$), a bassa iniezione ($n_0 \leq n \ll p_0$) e l'energia della trappola è vicina al centro del gap proibito ($E_T \approx E_i$), il tasso di ricombinazione può essere scritto come:

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

τ_{SLT} : tempo di vita del portatore
 n: numero di elettroni quando il materiale è sottoposto alla luce
 n_0 : numero elettroni all'equilibrio termico.

La sigla SLT sta per "Single Level Trap" in quanto possono esserci più livelli di trappole.

Il tasso di ricombinazione dipende esclusivamente dalla compagnia di minoranza, anche chiamata vettore limitante; infatti questo è dovuto al fatto che ci sono molti meno vettori minoranti rispetto ai portatori di maggioranza, e per la ricombinazione sono necessari entrambi. Se prevalgono condizioni di iniezione elevata ($p \approx n \gg p_0, n_0$). In questo caso, la vita utile di ricombinazione effettiva è la somma delle due durate della portante.

Mentre il tasso di ricombinazione è alto a causa del gran numero di buchi ed elettroni in eccesso, il tempo di vita del vettore è effettivamente più lungo rispetto al caso di bassa iniezione. Questo può essere di significato nella regione di base delle celle solari, in particolare le celle dei concentratori (celle solari illuminate con luce solare concentrata), poiché la base è lo strato meno drogato.

Trasporto di vettori

Come già stabilito, elettroni e buchi si comportano, in un semiconduttore, come una particella libera della stessa carica m^*_n e m^*_p . Pertanto sono soggetti ai classici processi di deriva e di diffusione. Deriva è la risposta di una particella carica a un campo elettrico applicato. Quando il campo elettrico è applicato in un semiconduttore uniformemente drogato, le bande si piegano verso l'alto, nella direzione del campo elettrico applicato. Gli elettroni caricati negativamente nella banda di conduzione, si muovono nella direzione opposta del campo applicato e i buchi presenti nella banda di valenza, caricati positivamente, si muovono nella stessa direzione del campo; in conclusione gli elettroni affondano e i buchi galleggiano.

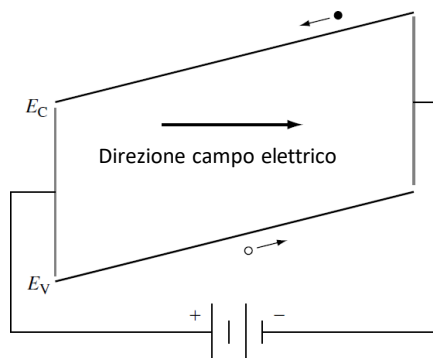


Figura 3.8 Illustrazione del concetto di deriva in un semiconduttore. Nota che elettroni e buchi muoversi in direzioni opposte. Il campo elettrico può essere creato dal potenziale integrato interno della giunzione o di una tensione di polarizzazione applicata esternamente.

Equazione dei semiconduttori

Il funzionamento della maggior parte dei dispositivi a semiconduttore, comprese le celle solari, può essere descritto dalle cosiddette equazioni del dispositivo a semiconduttore, la prima è stata derivata da Van Roosbroeck nel 1950.

Una forma generalizzata di queste equazioni è riportata qui sotto:

$$\nabla \cdot \varepsilon \vec{E} = q(p - n + N) \quad \text{Questa equazione è una delle forme nella quale si può scrivere l'equazione di Poisson.}$$

N: carica dovuta ad agenti droganti e da altre impurità ionizzate. E: permeabilità elettrica del semiconduttore.

Dall'equazione $\nabla \vec{J} + q \frac{d\rho}{dt} = 0$ posso ricavare le equazioni di continuità foro-elettrone sono:

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = q \left(G - R_p - \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad \nabla \cdot \vec{J}_n = q \left(R_n - G + \frac{\partial n}{\partial t} \right)$$

G: velocità di generazione di coppie di elettrone lacuna dovuta alla luce solare

R: velocità di ricombinazione, dove è inclusa anche la generazione termica di coppie.

ρ : densità di carica.

In un semiconduttore uniformemente drogato, la banda proibita e la permittività elettrica sono indipendenti dalla posizione. Dal momento che il doping è uniforme, la mobilità e la diffusione del vettore, anche i loro coefficienti sono indipendenti dalla posizione.

Le equazioni dei semiconduttori si riducono a:

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

$$q\mu_p \frac{d}{dx} (p\vec{E}) - qD_p \frac{d^2 p}{dx^2} = q(G - R) \quad \text{Equazione di continuità delle lacune}$$

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

Nelle regioni sufficientemente distanti dalla giunzione p-n, della cella solare (regioni quasi neutre), il campo elettrico è molto piccolo. Quando si considera il portatore minoritario²⁰, buchi tipo n del materiale ed elettroni tipo p nel materiale, ed iniezione di basso livello $\Delta p = \Delta n \ll N_D, N_A$, la corrente di deriva può essere trascurata rispetto a quella di diffusione. Con regioni a basse iniezione si possono scrivere le seguenti espressioni:

$$R = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = \frac{\Delta n_p}{\tau_n} \quad \text{per le regioni di tipo p}$$

$$R = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = \frac{\Delta p_n}{\tau_p} \quad \text{per le regioni di tipo n}$$

Δn_p : concentrazione degli elettroni, portatori minoritari, in eccesso in una zona quasi neutra di tipo P

Δp_n : concentrazione delle lacune, portatori minoritari, in eccesso in una zona quasi neutra di tipo N.

Se la corrente di deriva può essere ignorata si può scrivere

$$\frac{d}{dx} (\vec{J}_p^{\text{drift}} + \vec{J}_p^{\text{diff}}) \approx -q D_p \frac{d^2 p}{dx^2} = q(G - R) \quad \text{da cui si rivano le equazioni:}$$

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

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

Quest'ultime due equazioni sono le equazioni di diffusione dei portatori minoritari. Sono importanti, in quanto vengono utilizzate per analizzare l'operazione dei dispositivi a semiconduttore, comprese le celle solari.

$$R_{\text{SLT}} \approx \frac{n}{\tau_{\text{SLT},p} + \tau_{\text{SLT},n}} \approx \frac{p}{\tau_{\text{SLT},p} + \tau_{\text{SLT},n}}$$

²⁰ *Portatore minoritario*: Portatori di carica maggioritari e minoritari nei semiconduttori. Nei semiconduttori, la carica elettrica è trasportata da elettroni e lacune. I portatori di carica più abbondanti si dicono maggioritari; essi sono gli elettroni nei semiconduttori a drogaggio di tipo n, e le lacune in quelli a drogaggio di tipo p.

Elettrostatica della giunzione pn

Quando un semiconduttore di tipo n viene a contatto con un semiconduttore di tipo p si forma una giunzione. Nell'equilibrio termico non esiste un flusso di corrente netto, il quale deve essere indipendente dalla posizione. Tra i due tipi di semiconduttori è presente una differenza di concentrazione di fori ed elettroni, i quali appena uniti tra di loro, tramite giunzione, genereranno una corrente di diffusione: i fori sono presenti nel materiale tipo p e si diffondono nella regione di tipo n, mentre gli elettroni presenti nel materiale tipo n si diffondono nella regione di tipo p. Quando i vettori si diffondono, le impurità caricate (accettori ionizzati di tipo p e donatori ionizzati nel materiale tipo n) diventano scoperte, cioè lasciano dietro di sé degli ioni negativi degli atomi accettori, mentre gli elettroni lasceranno degli ioni positivi donatori nella regione n. Viene così a crearsi un campo elettrico o differenza di potenziale elettrostatico che limita la diffusione dei fori e degli elettroni, in cui non è presente un flusso di corrente netto. La regione di transizione tra i semiconduttori di tipo n e di tipo p viene chiamata "area di carica spaziale" o "regione di esaurimento", poiché effettivamente svuotata sia da elettroni che da lacune. La differenza di potenziale elettrostatico derivante dalla giunzione è chiamato "tensione integrata", V_{bi} (built in voltage): nasce dal campo elettrico creato dall'esposizione della carica spaziale positiva e negativa nella regione di esaurimento.

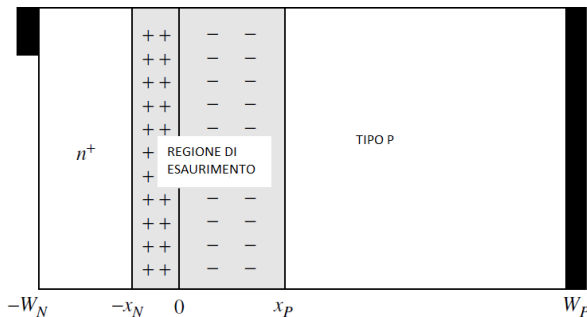


Figura 3.9 Giunzione pn: struttura che illustra il funzionamento di una cella solare: la regione di svuotamento, priva di portatori, è compresa tra $-x_N$ e x_P .

L'elettrostatica di questa situazione, del diodo formato da un singolo accettore ed un singolo donatore, è data dall'equazione di Poisson:

$$\nabla^2 \phi = \frac{q}{\epsilon} (n_o - p_o + N_A^- - N_D^+)$$

ϕ : potenziale elettrico

q: grandezza carica dell'elettrone

ϵ : permittività elettrica del semiconduttore

p_0 : concentrazione del buco di equilibrio

N_A^- : concentrazione dell'accettore ionizzato

N_D^+ : concentrazione di donatori ionizzati.

Questa equazione è facilmente risolvibile numericamente. La [figura 3.9](#) mostra una giunzione monodimensionale (1D) della cella solare, diodo, con la giunzione metallurgica a $x=0$, la quale è uniformemente drogata N_D sul lato tipo n e N_A sul lato di tipo p. all'interno della regione di esaurimento, $-x_N < x < x_P$, si può supporre che p_0 e n_0 siano entrambe trascurabili rispetto a $|N_A - N_D|$ in modo tale che l'equazione, scritta pocanzi, possa essere semplificata a

$$\nabla^2 \phi = -\frac{q}{\epsilon} N_D, \quad \text{for } -x_N < x < 0$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{q}{\epsilon} N_A, \quad \text{for } 0 < x < x_P$$

Al di fuori della regione di svuotamento, si assume la neutralità della carica

$\nabla^2 \phi = 0$ for $x \leq -x_N$ and $x \geq x_P$ Questo è indicato come approssimazione di esaurimento. Le regioni su entrambi i lati delle regioni di esaurimento sono regioni quasi neutre.

La differenza di potenziale elettrostatico attraverso la giunzione è la tensione integrata, V_{bi} e può essere ottenuto da, $\phi(x) - \phi(x_P) = \int E dx$ ovvero $E = -\nabla \phi$

Risolvendo quest'ultime equazioni e ponendo $\phi(x_P) = 0$ si ottiene:

$$\phi(x) = \begin{cases} V_{bi}, & x \leq -x_N \\ V_{bi} - \frac{q N_D}{2\epsilon} (x + x_N)^2, & -x_N < x \leq 0 \\ \frac{q N_A}{2\epsilon} (x - x_P)^2, & 0 \leq x < x_P \\ 0, & x \geq x_P \end{cases}$$

Il potenziale elettrostatico deve essere continuo in $x=0$, $V_{bi} - \frac{q N_D}{2\epsilon} x_N^2 = \frac{q N_A}{2\epsilon} x_P^2$

per cui si pone $x_N N_D = x_P N_A$, che dimostra che la carica totale in entrambi i lati della regione di svuotamento si bilancia esattamente l'un con l'altro e che detta regione si estende nella parte più lontana del lato più leggermente drogato.

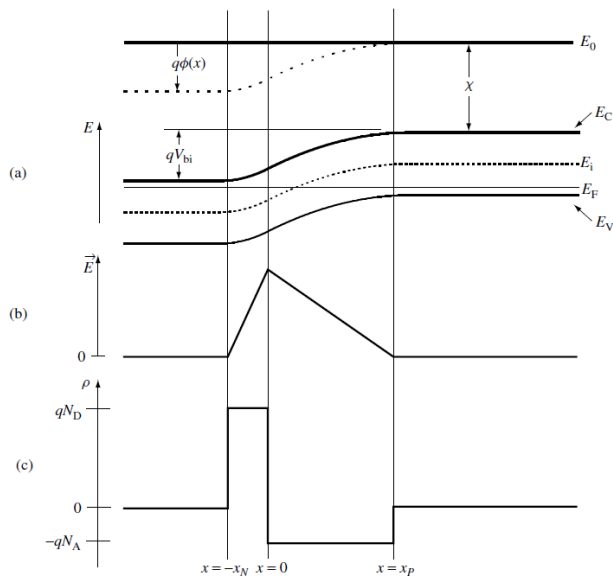
Da queste ultime si ricava la larghezza della regione di svuotamento W_D

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

In condizioni di non equilibrio se viene applicato un potenziale V alla giunzione si ottiene W_D :

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

Figura 3.10 Condizioni di equilibrio di una cella solare:



- a. bande di energia
- b. campo elettrico
- c. densità di carica

X : affinità elettronica, ovvero l'energia necessaria per strappare un elettrone dalla banda di conduzione
 E_0 : energia alla quale un elettrone è completamente libero da tutte le forze esterne.

La struttura basilare della cella solare è riportata in *figura 3.9*.

È semplicemente un diodo a giunzione pn costituito da due regioni quasi neutre su entrambi i lati di una regione di esaurimento, con un contatto elettrico fatto su ciascuna regione quasi neutrale, la zona di svuotamento. La regione più pesantemente drogata, tipo n, è chiamata "emettitore", e la regione più leggermente drogata è chiamata "base", tipo p. Quest'ultima è indicata come "regione di assorbimento", la quale solitamente è molto sottile e assorbe la maggior parte della luce solare. Vi è una forte asimmetria tra queste due regioni, questo è dovuto al fatto che gli elettroni eccitati nella zona p siano raccolti dal campo elettrico e portati nella zona di tipo n.

Fondamentali della cella solare

La caratteristica di base della tensione di corrente della cella solare può essere derivata risolvendo il problema dell'equazione di diffusione di minoranza portante con appropriate condizioni al contorno, ovvero è possibile ricavare la funzione caratteristica delle celle solari che legghi la corrente e la tensione dalle equazioni di diffusione dei portatori minoritari.

Condizioni al contorno delle celle solari

A $x=-W_N$, la solita ipotesi che si possa fare è quella in cui si considera il contatto ohmico²¹ ideale, ovvero:

$$\Delta p(-W_N) = 0 \quad \text{questo implica il fatto che nessun elettrone riesca a ricombinarsi.}$$

Tuttavia, poiché il contatto frontale è di solito una griglia di metallo che entra in contatto con un semiconduttore, la velocità di ricombinazione comporta un brusco cambiamento dal reticolo cristallino del contatto ohmico e una modellazione allo strato anti-riflessione, nelle celle solari al silicio SiO_2 .

In questo caso la condizione al contorno di $x=-W_N$ è:

$$\frac{d\Delta p}{dx} = \frac{S_{F,\text{eff}}}{D_p} \Delta p(-W_N) \quad S_{F,\text{eff}}: \text{effettiva velocità di ricombinazione della superficie frontale, la quale dipende da vari parametri, tra cui la polarizzazione delle celle.}$$

$S_{F,\text{eff}} \rightarrow \infty, Llp \rightarrow 0$, si ritorna alla condizione al contorno in cui si ha un contatto ideale ohmico.

Il contatto ohmico posteriore, $x=W_P$ potrebbe essere trattato come un contatto ohmico ideale,

$\Delta n(W_P) = 0$. Tuttavia, le celle solari sono spesso fabbricate con un campo di superficie posteriore, Back Surface Field (BSF), una regione sottile pesantemente drogata nella parte posteriore della regione di base, la quale conserva i vettori di minoranza lontano dal contatto ohmico sul retro ed aumenta le loro possibilità di essere raccolti e possono essere modellati con una velocità di ricombinazione superficiale efficace e relativamente bassa.

$$\left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=W_P} = -\frac{S_{\text{BSF}}}{D_n} \Delta n(W_P) \quad S_{\text{BSF}}: \text{velocità di ricombinazione superficiale effettiva del BSF.}$$

Ciò che ora rimane da determinare sono le condizioni di confine $x=-x_N$ e $x=x_P$. Queste condizioni al contorno vengono indicate come "legge della giunzione".

²¹ *Contatto ohmico*: Nella fisica dello stato solido, una giunzione metallo-semiconduttore è una tipologia di giunzione nella quale un metallo viene messo in contatto con un materiale semiconduttore. Una giunzione M-S non rettificante viene chiamata contatto ohmico; si ricorda che una giunzione rettificante semiconduttore-semiconduttore, che è il dispositivo ad oggi più diffuso, è noto come giunzione p-n.

In condizioni di equilibrio, in cui la tensione applicata è pari a zero e non vi è nessuna illuminazione applicata, l'energia di Fermi²² è costante in qualsiasi posizione x .

In condizioni di non equilibrio, nel quale viene applicata una tensione di polarizzazione, è conveniente introdurre il concetto di energie di quasi-Fermi. Questo si verifica quando si ha un disturbo di tipo di equilibrio termico, in cui la popolazione di elettroni nella banda di valenza e della banda di conduzione cambiano. La luce colpendo il materiale semiconduttore promuove degli elettroni nella banda di conduzione, generando delle coppie di elettroni lacuna extra. Poiché il tempo di rilassamento²³ per gli elettroni all'interno della banda di conduzione è molto più basso rispetto al gap di banda, si può considerare che gli elettroni sono in equilibrio termico nella banda di conduzione. Questo discorso vale anche per gli elettroni nella banda di valenza, intesi come fori. Si può così definire un livello quasi Fermi e quasi temperatura a causa dell'equilibrio termico degli elettroni nella banda di conduzione, e quasi il livello di Fermi e quasi la temperatura per la banda di valenza allo stesso modo.

Nonostante tutto esistono sempre due distribuzioni di Fermi, una relativa agli stati occupati nella banda di conduzione e degli elettroni dei donatori, F_c , e una relativa agli stati occupati nella banda di valenza ed agli elettroni dei donatori, che fornisce la densità di lacune nella banda di valenza, F_v .

Supponendo il semiconduttore non danneggiato valgono:

$$p = n_i e^{(E_i - F_p)/kT}$$

E_i : energia di Fermi del semiconduttore intrinseco, molto vicina a metà dell'energia presente nella banda di gap.

$$n = n_i e^{(F_n - E_i)/kT}$$

In condizioni di equilibrio $F_p = F_n = E_f$; sotto le equazioni di non equilibrio, supponendo che le concentrazioni dei vettori di maggioranza nei contatti mantengono i loro valori di equilibrio, la tensione applicata può essere scritta:

$$qV = F_n(x) - F_p(x)$$

Poiché nelle regioni quasi neutri, le concentrazioni di portatori di maggioranza sono costanti per tutta la regione, cioè $p_p (x_p \leq x \leq W_p) = N_A$ e $n_n (-W_n \leq x \leq -x_n) = N_D$, $F_n(-W_n) = F_n(-x_n)$ e $F_p(W_p) = F_p(x_p)$, si può supporre che le energie quasi-Fermi rimangono costanti all'interno della regione di svuotamento, di conseguenza:

²² *Energia di Fermi*: In fisica, in particolare in meccanica quantistica, l'energia di Fermi è l'energia del più alto livello occupato in un sistema di fermioni alla temperatura dello zero assoluto. Il suo nome deriva dal fisico italiano Enrico Fermi. Il termine "energia di Fermi" viene anche usato facendo riferimento al concetto di livello di Fermi, diffuso nella fisica dei semiconduttori. L'energia di Fermi e il potenziale elettrochimico coincidono allo zero assoluto, ma differiscono a temperature maggiori.

²³ *Tempo di rilassamento*: Nelle scienze fisiche, il rilassamento di solito significa il ritorno di un sistema perturbato in equilibrio.

$qV = F_N(-W_N) - F_P(W_P)$ per $-x_N \leq x \leq x_P$, cioè ovunque all'interno della regione di svuotamento.

Quest'ultima equazione, assieme a quelle valenti per un semiconduttore non danneggiato, porta alla legge della giunzione, le condizioni al contorno utilizzate ai margini della regione di svuotamento:

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

Così facendo si è ricavato le equazioni nei vari punti fondamentali della cella, ovvero in $-W_N, -x_N, x_P$ e W_P .

Per l'incidenza della luce solare, nella parte anteriore della cella solare, $x = -W_N$, la velocità di reazione ottica ha come modulo:

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

solo i fotoni con $\lambda \leq hc/E_g$ contribuiscono alla velocità di reazione.

Questo permette di calcolare le equazioni di diffusione dei portatori minoritari, calcolando le concentrazioni delle lacune in eccesso e degli elettroni minoritari.

Le equazioni sono:

- per la regione di tipo n

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

- per la regione di tipo p

$$\Delta n_P(x) = A_P \sinh[(x - x_P)/L_n] + B_P \cosh[(x - x_P)/L_n] + \Delta n'_P(x)$$

$L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$ L_p : lunghezza di diffusione dei portatori minoritari, ricavata dalla formula

Le soluzioni particolari di $G(x)$, $\Delta p'_N(x)$, $\Delta n'_P(x)$ sono date da:

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

$$\Delta n'_P(x) = -(1 - s) \int_{\lambda} \frac{\tau_n}{(L_n^2 \alpha^2 - 1)} [1 - r(\lambda)] f(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha(x+W_N)} d\lambda$$

Usando le condizioni limite è possibile ricavare A_N, B_N, A_P, B_P .

La densità di corrente dei portatori minoritari, nelle regioni quasi neutre, sono solo le diffusioni di corrente, in quanto il campo elettrico è trascurabile.

Utilizzando la convenzione di segno attivo per la corrente, dal momento che la cella solare è generalmente pensata come una batteria si ottiene:

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

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

La corrente totale della cella è data:

la quale è vera ovunque all'interno della cella solare, A è l'area di quest'ultima.

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

Si può ricavare la corrente uscente totale $J_n(-x_N)$, unendola a quella dei portatori minoritari, tramite l'integrazione delle equazioni di continuità degli elettroni.

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

$G(x)$ è facilmente integrabile e l'integrale della velocità di ricombinazione può essere approssimato assumendo il tasso di

ricombinazione costante all'interno della regione di svuotamento; $R(x_m)$ è il massimo tasso di ricombinazione nella regione di svuotamento, in cui x_m è il punto in cui $p_D(x_m) = n_D(x_m)$. Si può così scrivere la corrente uscente totale nel punto $x = -x_N$ come:

$$W_D = x_P + x_N$$

$$\begin{aligned} \vec{J}_n(-x_N) &= \vec{J}_n(x_P) + q \int_{-x_N}^{x_P} G(x) dx - q \int_{-x_N}^{x_P} R_D dx \\ &= \vec{J}_n(x_P) + q(1-s) \int_{\lambda} [1-r(\lambda)] f(\lambda) [e^{-\alpha(W_N-x_N)} - e^{-\alpha(W_N+x_P)}] d\lambda \\ &\quad - q \frac{W_D n_i}{\tau_D} (e^{qV/2kT} - 1) \end{aligned}$$

La corrente totale può essere scritta:

$$I = A \left[J_p(-x_N) + J_n(x_P) + J_D - q \frac{W_D n_i}{\tau_D} (e^{qV/2kT} - 1) \right] \quad \text{dove} \quad J_D = q(1-s) \int_{\lambda} [1-r(\lambda)] f(\lambda) (e^{-\alpha(W_N-x_N)} - e^{-\alpha(W_N+x_P)}) d\lambda$$

J_D è la corrente di generazione della regione di svuotamento ed A è l'area della cella solare. L'ultimo termine dell'equazione di I rappresenta la ricombinazione nella regione di carica spaziale.

Un'espressione generale della corrente prodotta da una cella a energia solare è data:

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

Le correnti di cortocircuito e di saturazione oscura sono date da equazioni piuttosto complesse che dipendono dalla struttura della cella solare, materiale e dalle condizioni operative. Per capire appieno il funzionamento di una cella bisogna esaminare dettagliatamente questi termini citati. Dal punto di vista del circuito, si evince che

questa possa essere modellata da una sorgente di corrente ideale (ISC) in parallelo a due diodi, uno con fattore idealità²⁴ di "1" e l'altro con un'ideale fattore di "2". La direzione della sorgente è opposta al flusso di corrente dei diodi, questo permette di polarizzare in avanti i diodi.

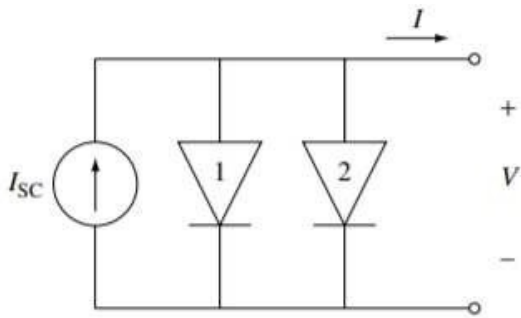


Figura 3.11 Modello di circuito a cella solare.

Diodo 1 rappresenta la corrente di ricombinazione nelle regioni quasi neutre, $\propto eqV/kT$, mentre il diodo 2 rappresenta la ricombinazione nella regione di svuotamento $\propto eqV/2kT$.

Quindi la corrente di corto circuito, quella dovuta solo al contributo dell'energia solare viene vista come un generatore di corrente, una batteria.

Tracciamento della corrente-tensione (I-V) di una tipica cella solare:

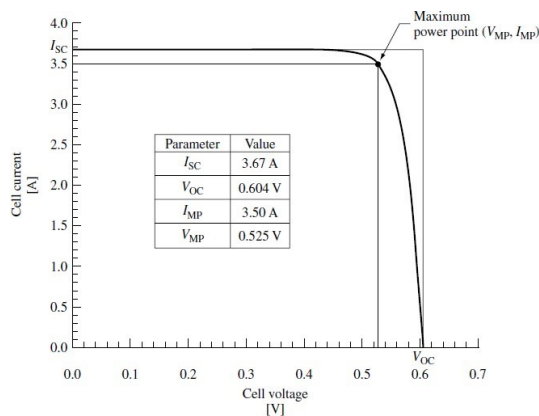


Figura 3.12 Caratteristiche della tensione di corrente della cella solare al silicio

Per semplicità, la corrente oscura quella dovuta alla ricombinazione nella regione di esaurimento del diodo2 è stata ignorata. Nella figura sono riportati i dati più importanti di merito per le celle solari: la corrente di cortocircuito I_{SC} , la tensione a circuito aperto V_{OC} ed il

fattore di riempimento FF (Fill Factor).

Per piccole tensioni applicate, la tensione del diodo è trascurabile e la corrente è solo quella di cortocircuito, I_{SC} . Quando la tensione applicata è sufficientemente alta, in modo che la corrente del diodo (corrente di ricombinazione) diventi significativa, la corrente della cella solare scende rapidamente.

A circuito aperto ($I=0$), tutta la corrente generata dalla luce, I_{SC} , scorre attraverso il diodo 1, quindi la tensione a circuito aperto può essere scritta come:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC} + I_{o1}}{I_{o1}} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC}}{I_{o1}} \quad \text{dove } I_{SC} \gg I_{o1}$$

²⁴ *Fattore di idealità*: coefficiente sperimentale che tiene conto della corrente di ricombinazione in polarizzazione diretta e di quella di generazione in polarizzazione inversa.

Si noti che V_{OC} dipende dalla temperatura: alzandola si ha una maggiore concentrazione di portatori liberi intrinseci n , che fanno aumentare la corrente di saturazione oscura, nonché la velocità di ricombinazione. Questo comportamento comporta un abbassamento della tensione del circuito aperto.

Di particolare interesse è il punto sulla curva I-V in cui la potenza prodotta è massima: questo punto è indicato come “punto di massima potenza”, con $V=V_{MP}$ e $I=I_{MP}$. Come riportato in *figura 3.12* questo punto definisce un rettangolo, la cui area è definita da $P_{MP}=V_{MP}I_{MP}$: questo è il rettangolo più grande per qualsiasi punto presente sulla curva I-V. Il punto di massima potenza, lo si trova risolvendo:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_{V=V_{MP}} = \left. \frac{\partial (IV)}{\partial V} \right|_{V=V_{MP}} = \left[I + V \frac{\partial I}{\partial V} \right]_{V=V_{MP}} = 0 \quad V = V_{MP}.$$

Un altro parametro importante è il “fattore di riempimento” (Fill Factor FF). Questo viene calcolato tramite il punto, nella funzione caratteristica, in cui la potenza è massima, che come detto precedentemente in figura è rappresentato da (V_{MP}, I_{MP}) . Esso viene definito come il rapporto tra due aree, quella dei rettangoli che rappresentano la potenza massima erogabile della cella solare, con vertice (V_{MP}, I_{MP}) e la potenza dovuta al prodotto di I_{SC} e V_{OC} , rettangolo contenente tutta la funzione caratteristica.

Il FF indica quanto la funzione caratteristica sia rettangolare.

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

Probabilmente la caratteristica più importante per una cella solare è la sua “efficienza di conversione energetica” η che è definita come:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{FF V_{OC} I_{SC}}{P_{in}} \quad \begin{array}{l} P_{MP}: \text{potenza massima erogabile da una cella solare} \\ P_{in}: \text{potenza incidente, determinata dalle proprietà dello spettro di luce} \\ \text{incidente nella cella solare.} \end{array}$$

Importante è anche “l’efficienza della raccolta” che può essere definita in relazione alle perdite ottiche e di ricombinazione come efficienza di raccolta esterna:

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

I_{ph} è la massima corrente possibile che risulterebbe se tutti i fotoni con $E > E_G$ ($\lambda < \lambda_G = hc/E_G$) creerebbero coppie di elettroni e lacune.

L'efficienza di raccolta può anche essere definita rispetto alle perdite di ricombinazione, come "l'efficienza di raccolta interna":

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

I_{gen} è la corrente generata dalla luce. Quest'ultima rappresenterebbe la corrente di cortocircuito se ogni fotone che venisse assorbito, venisse anche raccolto e contribuirebbe alla corrente di cortocircuito. $I_{\text{gen}}=I_{\text{inc}}$ quando non vi è alcuna ombreggiatura nella griglia, nessuna perdita riflessa e la cella solare ha spessore ottico infinito.

L'efficienza è così divisa: quella interna che tiene conto dei fattori di perdita dovuti alla struttura della cella solare; quella esterna dove non se ne tengono conto.

Nel progettare una cella solare bisogna valorizzare due aspetti:

- minimizzare la velocità di ricombinazione in tutta la cella
- massimizzare l'assorbimento dei fotoni con energia maggiore di quella di gap, $E>E_G$.

Nonostante la complessità delle espressioni che descrivono il funzionamento e le caratteristiche della cella solare, i principi operativi di base sono facili da capire. Le coppie Elettrone-lacuna sono il risultato dell'assorbimento dei fotoni incidenti, sulla cella solare, da parte del sole sulla cella solare. L'obiettivo è quello di raccogliere i vettori minoritari prima che questi vengano persi per ricombinazione.

4. Limiti teorici della conversione fotovoltaica

L'efficienza è un aspetto molto importante nella conversione termodinamica dell'energia solare, in quanto la sua densità non essendo molto bassa, garantisce forti aspettative sulla fattibilità del suo uso, le quali sono economicamente efficaci sulla produzione elettrica. Tale densità, però, non è pertanto molto alta da rendere facile questo compito. Questa caratteristica fin dall'inizio, della trasformazione PV, ha avuto un ruolo importante; essa, infatti, è fortemente correlata alla generazione di coppie elettroni-lacuna causate dalla luce e la loro ricombinazione prima di essere consegnate al circuito esterno ad una certa tensione.

Per garantire una maggiore efficienza bisogna utilizzare determinati materiali, i quali sono più prestanti per la fabbricazione delle celle solari.

Nel 1960, Shockley²⁵ e Queisser²⁶, hanno determinato la massima efficienza di una cella solare, il cui limite è del 40.7% per lo spettro dei fotoni, approssimato ad un corpo nero a 6000 K. Da questo si evince che l'efficienza non è troppo elevata perché le celle solari non sfruttano appieno i fotoni derivanti dal sole: molti di loro non vengono assorbiti e quelli assorbiti sono scarsamente sfruttati.

Questo aspetto viene costantemente affrontato per migliorarlo, infatti, le celle solari, che vengono prodotte nei giorni odierni, sono chiamate di "terza generazione", mirate ad ottenere una maggiore efficienza.

Ciò ha fatto sì che si sviluppino e si creino nuovi concetti nella fabbricazione delle celle, da quello più affermato della multi-giunzione a quelli più recenti, sviluppatosi in seguito all'avanzare delle tecniche, come le nanotecnologie.

Le celle solari convenzionali sono dispositivi a semiconduttore in cui avviene un'interazione tra elettroni e buchi la quale viene prodotta dall'assorbimento di fotoni leggeri per produrre lavoro elettrico. Una differenza con i convertitori solari termici²⁷, le celle solari possono tranquillamente lavorare a temperatura ambiente. Un'attenzione particolare è rivolta alle condizioni della seconda legge termodinamica²⁸, come guida per i nuovi

²⁵ *William Bradford Shockley*: (Londra, 13 febbraio 1910 – Stanford, 12 agosto 1989) è stato un fisico statunitense.

²⁶ *Hans-Joachim Queisser*: (nato il 6 luglio 1931 a Berlino, Germania) è un fisico a stato solido.

Shockley e Queisser hanno co-prodotto il lavoro del 1961 sulle celle solari, oggi conosciuto come limite Shockley-Queisser, considerato contributo chiave in questo ambito.

²⁷ *Convertitore solare termico*: Un impianto solare termico è in grado di fornire acqua per usi sanitari e per il riscaldamento, riscaldata in maniera ecologica ed economica dal Sole.

²⁸ *Seconda legge termodinamica*: Il secondo principio della termodinamica, noto anche come enunciato di Clausius, afferma che: il calore non può spontaneamente fluire da un corpo freddo a uno più caldo.

dispositivi. Questo approccio termodinamico darà l'efficienza di un certo convertitore che solare può ottenere in determinate condizioni ideali. Questo verrà poi applicato alle celle solari odierne ed anche a dei dispositivi provati e studiati sperimentalmente, ovvero delle nuove tecnologie.

In questo capitolo, la teoria del convertitore solare che verrà trattata sembrerà diversa da quella analizzata nel capitolo 3. In quel caso si è analizzato la cella in un contesto di fisica dello stato solido, sulla base del trasporto della portante elettrica e ricombinazione; mentre in questo capitolo tutti i materiali che saranno trattati verranno considerati ideali, e verranno presi in considerazione i meccanismi che producono entropia²⁹ inerenti al concetto studiato. In questo modo, le efficienze fornite, in questo capitolo, devono essere considerate come limite superiore della cella solare studiata nel capitolo 3.

Sfondo termodinamico

La termodinamica definisce una funzione di stato per un sistema in equilibrio. Questa funzione può essere l'entropia, l'energia interna, l'entalpia, e così via, contenenti le informazioni del sistema e le relazioni tra di esse tramite le trasformazioni di Legendre³⁰. Le variabili usate per descrivere lo stato macroscopico di un sistema sono: dal punto di vista estensivo (volume U , numero di particelle N , entropia S , energia interna E , ecc.) e dal punto di vista intensivo (pressione P , potenziale elettrochimico μ , temperatura T , ecc.). Per lo scopo che si tratterà è conveniente scegliere il potenziale Ω : è la funzione di stato che descrive lo stato di un sistema, il potenziale elettrochimico, il volume e la temperatura sono scelti come variabili indipendenti. Esso è anche la trasformazione di Legendre dell'energia rispetto alla temperatura e al potenziale elettrochimico:

$$\Omega \doteq E - TS - \mu N = -PU$$

Le altre variabili termodinamiche, che caratterizzano il sistema in equilibrio, possono essere ottenute tramite derivazione del potenziale. Quindi il numero di particelle, l'entropia e la pressione possono essere ottenute:

$$N = - \left. \frac{\partial \Omega}{\partial \mu} \right|_{U,T} ; \quad S = - \left. \frac{\partial \Omega}{\partial T} \right|_{U,\mu} ; \quad P = - \left. \frac{\partial \Omega}{\partial U} \right|_{\mu,T}$$

Per descrivere i sistemi in condizioni di non equilibrio, si presume il sistema oggetto di studio sia suddiviso in sottoinsiemi di piccole dimensioni, ciascuno avente volume elementare nello spazio di fase²(x,y,z,v_x,v_y,v_z) e di

²⁹ Entropia: "grado di disordine" di un sistema. Quindi un aumento del "disordine" di un sistema è associato a un aumento di entropia, mentre una diminuzione del "disordine" di un sistema è associata a una diminuzione di entropia.

³⁰ Adrien-Marie Legendre:(Parigi, 18 settembre 1752 – Parigi, 10 gennaio 1833) è stato un matematico francese.

dimensioni sufficienti per definire le grandezze termodinamiche in esso. Le grandezze dipendono dalla loro posizione $r=(x,y,z)$ e la velocità del movimento $v=(v_x,v_y,v_z)$ del corpo elementare o di particelle di esso. È necessario introdurre il concetto di “densità di corrente termodinamica, j_x .”: è legata alle ampie variabili X ed è definita per quei corpi con velocità v nel punto r ; $j_x(r,v)=x(r,v)v$, in cui $x=X/U$, ovvero è il contributo dell’ampia variabile X per unità di volume U in un punto r dei corpi elementari con velocità v . L’equazione del potenziale elettrochimico può essere applicata alla densità di corrente termodinamica:

$$j_w = j_e - T(r, v)j_s - \mu(r, v)j_n = -P(r, v) v$$

Per la densità di corrente termodinamica, si può scrivere le seguenti equazioni di continuità:

$$\begin{aligned} g &\doteq \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot j_n && g: \text{numero di particelle} \\ v &\doteq \frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot j_e && v: \text{energia} \\ \sigma &\doteq \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot j_s && \sigma: \text{entropia} \end{aligned}$$

tutti e tre, questi parametri, sono dati per unità di volume. ∇ è l’operatore divergenza.

Le due leggi della termodinamica

Un certo sottosistema elementare o corpo può attingere energia o rilasciare energia ad un altro corpo vicino ad esso, la prima legge della termodinamica afferma che la somma delle energie generate da tutti i corpi elementari in una data posizione r deve essere zero, cioè: $\sum_i v(r, v_i) = 0$.

La seconda legge della termodinamica determina che la somma di tutta l’entropia generata da tutti i corpi, σ_{irr} , deve non essere negativa ovunque: $\sum_i a(r, v_i) = a_{irr}(r) \geq 0$.

Funzione termodinamica di radiazione

Il numero di fotoni presenti in un determinato modo di radiazione è dato dal noto “Fattore Bose-Einstein” $f_{BE} = \{\exp [(\epsilon - \mu) / kT] - 1\}^{-1}$, relativo al gran potenziale canonico: $\Omega = kT \ln \{\exp [(\mu - \epsilon) / kT] - 1\}$. I simboli presenti in queste equazioni sono stati definiti in precedenza, ϵ è energia del fotone e k è la costante di Boltzmann³¹.

³¹ *Boltzmann*: Ludwig Eduard Boltzmann (Vienna, 20 febbraio 1844–Duino, 5 settembre 1906) è stato un fisico, matematico e filosofo austriaco. È stato uno dei più grandi fisici teorici di tutti i tempi.

La corrente termodinamica, corrispondente la densità, per questi fotoni è data da:

$$j_n = f_{BE}c/(Un_r); \quad j_\epsilon = \epsilon j_n f_{BE}c/(Un_r); \quad j_\omega = \Omega c/(Un_r) \quad c: \text{velocità della luce nel vuoto,}$$

$$n_r: \text{indice di filtrazione del mezzo in cui si propagano i fotoni.}$$

Quindi c/n_r è la velocità dei fotoni nel mezzo.

Il numero di modalità di fotoni con energia compresi tra ϵ e $\epsilon+d\epsilon$ è $8\pi Un_r^3 \epsilon^2 / (h^3 c^2) d\epsilon$. Quando le modalità, con energia $\epsilon_m < \epsilon < \epsilon_M$, vengono prese in considerazione, il grande potenziale canonico totale dei fotoni, Ω_{ph} , associato a queste modalità, è dato dalla somma dei contributi di ciascuna modalità ed è scritto:

$$\Omega_{ph}(U, T, \mu) = \frac{8\pi U n_r^3}{h^3 c^3} \int_{\epsilon_m}^{\epsilon_M} \epsilon^2 kT \ln(1 - e^{-(\mu-\epsilon)/kT}) d\epsilon \quad h: \text{costante di Planck.}$$

I fotoni non interagiscono tra di loro, questo comporta ad avere temperature e la chimica dei potenziali diversi per ogni modalità. Ciò significa che dipendono dall'energia e dalla direzione di propagazione, e nel caso di non equilibrio possono anche essere funzione della posizione. Se si considera la propagazione dei fotoni in un piccolo angolo solido d , il grande potenziale deve essere moltiplicato per $d\omega/4\pi$.

Il flusso di una variabile X della radiazione attraverso una superficie A e con angolo solido ω è dato dalla relazione:

$$\dot{X} = \int_A \sum_i j_x dA = \int_{A,\omega} \frac{1}{4\pi} \frac{X}{U} \frac{c}{n_r} \cos \theta d\omega dA = \int_H \frac{1}{4\pi} \frac{X}{U} \frac{c}{n_r^3} dH$$

In questo caso la somma dell'integrazione è stata fatta su angoli solidi, di solito è estesa ad un numero limitato di angoli solidi: in particolare quando si tratta di fotoni provenienti da una fonte remota come il sole.

La variabile differenziale $dH = n^2 r \cos \theta d\omega dA$, o il suo integrale in un certo dominio, dove in ciascuna posizione di A deve includere l'angolo solido contenente i fotoni, è il cosiddetto inverso di Lagrange multilineare³², invariante per qualsiasi sistema ottico³³. Ad esempio, all'apertura di ingresso di un concentratore solare, si pensi alla semplice lente, il fascio di raggi ha una dispersione angolare stretta al suo ingresso, poichè tutti i raggi provengono dal sole in un cono stretto; quindi vengono poi raccolti attraverso l'intera apertura d'ingresso. L'invarianza di H indica che deve assumere lo stesso valore all'apertura di ingresso ed al ricevitore, o su qualsiasi superficie intermedia che il fascio attraversa.

³² *Lagrange multilineare*: Nell'analisi matematica, il teorema di inversione di Lagrange, anche conosciuto come la formula di Lagrange-Bürmann, fornisce l'espansione in serie di Taylor dell'inversa di una funzione analitica.

³³ *Sistema ottico*: Un sistema ottico è un sistema in grado di modificare la propagazione della luce. Il più semplice sistema ottico è il diottrio. Un sistema diottrico è un sistema ottico che modifica la propagazione della luce per rifrazione. Un esempio di sistema diottrico è la lente.

H diventa così una sorta di misura di un fascio di raggi, simile alla sua parte quadrimensionale dell'area, con due dimensioni spaziali in dA , e due angolari in $d\omega$. Quindi si può parlare di H_{sr} di un certo fascio di raggi che collega il sole con un ricevitore. Questo invariante riceve altri nomi: nei trattati di trasferimento termico si chiama "visione o fattore di vista", ma Welford e Winston hanno attribuito a questo invariante il nome originale, ovvero "endue", estensione, di un fascio di raggi.

Quando l'angolo solido dell'illuminazione consiste dell'emisfero totale, $H=n_r^2\pi A$, dove A è l'area della superficie attraversata dai fotoni.

In assenza di elementi ottici, i fotoni del sole raggiungono il convertitore situato sulla Terra all'interno di uno stretto cono di raggi. In questo caso, $H=\pi A \sin^2 \theta_s$, dove θ_s è il semi-angolo del sole di visione, tenendo conto del raggio del sole e della sua distanza dalla Terra, che è uguale a 0.267° . In questo caso non viene utilizzato alcun indice di rifrazione in quanto i fotoni provengono dal vuoto.

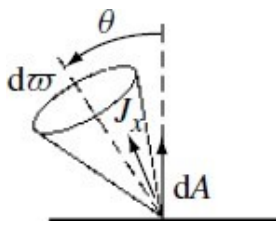


Figura 4.1 Flusso di una variabile termodinamica attraverso un elemento di superficie dA .

Convertitori fotovoltaici

Nel 1960, Shockley e Quiesser (SQ) pubblicarono un importante articolo nel quale evidenziarono il limite superiore di efficienza della cella solare. Venne sottolineato che la generazione di energia, dovuta all'assorbimento della luce, ha un equilibrio equilibrato, che ha come controparte la ricombinazione radiativa. Questo limite di efficienza SQ si verifica in celle solari ideali che sono i prototipi delle celle solari ideali. Tali celle sono costituite da un semiconduttore con un VB³⁴ e un CB³⁵, più energetico e separato dal VB dal gap di banda, ϵ_g . Ogni banda è in grado di sviluppare quasi-Livelli di Fermi, ϵ_{Fc} per CB e ϵ_{Fv} per VB, per descrivere la concentrazione portante nelle rispettive bande.

³⁴ VB: banda di valenza

³⁵ CB: banda di conduzione

Nella cella ideale SQ la mobilità dei portatori è infinita, e poiché l'elettrone e le correnti dei fori sono proporzionali ai gradienti di livello quasi-Fermi, ne deriva che i livelli quasi-Fermi sono costanti. Il contatto con la banda di conduzione avviene tramite la deposizione di un metallo su un n^+ , semiconduttore drogato. I corrieri che attraversano questo contatto sono principalmente elettroni, a causa della piccola densità del foro. I pochi fori che passano, attraverso questo contatto, sono considerati come ricombinazione superficiale, i quali vengono considerati pari a zero nel caso ideale. Allo stesso tempo, il contatto fatto con la banda di valenza è dato da un metallo depositato su un semiconduttore drogato con p.

Il voltaggio V che si ha tra due elettrodi è dato dalla divisione dei livelli di quasi-Fermi, più precisamente, dalla differenza nei livelli quasi-Fermi di portatori di maggioranza alle interfacce di contatto ohmiche.

Con i livelli costanti di quasi-Fermi e i contatti ideali, la divisione è semplice:

$$qV = \varepsilon_{Fc} - \varepsilon_{Fv}$$

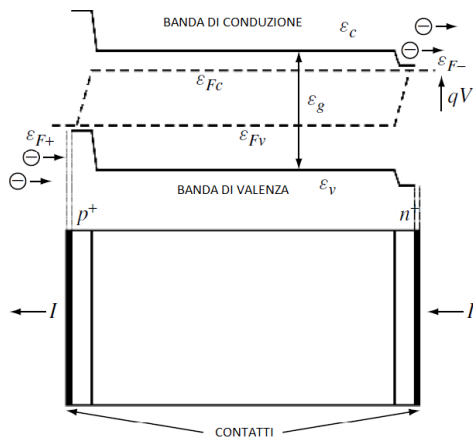


Figura 4.2 Schema a bande di una cella solare con i suoi contatti

I fotoni vengono assorbiti pompando elettroni dal VB al CB attraverso il processo noto come “generazione di coppie elettrone-foro”. Anche il meccanismo opposto viene prodotto in modo che un elettrone CB possa decadere al VB ed emettere un fotone, che porta al processo che viene chiamato “ricombinazione radiativa”. Molti di questi fotoni luminescenti, la cui energia è al di sopra del band gap, vengono riassorbiti, portando alla generazione di coppie di elettroni e al bilanciamento della ricombinazione. Tenendo conto che i fotoni luminescenti sono emessi isotropicamente, solo quelli emessi vicino alle facce della cella hanno la possibilità di lasciare effettivamente il semiconduttore, e quindi di contribuire alla rete radiativa di ricombinazione. Nella cella ideale SQ ogni meccanismo di ricombinazione non radiante, il quale produce entropia, si presume assente. La differenza tra gli elettroni pompati, verso la banda di conduzione, dall’assorbimento dei fotoni esterni e quelli che cadono di nuovo nella banda di valenza, che emettono efficacemente un fotone luminescente, è uguale alla corrente estratta dalla cella.

Questo aspetto può essere rappresentato in una equazione come:

$$I/q = \dot{N}_s - \dot{N}_r = \int_{\varepsilon_g}^{\infty} (\dot{n}_s - \dot{n}_r) d\varepsilon$$

$\varepsilon_g: \varepsilon_c - \varepsilon_v$ è il gap di banda del semiconduttore
 \dot{N}_s, \dot{N}_r : sono i flussi entranti o uscenti dalla cella solare, attraverso qualsiasi

superficie.

Quando la cella è correntemente installata, la corrente è costituita dagli elettroni che lasciano la banda di conduzione attraverso il n-contatto altamente drogato. Allo stesso tempo, nella banda di valenza, I/q sono anche gli elettroni che entrano in tale banda attraverso il p-contatto, anch'esso altamente drogato. Il segno della corrente è opposto di quello del flusso di elettroni.

$\dot{N}_s = a\dot{N}(T_s, 0, \varepsilon_g, \infty, \pi \sin^2 \theta_s)$ per la cella rivolta verso il sole, $\dot{N}_s = a\dot{N}(T_s, 0, \varepsilon_g, \infty, \pi)$ per la cella in piena concentrazione e $\dot{N}_r = \xi\dot{N}(T_a, qV, \varepsilon_g, \infty, \pi)$, dove a e ξ sono l'assorbimento e l'emissività della cellula. T_s è la temperatura del sole e T_a è la temperatura della stanza. Concentrazione completa significa usare un concentratore senza perdite che è in grado di fornire un'illuminazione isotropa; questo è il massimo potere illuminante del flusso di una determinata fonte. La conservazione richiede ad avere una concentrazione C che soddisfi l'equazione $C\pi \sin^2 \theta_s = \pi n^2_r$, cioè $C = 46050 n_r^2$. Questa concentrazione è davvero irrealistica, ma comporta la massima efficienza. Si può dimostrare che quando il livello di quasi-Fermi si divide uniformemente nella massa del semiconduttore, si ha $a = \xi$; d'ora in poi verrà considerata una cella solare abbastanza spessa e perfettamente rivestita con strati antiriflessivi, in modo da assorbire completamente qualsiasi fotone con energia superiore all'energia del gap di banda, in modo che $a = \xi = 1$.

L'ipotesi $\dot{N}_r = \dot{N}(T_a, qV, \varepsilon_g, \infty, \pi)$, afferma che la temperatura associata ai fotoni emessi è quella dell'ambiente. Questo è naturale perché la cella si trova a questa temperatura. Si ha, inoltre, che il potenziale chimico μ_{ph} non è zero, ma valga:

$$\mu_{ph} = \varepsilon_{Fc} - \varepsilon_{Fv} = qV$$

Questo è dovuto al fatto che la radiazione della ricombinazione delle coppie elettrone-lacuna hanno ciascuna potenziale elettrochimico diverso o livello quasi-Fermi. Quindi si può concludere che l'equazione appena scritta è conseguenza dell'equiparazione del potenziale chimico della sostanza prima e dopo la reazione.

Quando l'esponente della funzione Bose-Einstein è molto più alto di uno, il termine di ricombinazione può essere scritto come:

$$\dot{N}_r = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon_g}^{\infty} \varepsilon^2 \exp\left(\frac{\varepsilon - qV}{kT_a}\right) d\varepsilon$$

questa equazione è valida per $\varepsilon_g - qV \gg kT_a$. Con questa approssimazione, la caratteristica corrente di voltaggio della cella solare prende il suo caratteristico esponente. Con il fattore

$$= \frac{2\pi kT}{h^3 c^2} [4(kT)^2 + 2\varepsilon_g kT + \varepsilon_g^2] \exp\left(\frac{qV - \varepsilon_g}{kT_a}\right)$$

appropriato $\sin^2 \theta_s$, è accurata in tutti gli intervalli di interesse delle caratteristiche di corrente-tensione delle celle ideali in condizioni di luce del sole non concentrata.

La cella solare SQ può raggiungere un limite di efficienza dato da:

$$\eta = \frac{\{qV[\dot{N}_s - \dot{N}_r(qV)]\}_{\max}}{\sigma_{SB}T_s^4}$$

dove il massimo è calcolato ottimizzando V. Questo limite di efficienza è stato inizialmente ottenuto da Shockley e Queisser, per luce concentrata, e nella figura 4.3

viene evidenziato per i diversi spettri di illuminazione in funzione della banda proibita.

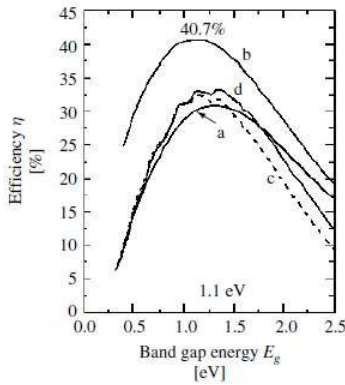


Figura 4.3 Limite di efficienza SQ per una cella solare ideale in rapporto all'energia del gap di banda per illuminazione non concentrata del corpo nero, per illuminazione completamente concentrata e per illuminazione al di sotto dello Spettro solare terrestre.

- a. Radiazione del corpo nero 6000 K non concentrata (1595.9 Wm⁻²)
- b. Radiazione totale del corpo nero 6000 K (7349.0x 10⁴ Wm⁻²)
- c. Non concentrato AM. 1.5 Diretto (767.2 Wm⁻²)
- d. AM 1.5 globale (962.5 Wm⁻²).

Si può notare che il limite dell'analisi SQ non fa alcun riferimento sulla giunzione pn del semiconduttore; William Shockley fu colui che ideò la giunzione pn e che capì il ruolo secondario nelle celle solari. Essa non è un costituente fondamentale della cella solare. Quello che sembra essere fondamentale in una cella solare è l'esistenza di due gas di elettroni con Livelli di Fermi differenti, potenziale elettrochimico, e l'esistenza di contatti selettivi, ciascuno attraversato da questi due gas.

Il ruolo del semiconduttore, di cui la cella è fatta, serve a fornire i due gas di elettroni che possono avere diversi semi-Fermi livelli a causa della separazione dell'energia di gap che rende difficile la ricombinazione.

Consistenza termodinamica di Shockly-Queisser. Cella fotovoltaica

Elettroni e fotoni sono le particelle principali che interagiscono in una cella solare, anche se vi sono altre interazioni. La generazione di entropia, per ogni tipo di particella (elettroni, fotoni, ecc.) è scritta come:

$$\sigma = \sum_i \left[\frac{1}{T} v + j_e \nabla \frac{1}{T} - \frac{\mu}{T} g - j_n \nabla \frac{\mu}{T} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{T} j_\omega \right) \right]$$

in cui la sommatoria è estesa ai diversi stati della particella.

Analizzando la generazione di entropia da parte degli elettroni σ_{ele} , tranne nel caso di elettroni balistici³⁶, in cui la pressione j_ω è rapidamente equilibrata; lo stesso vale per +v e -v come risultato della frequente collisione

³⁶ *Elettroni balistici:* gli elettroni possono muoversi lungo traiettorie classiche senza collisioni trasporto di natura diffusiva.

elastica. Quindi il termine in j_ω per gli elettroni scompare quando la somma viene estesa a tutti gli stadi di ogni energia. Queste collisioni causano un aumento della temperatura e dell'energia libera, le quali diventano uguali per tutte le direzioni, almeno per una data energia. Nelle celle solari convenzionali, inoltre, la temperatura degli elettroni è la stessa per ogni energia ed è uguale alla energia del reticolo T_a . Il potenziale elettrochimico è lo stesso, per tutti gli elettroni, all'interno della stessa banda ad una data r .

Nella cella reale, il flusso di energia va dalle regioni ad alta temperatura verso quelle a bassa temperatura $\nabla(\frac{1}{T}) \geq 0$, in modo tale che il termine j_e produca entropia positiva per temperatura costante. Nell'ideale della cella, la temperatura del reticolo, che è anche quella degli elettroni, è costante ed il termine che coinvolge $\nabla(\frac{1}{T})$ scompare. Nella cella ideale SQ, la mobilità è infinita e quindi, i suoi potenziali elettrochimici di banda, di conduzione e di valenza o di livelli quasi-Fermi ($\epsilon_{Fc}, \epsilon_{Fv}$) sono costanti su tutta la cella solare ed anche i loro gradienti zero. Pertanto tutti i gradienti scompaiono e il contributo dell'elettrone alla generazione entropica, σ_{ele} è data da:

$$\sigma_{ele} = \sum_{i-ele} \left[\frac{1}{T_a} v_{i-ele} - \frac{\epsilon_{Fc(v)}}{T_a} g_{i-ele} \right]$$

Il livello di quasi- Fermi da utilizzare in questo caso è ϵ_{Fc} o ϵ_{Fv} a seconda della banda quale sia lo stato elettronico i -ele. Questo è rappresentato da $\epsilon_{Fc(v)}$.

Si possono verificarsi altre interazioni tra particelle, oltre a quelle tra fotoni ed elettroni, nella cella, e queste hanno anche una pressione indipendente dalla direzione ed hanno la temperatura del reticolo. Se, effettivamente vi sono, si può presupporre che abbiano potenziale zero. Usando queste ipotesi, il contributo che esse danno per la generazione di entropia è:

$$\sigma_{others} = \sum_{i-others} \left[\frac{1}{T_a} U_{i-others} \right]$$

Nel caso dei fotoni, la situazione è piuttosto diversa, essi non interagiscono tra di loro e quindi sono essenzialmente balistici. La loro termodinamica, le loro variabili intensive possono subire variazioni con l'energia del fotone stesso e anche con le loro direzioni di propagazione. Infatti, arrivando dal sole, solo in determinate direzioni, e solo in queste, esercitano una pressione. La conseguenza è che non vi è una corrente di grande potenziale per i fotoni; svanisce in gas di fotoni che è confinata in un equilibrio termico. N_{ph} è il numero di fotoni in una modalità corrispondente ad un certo raggio in movimento all'interno di un semiconduttore, la loro evoluzione, di un dato raggio di percorso corrispondente alle modalità di radiazione è data da:

$$N_{ph}(\zeta) = f_{BE}(T, qV)[1 - e^{-\alpha\zeta}] + N_{ph}(0)e^{-\alpha\zeta}$$

ζ : lunghezza del raggio;

f_{BE} : fattore di Bose-Einstein per i fotoni luminescenti, il cui potenziale chimico è la separazione tra conduzione e banda di valenza livelli di quasi-Fermi, in questo caso pari alla tensione della cella V (volte q)
 α coefficiente di assorbimento.

Limite di efficienza tecnica per i convertitori solari

Con la definizione tecnica di efficienza, si è visto, al cui denominatore la radiazione restituita al sole non è considerata, che l'efficienza di Carnot³⁷ non può essere raggiunta da un convertitore fotovoltaico.

Quale è il limite superiore dell'efficienza tecnica per i convertitori solari?

Questo limite, quello di Carnot, potrebbe essere raggiunto se si potesse costruire un convertitore che produce zero entropia. In questo caso, la potenza che il convertitore genererebbe \dot{W}_{lim} può essere ottenuta imponendo la generazione di entropia irreversibile pari a zero.

$$\dot{W}_{lim} = \int_{\epsilon_g}^{\infty} \{[\dot{\epsilon}_s - T_a \dot{s}_s] - [\mu_x(\epsilon) \dot{n}_x + \dot{\omega}_x]\} d\epsilon = \int_{\epsilon_g}^{\infty} \dot{w}_{lim}(\epsilon, \mu_x) d\epsilon$$

L'integrando dovrebbe essere massimizzato rispetto a μ_x . Per questo viene calcolata la derivata

$$\frac{d\dot{w}_{lim}}{d\mu_x} = -\dot{n}_x - \frac{d\dot{\omega}_x}{d\mu_x} - \mu_x \frac{d\dot{n}_x}{d\mu_x} = -\mu_x \frac{d\dot{n}_x}{d\mu_x}$$

Da questa equazione si evince che il massimo si ottiene se $\mu_x = 0$ per ogni ϵ , in altre parole se la radiazione emessa è una radiazione termica

a temperatura ambiente. Questa è la radiazione emessa da tutti i corpi in equilibrio termico con l'ambiente. Lo stesso risultato può essere raggiunto anche se la radiazione emessa è qualsiasi, il cui equivalente luminescente, a temperatura ambiente, è una radiazione termica a temperatura ambiente.

$$\eta = \frac{\left(\frac{H_{sr}}{\pi}\right) \left[\left(\sigma T_s^4 - \frac{4}{3}\sigma T_a T_s^3\right) - \left(\sigma T_a^4 - \frac{4}{3}\sigma T_a^3\right) \right]}{\left(\frac{H_{sr}}{\pi}\right) \sigma T_s^4} = 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)^4$$

Questa efficienza la si può determinare secondo Landsberg³⁸:

$T_s = 6000K$ e $T = 300K$ da un rendimento del 93.33% invece del 95% di Carnot.

Nessun dispositivo è in grado di ottenere questa efficienza. I

³⁷ *Efficienza di Carnot*: Il ciclo di Carnot ha la proprietà di essere il ciclo termodinamico che evolve tra le due sorgenti con il rendimento termodinamico maggiore. Non esiste nessun altro ciclo con temperature estreme pari a quelle delle isoterme del ciclo di Carnot, tale da avere un rendimento superiore a quello di Carnot. Per questi motivi viene usato come ciclo di riferimento per applicazioni reali come, ad esempio, pompe di calore e cicli frigoriferi.

³⁸ *Landsberg*: (Vologda, 1890 – Mosca, 1957), è stato un fisico sovietico.

convertitori ideali hanno un'efficienza dell'85,4% , al di sotto del limite. Il limite di efficienza di Landsberg è certamente il limite superiore dell'efficienza tecnica del convertitore solare.

5. Materie prime: il silicio

Se il fotovoltaico diventerà una grande fonte di energia in futuro, è opportuno cercare e capire quali materiali e quali elementi naturali saranno fondamentali per garantire la sostenibilità a lungo termine di questa fonte di energia. Questo ragionamento è particolarmente valido per i materiali semiconduttori, il cui gap di banda deve eseguire la conversione efficiente della luce solare in elettricità.

Fino ad ora, il materiale semiconduttore dominante utilizzato, nel fotovoltaico è il silicio, soprattutto il silicio cristallino. Il consenso è che il silicio cristallino è e rimarrà il cavallo di battaglia di questo mercato in crescita. Le previsioni visionarie a lungo termine prevedono che entro il 2050, 30 000 TWh di elettricità fotovoltaica verranno generati ogni anno in tutto il mondo. Questo comporterà una forte capacità di produzione fotovoltaica per un totale di 15 milioni di tonnellate di energia solare e di materie prime di silicio di grado, supponendo che il silicio rimanga dominante e che l'efficienza cellulare ed i rendimenti dei materiali andranno in continuo miglioramento. Il largo consumo del silicio, non solo nel campo del fotovoltaico, ma dell'intera industria metallurgica pone chiaramente il problema se il materiale stesso sia reperibile e se la sua disponibilità sia duratura nell'arco degli anni.

Questo capitolo tratterà prettamente il silicio dalla sua estrazione, purificazione e disponibilità per la pratica attuale e futura.

Il Silicio (Si) non si presenta mai libero in natura, ma in combinazione con l'ossigeno formando ossidi³⁹ e silicati⁴⁰. La maggior parte della crosta terrestre è costituita da silice e silicati vari associati ad alluminio, magnesio ed altri elementi.

Proprietà fisiche e chimiche del Silicio rilevanti per il fotovoltaico

Il silicio è un semiconduttore conduttore con una banda proibita, banda di gap E_g di 1.12 eV a 25°C, questo è il gap indiretto, mentre quello diretto supera i 3eV e questo ne determina il basso coefficiente di assorbimento, rendendolo permeabile alla luce. Alla pressione atmosferica, il silicio cristallizza in una struttura cubica

³⁹ *Ossido*: Un ossido è un composto chimico binario che si ottiene dalla reazione dell'ossigeno su di un altro elemento, così che la sua formula chimica contenga almeno un atomo di ossigeno e uno dell'altro elemento.

⁴⁰ *Silicato*: I silicati sono la classe di minerali caratterizzati dalla presenza del gruppo tetraedrico $(SiO_4)^{4-}$. Il nome silicati fu adottato per la prima volta dal chimico svedese Jöns Jacob Berzelius.

diamantata, che si trasforma in un reticolo del corpo centrato quando viene sottoposto a 15 GPa. A differenza della maggior parte degli elementi, esso si espande quando si solidifica e si contrae quando fonde.

Le impurità incorporate nel reticolo di silicio durante la crescita dei cristalli o durante il post-trattamento (diffusione, impianto, ecc) ionizza a basse temperature, fornendo così o elettroni liberi o buchi.

Le impurità del gruppo IIIA sostituiscono un atomo di silicio nel reticolo atomico per fornire elettroni e sono chiamati n-droganti o donatori, mentre gli elementi del gruppo VA sostituiscono un atomo di Si per fornire fori e sono chiamati droganti p o accettori. Il fosforo e il boro rappresentano questi gruppi e sono utilizzati nel processo fotovoltaico per controllare le proprietà del semiconduttore (livelli di drogaggio), ovvero il silicio.

Le concentrazioni di impurità sono espresse in atomi di impurità per centimetro cubo del materiale ospite, silicio, queste variano da 10^{14} a 10^{20} atomi per cm^3 e possono essere misurati con strumenti diretti. Una misura indiretta di impurità è la vita del vettore di minoranza. Questo è il tempo che trascorre prima che un elettrone libero, nel reticolo, si ricombini con un foro. I metalli di transizione, quali Fe, Cr, Ni, degradano la vita del vettore di minoranza e le prestazioni della cella solare. La ricombinazione dominante, è quella dovuta ai difetti, relativa ai tempi di vita dei portatori Shockley-Read-Hall. I cristalli molto puri possono avere tempi di vita dei portatori che vanno fino ai 10 000 μs . Il silicio drogato con fosforo e boro ha tempi che vanno da 50 a 300 μs , e le celle solari hanno bisogno di almeno 25 μs . La ricombinazione di Auger diventa dominante ad alte concentrazioni di portatori. Mentre la ricombinazione da banda a banda è generalmente trascurabile.

L'indice di raffinazione elevato limita le applicazioni ottiche del silicio. Le proprietà di assorbimento/trasmissione negli spettri di lunghezza d'onda da 0.4 a 1.5 μm sono molto importanti nelle prestazioni di celle fotovoltaiche e dispositivi di foto conduzione. Nelle applicazioni fotovoltaiche vengono utilizzati strati antiriflessivi al silicio, il quale se legato con piccole quantità di impurità diventa fragile; anche modellarlo richiede segatura e rettifica, mentre applicazioni microelettroniche richiedono lucidatura. Tutte queste operazioni meccaniche sono molto simili a quelle che vengono applicate agli occhiali.

Il silicio è stabile nello stato tetravalente e ha una forte affinità per l'ossigeno, formando così ossidi e silicati stabili. Artificialmente il silicio elementare isolato si ossida immediatamente, formando un sottile film protettivo di silice inferiore a 100°, che impedisce ulteriore ossidazione. L'ossigeno gioca un ruolo importante in dispositivi a semiconduttore al silicio.

La superficie del silicio elementare è ossidata ed è relativamente inerte ed è considerata come non tossica. Il rischio di rischi con il materiale sono elevati quando questo si presenta in forma di polvere fine in presenza di una fonte di ignizione.

La produzione di silicio metallurgico e silicio di grado elettronico ha un impatto ambientale sul consumo di energia, associato ai gas climatici e inquinanti: principalmente CO_2 , NO_x e SO_2 . Tuttavia, si deve 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.

Requisiti del silicio per le celle solari cristalline

Il silicio, oltre ad avere un potenziale per il grado solare, possiede anche delle limitazioni strutturali e chimiche che ha per raggiungere prestazioni ottimali per il cristallino e per le celle solari multi cristalline.

Consolidamento: Quando il silicio si solidifica, un fuso omogeneo normalmente non risulta essere un solido omogeneo. Un diagramma di fase schematizzato, dell'angolo di silicio, viene mostrato nelle due figure seguenti, quando una composizione X_0 , a temperatura T_0 , inizia a solidificare, e passa ad una temperatura T_1 , in una frazione s_1 è solidificata.

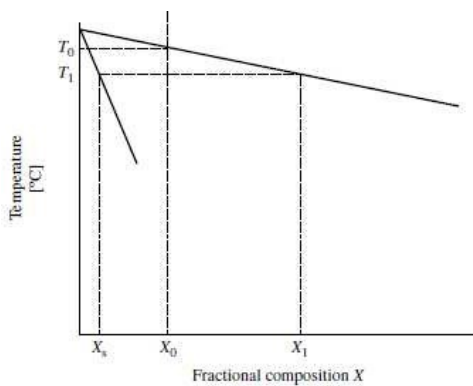


Figura 5.1 Lato sinistro di un diagramma di fase con sviluppo della composizione $k_0 < 1$

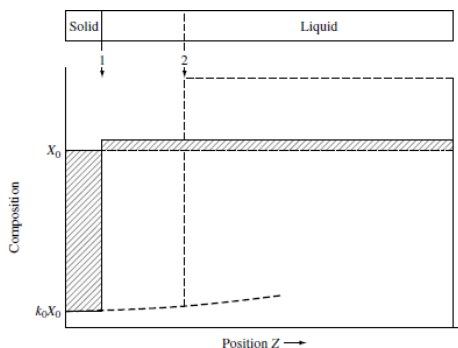


Figura 5.2 Solido e liquido di una canna solidificata dell'estremità sinistra sotto "normale congelamento".

All'equilibrio le composizioni frazionarie del solido e del liquido sono X_s e X_l . Il coefficiente di distribuzione di equilibrio k_0 in t_1 è definito come il rapporto tra le composizioni solide e liquide di equilibrio:

$$k_0 = X_s / X_l \quad \text{all'equilibrio sia il solido che il liquido hanno composizioni omogenee.}$$

Durante il normale congelamento, il solido ed il liquido non sono in equilibrio. Questo principio può essere usato per purificare il materiale. Se l'interfaccia solido è piatta, il fuso ha una composizione uniforme e la diffusione trascurabile avviene nel solido.

Un cilindro orizzontale di lega liquida di composizione inizialmente uniforme X_0 viene raffreddato all'estremità di sinistra. Questa lascia una piccola quantità di forma solida in modo che il solido-liquido, nell'interfaccia, si trovi nella posizione 1. Quando un piccolo volume si è solidificato, la composizione di volume è passato da X_0 a k_0X_0 . Una massa di soluto proporzionale al tratteggio incrociato all'area a sinistra della posizione 1 è stata rimossa dal solido e rifiutata dal liquido restante. Se si considera l'equilibrio locale, le composizioni liquide e solide all'interfaccia sono legate assime dell'equazione $X_s = k_0X_l$. Quindi quando la composizione del liquido è sollevata, la composizione solida deve aumentare con il processo di solidificazione. Quando l'interfaccia solido-liquido si è spostata nella posizione 2, la composizione solida sarà gradualmente aumentata, come mostrato nella *figura 5.2*.

Effetto delle imperfezioni del cristallo: Il silicio ha una struttura atomica a reticolo diamantato cubico, con atomi uniti da quattro legami covalenti con angoli tetraedrici. Se gli atomi vengono rappresentati come sfere, la struttura a rombi riempie 0.34 dello spazio disponibile, rispetto allo 0.74 per una struttura ravvicinata come l'alluminio.

La formazione di difetti nel reticolo del silicio crea disturbi elettronici locali a causa della natura del legame atomico.

I difetti reticolari che appaiono nel reticolo del silicio, sono importanti quando si discute l'effetto delle impurità sulle proprietà elettriche. I difetti reticolari vengono divisi nelle seguenti categorie:

difetti piani

errori di impilamento

confini gemelli

confini del grano

difetti di linea

dislocazioni

punti difettosi

posti vacanti

self-interstiziali
impurità sostitutive
impurità interstiziali
difetti di volume
precipitati.

Il materiale monocristallino è costituito da un chicco di una struttura cristallina continua. Il materiale multi cristallino (mc) o policristallino (pc) sono costituiti da molti grani separati con piani di cristallo inclinati che si incontrano ai bordi del grano. A seconda del disorientamento tra grani adiacenti, le interfacce sono definite e anche i bordi dei grani. I confini gemelli sorgono dove un grano di cristallo è un'immagine speculare del suo vicino. I confini possono avere una struttura atomica più o meno aperta e ben organizzata. La diffusione atomica è quindi più facile lungo i bordi dei grani che nel cristallo sfuso.

Per colpa della mancanza di ordine dei cristalli, alcuni dei legami covalenti vengono rotti ed i confini del grano possono portare a delle cariche elettriche.

Il concetto di imperfezione lineare del reticolo, chiamata dislocazione, si ha quando i confini dei piani atomici sono fuori registro, questo può portare alla rottura di alcuni legami covalenti del silicio, e quindi portare alla carica elettrica. Le dislocazioni possono essere circondate da campi di stress e possono attirare impurità. Nel silicio di tipo n, le impurità del donatore possono fornire elettroni per riempire la carica mancante alla dislocazione. Come conseguenza si ha una dislocazione carica negativamente, che a sua volta può attirare la carica positiva del donatore. Questa situazione rappresenta un cilindro in cui gli ioni donatori, con carica positiva, circondano una dislocazione carica negativamente.

Nel materiale di tipo p, gli atomi drogati possono accettare elettroni da una dislocazione. In questo caso, la regione di carica dello spazio, a forma di cilindro, ha una dislocazione positiva, circondata da ioni accettori caricati negativamente.

Caratteristiche del materiale monocristallino

La questione dominante dell'industria fotovoltaica è quella di fabbricare celle solari in grandi volumi che siano altamente efficienti e conservative. Un obiettivo significativo è quello di abbassare i costi per watt. Il materiale di assorbimento dominante utilizzato, per la maggior parte delle celle, prodotte finora, è il silicio cresciuto in

Czochralski⁴¹ (c-Si) in materiale monocristallino e fuso in forma multi cristallina (mc-Si). Lo sforzo, fino ad ora fatto, ha portato ad un aumento dell'efficienza elettrica pari al 20%, anche se quelli previsti erano ben altri, ma probabilmente non saranno mai raggiunti. Rimane ancora notevole il divario di efficienza tra celle di laboratorio monocristalline con efficienza fino il 24% e quelle commercializzate, le quali hanno una efficienza che va tra il 14% e il 17%.

Le celle commerciali Si hanno uno spessore di wafer⁴² attuale compreso tra 250 μ m e i 350 μ m per ragioni di stabilità meccanica, mentre è stato calcolato che uno spessore compreso tra i 60 μ m-100 μ m è quello ottimale per celle solari al silicio. In questo regime di spessore è possibile raggiungere la massima efficienza solare teorica per le celle solari c-Si. Con questo spessore, quello ottimo, il silicio diventa molto fragile; questo fa sì che l'elettronica e le proprietà meccaniche del wafer, nonché la manipolazione e la lavorazione diventano di massima importanza per ottenere una buona resa. Anche i processi produttivi giocano un ruolo importante: questi devono essere migliorati attraverso accorgimenti in modo tale da impedire le flessioni e le rotture dei wafer ultrasottili.

Un'altra questione molto importante, per ottenere la massima efficienza, è quella nel miglioramento del rivestimento anti-riflesso (AR) che è dato dall'ombreggiatura della griglia, dalla risposta "blu" dell'emettitore e dalla superficie e dal volume di passivazione⁴³.

Le celle solari prodotte dai cristalli di Czochralski (CZ) ed i wafer giocano insieme alle celle multi cristalline una parte dominante nell'odierna industria fotovoltaica.

Questo è dovuto ai seguenti vantaggi:

i cristalli Cz possono assumere un'ampia varietà di forme diverse e drogati con varie materie prime. Questo permette di usufruire di materie prime a costo conveniente e di buona qualità. Poiché la materia prima viene fusa, la forma, la granulometria e la resistività delle diverse materie possono essere mescolate per le specifiche richieste. Bisogna però evitare la presenza di particelle macroscopiche, quali SiO₂, SiC, che non riescono a sciogliersi nella fusione, specialmente quando si utilizza materiale di scarto. Lo stesso processo Cz agisce come

⁴¹ *Czochralski*: Il processo Czochralski è una tecnica introdotta nei sistemi produttivi industriali agli inizi degli anni cinquanta, che permette di ottenere la crescita di monocristalli di estrema purezza

⁴² *Wafer*: è la struttura principale sulla quale verranno eseguiti diversi trattamenti, specialmente di natura chimica, che porteranno alla creazione della vera e propria cella.

⁴³ *Passivazione*: La passivazione è un fenomeno di natura elettrochimica che può rallentare o impedire completamente la reazione di corrosione dei materiali metallici che altrimenti questi ultimi subirebbero. Il fenomeno consiste sostanzialmente nella formazione di un sottile film (costituito da prodotti della corrosione, sostanze presenti nell'ambiente aggressivo o ossigeno adsorbito sulla superficie del metallo) che aderisce perfettamente alla parte della superficie del pezzo a contatto con l'ambiente aggressivo (ad esempio acqua o aria). Perché il fenomeno della passivazione possa avvenire, il film deve ostacolare la diffusione dell'agente ossidante (generalmente ossigeno), per cui deve essere "compatto", ovvero denso e poco poroso.

una fase di controllo della qualità dopo la corretta cristallizzazione, cioè, la crescita senza dislocazione di un lingotto. L'omogeneità di un lingotto Cz di un grado solare, di buona qualità, per l'applicazione fotovoltaica, è eccellente rispetto alla larghezza di banda delle proprietà elettroniche e strutturali. L'incisione anisotropica⁴⁴, una struttura superficiale con piramidi casuali, consente ad avere un effetto da parte luce solare in ingresso molto efficace nella cella. Questo, associato alla maggiore lunghezza di diffusione dei cristalli Cz, comporta un aumento dell'efficienza del solare delle celle Cz-Si, rispetto alle celle mc-Si.

Esiste un altro potenziale per aumentare la velocità di trazione netta, cioè la produttività di un estrattore grazie ad un design intelligente della zona calda. Questo è possibile, poiché le specifiche PV sono fortemente ridotte nel numero di parametri richiesti. Una specifica fotovoltaica si concentra sulla massima produttività, una lunghezza di diffusione del vettore di minoranza del materiale che dovrebbe superare lo spessore della cella e un doping superficiale di tipo p che porta ad una resistenza specifica tra 0.3 e 10 Ωcm , a seconda del tipo di cella fabbricata. Uno dei principali svantaggi della cristallizzazione Cz del silicio, è il fatto che le celle quadrate sono le più adatte a costituire un modulo solare altamente efficiente, mentre i lingotti di Cz hanno una sezione trasversale rotonda. Al fine di utilizzare sia il cristallo e l'area del modulo, nel modo migliore, i lingotti sono solitamente tagliati in una sezione trasversale pseudo quadrate prima che siano tagliati dei wafer. La parte tagliata di "scarto" viene reinserita nuovamente nel processo per formare nuove celle.

Per completare la crescita dei cristalli, senza dislocazioni, il diametro del cristallo deve essere ridotto gradualmente ad una piccola dimensione. Per questo scopo, la velocità di trazione viene aumentata ed il diametro del cristallo diminuisce. Se il diametro è abbastanza piccolo, il cristallo può essere separato dal fuso senza una dislocazione. Il ritiro del cristallo, dalla massa fusa residua, deve essere fatto con una velocità piuttosto alta, ma non troppo veloce, in quanto potrebbe causare uno shock termico e portare ad una deformazione plastica, che prende il nome di "slip", nella parte inferiore del cristallo.

Silicio tri-cristallino

Le proprietà meccaniche del silicio tri-cristallino (tri-Si) consentono l'affettatura di wafer ultra-sottili con maggiore resa meccanica rispetto al silicio monocristallino. Il Tri-Si è un cristallo costituito da tre granuli di silicio monocristallino mutuamente inclinati. La crescita di Tri-Si è pienamente compatibile con la crescita monocristallina standard Cz, ma più veloce. Spesso le dislocazioni non possono essere completamente

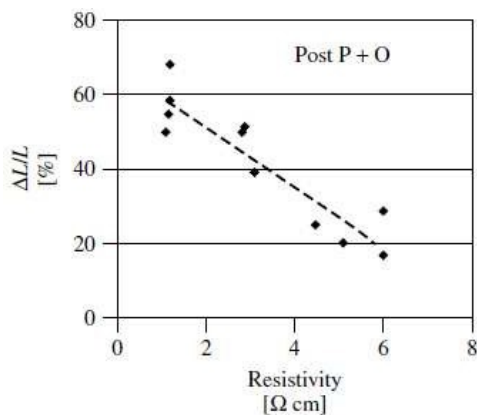
⁴⁴ *Anisotropia*: La proprietà per cui il valore di una grandezza fisica (durezza, resistenza alla rottura, velocità, indice di rifrazione, ecc.), in una sostanza o nello spazio, non è uguale in tutte le direzioni.

eliminate durante il necking⁴⁵, in questo modo non si ha una completa assenza di dislocazioni. Ciò entra in contrasto con il silicio monocristallino, che non prevede la presenza di dislocazioni, in cui quest'ultime dovevano essere completamente assenti in quanto sennò si arriva ad avere la perdita della struttura cristallina solo dopo pochi cm di crescita. Questa peculiarità di stabilità strutturale del tri-Si è attribuita ad una riduzione della croce di slittamento nella struttura del tri-Si.

Per quanto riguarda le proprietà elettriche, esiste una buona correlazione spaziale tra densità di dislocazione e lunghezza di diffusione del portatore minoritario: aree di alta densità di dislocazione mostrano bassi valori di lunghezza di diffusione.

Sebbene l'identificazione del difetto sia ancora in fase di realizzazione, si ha una buona correlazione dell'effetto con il boro e con l'ossigeno. Il Tri-Si è cresciuto con il doping del boro, utilizzando la tecnologia Cz standard, la figura 5.3 rappresenta un grafico in cui viene espressa la degradazione in funzione della resistività di base dopo una diffusione ed ossidazione di tipo P standard.

Figura 5.3



Degradazione della lunghezza di diffusione, rispetto alla resistività di base per il silicio tri-cristallino, misurato dopo un processo di diffusione ed ossidazione P standard.

Silicio multi cristallino

Il silicio multi cristallino, come quello cristallino, rappresenta la base della tecnologia fotovoltaica. Il silicio multi cristallino, rispetto a quello monocristallino, offre vantaggi per quanto riguarda i costi di produzione e tolleranza della materia prima e per una maggiore efficienza a rottura. Un altro vantaggio intrinseco riguarda la

⁴⁵ Necking: in ingegneria o scienza dei materiali, è una modalità di deformazione tensile in cui quantità relativamente grandi di deformazione si localizzano in modo sproporzionato in una piccola regione del materiale.

forma del wafer, rettangolo o quadrato, che offre un migliore utilizzo dell'area del modulo in confronto a quello dei wafer monocristallini, per lo più rotondi o pseudo quadrati.

Le efficienze del multi cristallino, nelle celle solari, sono influenzate da atomi di impurità attivi alla ricombinazione e ai difetti estesi come nei bordi di grano e nelle dislocazioni.

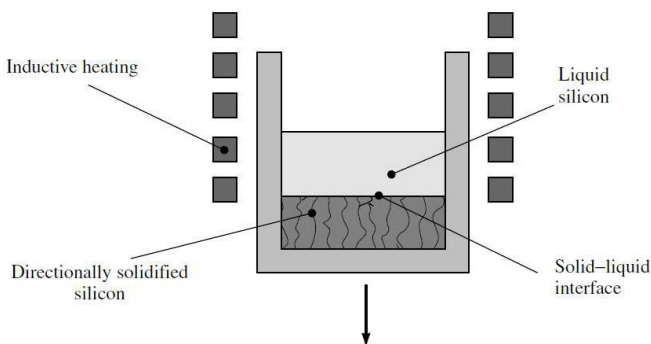
Un problema chiave, nel raggiungimento dell'elevata efficienza delle celle solari è un profilo di temperatura perfetto, sia per la produzione dei lingotti che per la produzione delle celle solari stesse, per controllare il numero e l'attività elettrica del difetto esteso.

Un passaggio importante, per il silicio multi cristallino, è la passivazione dell'idrogeno nella lavorazione delle celle solari. Si è notato che con la deposizione di strati di Si_3N_4 le efficienze delle celle solari sono state aumentate dal 14% al 15% della gamma di efficienza e di conseguenza anche il mercato si è spostato verso il silicio multi cristallino, come materiale standard del fotovoltaico.

Per la fabbricazione del silicio policristallino sono presenti due diverse tecnologie: quella di Bridgman e block casting. In entrambe le tecniche si ha solidificazione di lingotti di silicio policristallino ad alta qualità. La principale differenza tra le due tecniche è che in quella di Bridgman la fusione e la cristallizzazione avvengono in un solo crogiolo, mentre per la block casting si ha la cristallizzazione in un secondo crogiolo.

Bridgman: un crogiolo al quarzo, rivestito con nitruro di silicio, Si_3N_4 , viene solitamente impiegato per la fusione della materia prima di silicio e successiva solidificazione del lingotto multi cristallino. Il rivestimento Si_3N_4 serve da strato antiaderente, impedendo l'adesione del lingotto di silicio alle pareti del crogiolo di quarzo, che avviene con l'espansione del volume durante la cristallizzazione del materiale, che comporterebbe una distruzione sia del materiale che del crogiolo.

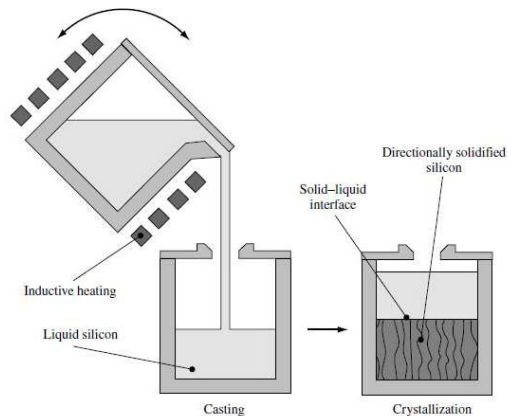
Figura 5.4 Illustrazione tecnica di Bridgman .



Tutt'ora utilizzata principalmente per la fabbricazione dei lingotti multi cristallini. Sia la fusione che la cristallizzazione del silicio vengono eseguite con rivestimento Si_3N_4 nel crogiolo di quarzo. La cristallizzazione si ottiene muovendo verso il basso il contenuto di silicio liquido fuori dalla zona calda riscaldata induttivamente nella camera di processo.

Block-casting: la fusione viene eseguita in un crogiolo di quarzo senza rivestimento, mentre in un secondo momento il silicio viene posto in un secondo crogiolo, rivestito di Si_3N_4 in cui avviene la cristallizzazione.

Figura 5.5 Illustrazione processo di fusione a Block-casting.



Dopo aver sciolto il silicio in una pentola di quarzo, il silicio stesso viene versato in un secondo crogiolo di quarzo con un rivestimento in Si_3N_4 . Con questo metodo è possibile realizzare tempi di cristallizzazione e raffreddamento più brevi impiegando un sistema di riscaldamento più variabile, rispetto a quello di Bridgman.

In entrambe le due tecnologie la parte di cristallizzazione inizia nella parte inferiore del crogiolo abbassando la temperatura di fusione, $1410\text{ }^\circ\text{C}$ del silicio.

In Bridgman la riduzione di temperatura si ottiene semplicemente scendendo il crogiolo contenente il silicio fuori dalla zona calda del forno di cristallizzazione. Mentre, nell'altro processo, il controllo della temperatura durante il processo di fusione è ottenuto da una corrispondente regolazione dei riscaldatori, mentre il crogiolo stesso viene spostato durante la solidificazione.

È presente una interfase liquido-solido, che si muove nella direzione verticale verso l'alto attraverso la cristallizzazione nel crogiolo. Questa comporta una crescita cristallina colonnare e di conseguenza i wafer adiacenti, fabbricati fuori dai lingotti mostrano un difetto quasi identico nelle strutture, confini e dislocazioni del grano. La velocità con la quale avviene la cristallizzazione deve essere presa in considerazione. Un processo con una velocità troppo elevata causa grandi gradienti termici all'interno del silicio solidificato che possono comportare crepe o persino alla distruzione del lingotto.

Il silicio multi cristallino standard è un materiale drogato di tipo p con il boro, elettrodo specifico di resistività di circa $1\Omega\text{cm}$, che corrisponde ad una concentrazione di boro di circa $2 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$. La resistenza specifica è regolata in modo tale che la cella solare presenti prestazioni ottimali garantite. Questa concentrazione può essere variata a seconda delle caratteristiche richieste alla cella solare. Essa è regolata aggiungendo la quantità equivalente di B_2O_3 alla materia, prima che il silicio inizi la fusione. Il boro è quasi sempre l'elemento ottimale per il drogaggio, che comporta solo un piccolo cambiamento di resistività sopra il lingotto di silicio.

Per il fosforo usato come drogante di tipo n, si ha lo svantaggio di avere una minore mobilità, cioè fori, ed un processo a celle solari più complicato da utilizzare, in quanto si hanno temperature più elevate nei vari processi di produzione. Inoltre, recenti studi, hanno indicato che l'attività dei difetti estesi in un silicio multi cristallino di tipo n sono inaspettatamente bassi, il che potrebbe rendere il materiale di tipo n una nuova fonte di alimentazione per il fotovoltaico.

I principali difetti nel silicio multi cristallino sono i confini dei grani e le dislocazioni. Questi due aspetti influenzano l'efficienza raggiungibile delle celle solari, dovuta alle loro concentrazioni ed anche alle loro attività elettriche. La dimensione dei grani possono comportare una degradazione o meno dell'efficienza delle celle solari; se tali dimensioni sono ancora abbastanza grandi le attività elettriche dei bordi del grano sono abbastanza basse. Confini e dislocazioni del grano, se elettricamente addebitato, attirano i vettori di minoranza e di conseguenza rappresentano centri di ricombinazione altamente attivi per portatori di carica foto-generati. L'attività elettrica dei confini e delle dislocazioni dei grani è determinata dalla loro decorazione delle impurità: un aumento di queste comporta un forte aumento di attività.

Nei moderni processi produttivi si è riscontrato che i confini dei grani mostrano solo le attività elettriche deboli e quindi sono generalmente considerate meno importanti per l'efficienza della cella solare. Le dislocazioni di cristallo, tuttavia, si sono rilevate i difetti più efficaci in termini di efficienza per le celle solari in silicio multi cristallino.

Nonostante il boro sia il drogante standard e quindi un'impurità introdotta intenzionalmente, si può osservare la presenza di altre impurità come l'ossigeno ed il carbonio.

La concentrazione di ossigeno interstiziale nel silicio multi cristallino è influenzata da due processi: l'incorporazione di ossigeno attraverso il crogiolo di quarzo durante la fusione e la perdita di questo attraverso l'evaporazione di SiO.

6. Celle e moduli solari in Silicio cristallino

Le celle e i moduli solari in silicio cristallino costituiscono oggi l'85% del mercato del fotovoltaico, nonostante stiano perdendo il "monopolio" a discapito di altre tecnologie avranno ancora per un po' il loro ruolo fondamentale.

Uno dei motivi per il quale questo materiale ha un ruolo importante, nell'ambito del fotovoltaico, è attribuibile alla microelettronica che ha sviluppato notevolmente la tecnologia di questo materiale.

I continui miglioramenti nelle prestazioni, nei rendimenti e nell'affidabilità hanno permesso un'importante riduzione dei costi e la successiva espansione del mercato del fotovoltaico. Il minor costo dei wafer mc-Si, silicio multi cristallino (MC), ha fatto sì che queste diventassero l'alternativa a quelle monocristalline. Uno studio più approfondito e dettagliato ha fatto sì che con il miglioramento del design si ha avuto una tecnologia più diffusa e di maggiore qualità. Una migliore qualità dei materiali e dell'elaborazione dei materiali ha permesso maggiori efficienze ad un costo ancora più basso.

Silicio cristallino come materiale fotovoltaico

Il silicio cristallino ha un gap di banda indiretto fondamentale $E_G=1.17$ eV e un gap diretto superiore a 3eV, a temperatura ambiente. Queste caratteristiche determinano la variazione di proprietà ottiche di Si con la lunghezza d'onda, compreso il basso coefficiente di assorbimento per la generazione dei portanti per fotoni a banda vicina. A lunghezze d'onda corte, ultraviolette (UV) nello spettro solare, si ha la generazione di due coppie di elettroni-lacuna per un fotone; all'altro estremo dell'assorbimento i vettori liberi compete con la generazione da banda a banda. La concentrazione intrinseca è un altro parametro importante correlato alla struttura della banda. Ad alte densità portanti, drogate o indotte, la struttura della banda viene alterata portando ad un aumento della concentrazione intrinseca effettiva: questo è uno degli effetti droganti pesanti che degradano la qualità del fotovoltaico, cioè regioni altamente drogate non migliorano la qualità di quest'ultimo.

Superfici: I contatti sono strutture costruite su una superficie di semiconduttore che consente ai vettori di carica di fluire tra il semiconduttore ed il circuito esterno. Nelle celle solari sono necessari i contatti per estrarre i vettori foto generati dal substrato assorbente del semiconduttore. Dovrebbero essere selettivi, cioè consentono solo a un tipo di portatore di fluire da Si a metallo senza perdita di energia, ovvero i portatori maggioritari, mentre dovrebbero bloccare il trasporto di portatori del verso opposto, quelli minoritari.

L'approccio più utilizzato è quello di creare regioni fortemente drogate sotto il metallo, di tipo p per il foro e di tipo n per l'estrazione di elettroni. Il contatto per le compagnie minoritarie è di solito posto nella faccia anteriore, illuminata, del substrato, e lo strato corrispondente, fortemente drogato, è di solito chiamato emittore. La regione drogata sotto il contatto di maggioranza, del portatore sul retro è chiamato Back Surface Field (BSF). In letteratura per indicare regioni ad elevati drogaggi si usano generalmente le nozioni p^+ e n^+ . La ricombinazione in queste regioni, fortemente drogate, è descritta dalla densità della corrente di saturazione J_0 che include il volume e la ricombinazione del vero contatto. Il loro spessore w , quello delle zone fortemente drogate, dovrebbe essere molto più alto della lunghezza di diffusione della portante minoritaria L ed il drogaggio abbastanza elevato in modo da ridurre la resistenza per i portatori maggioritari, ma non eccessivo in modo da evitare gli effetti indesiderati di un drogaggio pesante. La lega di alluminio presenta dei vantaggi rispetto al boro nei contatti p, garantendo la creazione di regioni a drogaggio elevato profonde ed un buon assorbimento dei portatori.

Superfici senza contatto: A causa della grave alterazione del legame degli atomi di Si, non vi sono presenti i contatti, ma si trovano, invece, molti "stadi trappola" nella banda proibita dovuti alla brusca interruzione del reticolo cristallino. Al fine di ridurre la ricombinazione superficiale, questo aspetto viene affrontato seguendo due approcci principali: nel primo, la densità degli stati superficiali degli elettroni nello spazio è diminuita, cercando di ripristinare la struttura del reticolo con l'aggiunta di un materiale isolante appropriato, come l'ossido di silicio SiO_x ; nel secondo viene effettuata un'operazione simile a quella descritta nei contatti, cercando di ridurre la densità dei portatori in eccesso. Questo può essere ottenuto con un drogaggio o con cariche nella superficie, come nell'elettrostatica di una struttura MOS.

Questi processi portano ad aver reso le superfici passive; la passivazione risulta molto più semplice ed efficace nelle zone prive di contatti. In conclusione, la ricombinazione su una superficie non contigua può essere resa molto più piccola rispetto a quella metallizzata, e questa ha una influenza profonda nell'evoluzione del design della cella solare Si.

Celle solari in Silicio cristallino

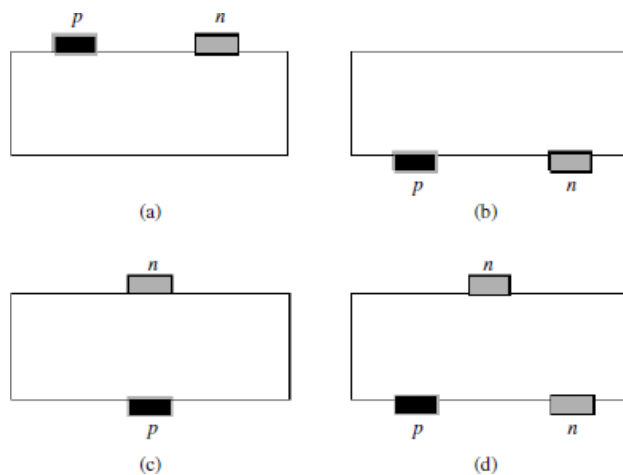
Diversi studi sono stati effettuati per trovare l'efficienza limitante e la struttura ottimale della cella solare al Si.

Si presuppone che tutte le perdite evitabili siano soppresse:

1. Assenza di perdite di riflessione ed assorbimento massimo ottenuto dall'intrappolamento della luce solare tramite tecniche ideali;

2. Ricombinazione minima: SHR e ricombinazione superficiale sono considerate evitabili e rimane solo la ricombinazione di Auger;
3. I contatti sono considerati ideali: né ombreggiamento né perdita di resistenza in serie;
4. Nessuna perdita di trasporto nel substrato: i profili portanti del substrato sono piatti, in modo che la ricombinazione sia il minimo possibile per una determinata tensione.

Figura 6.1 Rappresentazione delle quattro condizioni ideali:



- a. Entrambi i contatti nella parte anteriore: realizzazione della condizione 4, in cui i contatti dovrebbero essere posti sulla parte anteriore illuminata o frontale, più vicino alla foto generazione;
- b. Entrambi i contatti sul retro: realizzazione della condizione 3, considerata per la concentrazione: mettere entrambi i contatti sul retro funziona in senso inverso;
- c. I contatti su entrambe le facce: nella maggior parte delle celle, ogni contatto è posizionato su una faccia diversa, che è tecnologicamente più semplice
- d. Una portante estratta su entrambe le facce: si aumenta il volume dei profitti di foto generazione.

Substrato: Le massime efficienze si ottengono con il materiale a zona monocristallina (FZ-Si), che oltre alla perfezione cristallina esterna mostra i livelli di contaminazione più bassi.

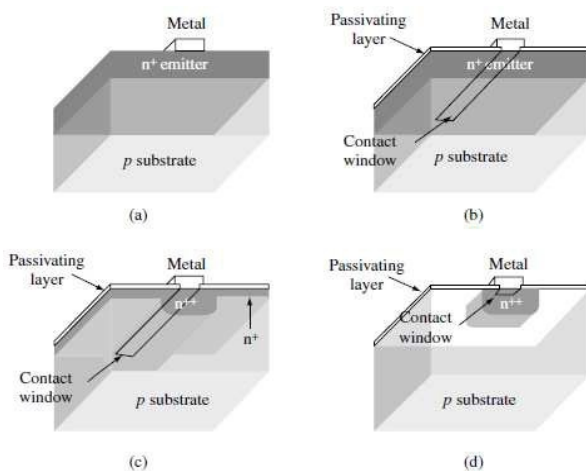
Le celle industriali utilizzano wafer Czochralski⁴⁶ (Cz-Si), in quanto sono molto disponibili. I wafer Cz sono anche cristalli perfetti, ma contengono un'alta concentrazione di ossigeno che deturpa la vita della cella. Alcuni dispositivi commercializzati sono realizzati con un substrato multi cristallino (mc-Si) fabbricati in blocchi o in nastri con procedure appositamente sviluppate per il fotovoltaico. Oltre ai difetti di cristallo, come i bordi dei grani o le dislocazioni, il potenziale contenuto è maggiore a causa della minore segregazione alla fusione durante il veloce processo di solidificazione. Questo fa sì che la durata delle celle mc-Si sia inferiore. La vita della cella è molto importante: in laboratorio vengono effettuate tutte le accortezze del caso per garantire una vita lunga alla cella, ma quando si passa alla fabbricazione, in cui l'ambiente di lavoro non è più il laboratorio le situazioni ambientali cambiano: oltre alla contaminazione ambientale, le impurità e i difetti del substrato si muovono, interagiscono e si trasformano ad alte temperature.

⁴⁶ *Czochralski:* Il processo Czochralski è una tecnica introdotta nei sistemi produttivi industriali agli inizi degli anni cinquanta, che permette di ottenere la crescita di monocristalli di estrema purezza. In ambito industriale tale processo è impiegato principalmente nella crescita di blocchi di silicio, che si ottengono con la forma di pani cilindrici. Il processo prende il nome dal ricercatore polacco Jan Czochralski, che lo sviluppò nel 1916 mentre stava studiando la cristallizzazione dei metalli.

Superficie Frontale: Le griglie metalliche vengono utilizzate nella parte anteriore per raccogliere i vettori in modo distribuito, nella parte esposta al sole. Il compromesso tra la trasparenza e la resistenza in serie richiede tecnologie di metallizzazione in grado di produrre linee metalliche molto strette ma spesse ed altamente conduttive con una bassa resistenza a contatto Si; la resistenza è inversamente proporzionale alla superficie del conduttore e direttamente proporzionale alla lunghezza. Sotto le linee metalliche, il substrato deve essere fortemente drogato per rendere selettivo il contatto. Di solito, la superficie drogata, l'emettitore, si estende su tutta la superficie frontale, fungendo da "elettrodo trasparente" offrendo ai portatori minoritari nel substrato un percorso a bassa resistenza alle linee metalliche.

Quando la superficie esposta non è passiva, l'emettitore dovrebbe essere il più sottile possibile, perché l'alto SRV rende la luce assorbita in questa regione di tipo scadente e anche altamente drogata per ridurre la ricombinazione. Bisogna raggiungere una resistenza del foglio bassa e per far sì che questo avvenga si rende molto sottile ed altamente drogato l'emettitore. Se la superficie è passiva, l'efficienza di raccolta dell'emettitore può essere innalzata abbassando il livello di drogaggio evitando così un livello pesante ed effetti dannosi.

Figura 6.2 Diverse strutture di emettitore:



- a. Emettitore omogeneo senza passivazione superficiale;
 - b. Emettitore omogeneo con passivazione superficiale;
 - c. Emettitore selettivo; la zona n presenta due profondità diverse: più stretta e meno drogata sotto lo strato di passivazione, più drogata e più spessa sotto il contatto.
 - d. Emettitore localizzato: quando si hanno bassissime velocità di ricombinazione superficiale, l'emettitore può essere anche evitato, creando così un contatto localizzato.
- Il punto debole di questi ultimi due esempi 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.

Effetti di taglia: I bordi del substrato sono superfici altamente ricombinanti che influenzano negativamente le prestazioni della cella, soprattutto per dispositivi di piccola dimensione e grande lunghezza di diffusione. L'emettitore è limitato dal mascheramento planare; il vero bordo viene posizionato lontano dal limite della cella, comportando così una riduzione della ricombinazione. Per le applicazioni reali, solo l'area del substrato conta e l'ottimizzazione dei bordi è più complessa.

Le dimensioni di celle grandi oltre ai problemi della fabbricazione di queste, comporta ad avere problemi di raccolta dell'energia, in quanto ne viene prodotta in maggior quantità, e questo fa sì che crescono le perdite

Joule: la resistenza longitudinale delle linee metalliche aumenta quadraticamente con la loro lunghezza: diminuisce l'efficienza con l'aumentare delle dimensioni.

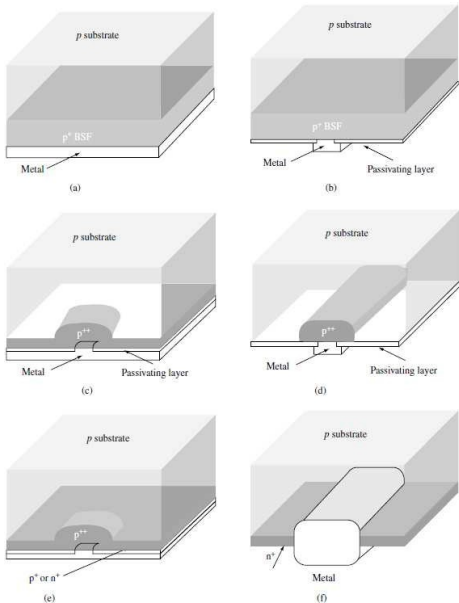


Figura 6.3 Strutture di contatto posteriore:

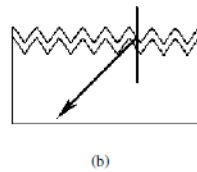
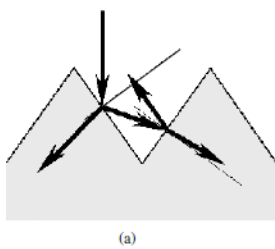
- a. BSF continuo
- b. Cellula bifacciale
- c. BSF locale
- d. BSF locale, cellula bifacciale
- e. Emettitore selettivo o passivazione di giunzione flottante
- f. Giunzione in cortocircuito alla faccia posteriore delle celle industriali

Ottica della cella: Le celle solari a piastre piatte in funzione sono illuminate da un'ampia porzione di cielo, non solo a causa delle componenti isotropiche della radiazione, ma anche dal movimento apparente del sole durante il giorno e in tutto il periodo dell'anno. Quindi per quanto riguarda la distribuzione angolare, queste celle devono essere in grado di accettare la luce da tutto l'emisfero. Si ha, inoltre, una variazione spettrale che varia nel corso del tempo, questo è dovuto al fatto che le condizioni meteorologiche variano. Ai fini della calibrazione, una distribuzione spettrale standard AM1.5 Global viene adottata come condizione rappresentativa, di solito 0.1 W/cm^2 . Una cella solare dovrebbe essere in grado di assorbire tutta la luce utile. Per una cella non incapsulata, la prima perdita che si riscontra è l'ombreggiatura della griglia metallica sulla faccia illuminata. Questa mancanza può ammontare a più del 10% per le celle industriali. Sebbene siano state proposte diverse tecniche per diminuire l'efficienza dell'ombreggiatura, la loro efficacia dipende dalla direzione della luce e quindi, questi accorgimenti, non sono adatti all'illuminazione isotropica. Successivamente, la perdita è dovuta dalla riflettanza dell'interfaccia Si, che è più del 30% per il Si nudo in quanto ha un alto indice di rifrazione. Se si applica uno strato di materiale con un indice di rifrazione più bassa (n_{ARC}), ne comporta la diminuzione di questa: questo è un caso di zero-flessione ad indice di rifrazione variabili. Rivestimento antiriflessivo ACR significa porre uno strato dielettrico otticamente sottile progettato per sopprimere la riflessione da effetti di interferenza. La riflessione è minima quando lo spessore è un multiplo

dispari di $n_{ACR}\lambda_0/4$, con λ_0 la lunghezza d'onda dello spazio libero, in quanto i componenti riflessi interferiscono in modo distruttivo. Di solito l'ACR è progettato per presentare il minimo a circa 600nm, dove il flusso di fotoni è un massimo dello spettro solare. Perché la riflessione diventi al minimo zero, l'indice di rivestimento dovrebbe essere la media geometrica di quelli di aria e silicio, cioè 2,4 a 600nm per le celle non incapsulate. L'industria utilizza TiO_x depositato mediante deposizione chimica in fase vapore (CVD). PECVD⁴⁷ SiN_x è molto interessante poiché funge anche da strato passivante. Utilizzando rivestimenti a doppio strato con design $\lambda/4$, con indici crescenti da aria a silicio, il minimo di riflessione è più ampio nella lunghezza d'onda. Il basso indice di SiO passivante in contatto con Si degrada le prestazioni dell'ACR. Lo strato SiO_x viene quindi reso sottile come è compatibile con la passivazione efficace.

Intrappolamento della luce: I fotoni a lunghezza d'onda lunga sono debolmente assorbiti nel silicio, e a meno che non siano alti i rifletti, sfuggiranno al substrato senza contribuire alla foto generazione. Lo scopo delle tecniche di intrappolamento della luce o di confinamento della luce è di ottenere elevate riflettanze⁴⁸ interne.

Figura 6.4 Effetti della testurizzazione della superficie:



- a. Diminuzione della riflessione;
- b. Aumento della fotogenerazione nella base.

Pratici specchietti retrovisori completamente compatibili con il design elettrico della cella, possono essere implementati. Un metallo può essere un buon riflettore, tuttavia Al dopo il trattamento termico, conferisce bassa riflettanza. Il metallo Si-ossido, figura 6.3c può presentare un'alta riflettanza sfruttando l'interferenza degli effetti. Quindi una struttura silicio-ossido-metallo può dare buoni risultati. Nella parte anteriore lo specchio metallico non è applicabile, perché i percorsi dei raggi solari devono essere mantenuti aperti per la luce in ingresso. Tuttavia, è possibile ottenere una riflettanza anteriore a causa della totale riflessione interna. Raggi che colpiscono la superficie con angoli maggiori rispetto all'angolo critico aria-Si vengono totalmente riflessi. La direzione di questi è del tutto casuale. L'effetto di un buon intrappolamento è quello di aumentare lo spessore di assorbimento effettivo della cella, essenziale per le celle a film sottile. Nell'ottica geometrica, è

⁴⁷ PECVD: La deposizione chimica da fase vapore al plasma(PECVD) è un processo di deposizione chimica da fase vapore utilizzato per depositare film sottili da uno stato gassoso (vapore) a uno stato solido su un substrato.

⁴⁸ Riflettanza: La riflettanza misura, in ottica, la capacità di riflettere parte della luce incidente su una data superficie o materiale. Essendo quindi il rapporto tra intensità del flusso radiante riflesso e intensità del flusso radiante incidente, è una grandezza adimensionale.

stato dimostrato che per un'illuminazione isotropica, il massimo fattore di aumento teorico è di $4/(n_{Si}/n_{air})^2$, che corrisponde all'imprigionamento di un raggio solare prima che questo riesca a scappare dalla cella e che attraversa lo spessore di questa per 50 volte.

Processo produttivo

Vengono illustrati i passaggi principali di un semplice processo per la fabbricazione di celle solari basate su serigrafia⁴⁹. Le virtù principali di questa tecnologia fotovoltaica sono facile automazione, affidabilità, buon utilizzo dei materiali e alta resa. Lo svantaggio è la penalità derivata dal metodo grossolano e aggressivo delle tecniche usate in metallizzazione.

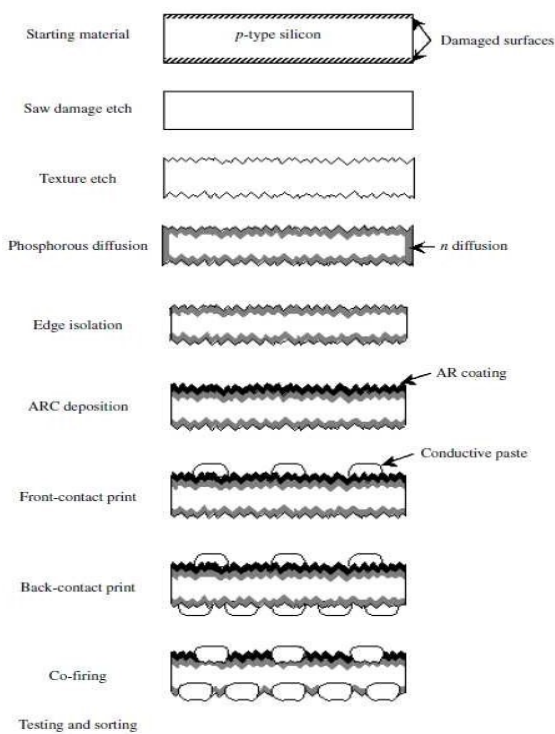


Figura 6.5 Illustrazione del processo per la formazione della cella.

Fase 1: materiale di partenza: vengono utilizzati i cosiddetti wafer Cz-Si di grado solare, rotondi dentro, ma molto spesso rifilati ad una forma pseudo-quadrata o quadrata multi cristallina. Le dimensioni del wafer sono tra 10-15 cm di lato e tra 200-300 μm di spessore. Il drogaggio è di tipo p, boro, con resistività di circa $1 \Omega \cdot \text{cm}$.

Fase 2: rimozione dei danni alla sega: l'operazione di taglio lascia la superficie dei wafer con un alto grado di danno. Questo comporta due problemi: la superficie è di pessima qualità e i difetti possono portare a fratture dei wafer durante la lavorazione. I wafer, posti in cassette di Teflon, vengono immersi in serbatoi contenenti la soluzione che tiene sotto controllo la temperatura e la composizione.

Fase 3: texturizzazione⁵⁰: è comunemente impiegata l'incisione di NaOH che porta le piramidi. Le loro dimensioni devono essere controllate, dal momento che, anche se piccolissime, portano ad un alto riflesso, mentre quelle molto grandi possono ostacolare la formazione dei contatti. Per garantire una texturing

⁴⁹ *Serigrafia:* La serigrafia o stampa serigrafica è una tecnica di stampa di tipo permeo grafico che oggi utilizza come matrice un tessuto di poliestere, teso su un riquadro in legno o metallo o plastica definito "quadro serigrafico" o "telaio serigrafico".

⁵⁰ *Texturizzare:* Lavorare una superficie liscia e uniforme praticandovi incisioni fitte e minute che la rendono ruvida.

completa e dimensioni adeguate delle piramidi, la concentrazione, la temperatura e l'agitazione della soluzione e la durata del bagno devono essere controllate.

Fase 4: diffusione di fosforo: il fosforo è universalmente usato come drogante di tipo n per il silicio nelle celle solari. Poiché la diffusione allo stato solido richiede temperature elevate, è molto importante che le superfici siano prive di contaminazioni prima dell'elaborazione. A fine elaborazione i wafer vengono sottoposti a degli acidi per neutralizzare i resti alcalini ed eliminare le impurità metalliche assorbite.

Fase 5: isolamento della giunzione: la regione di tipo n sui bordi del wafer interconetterebbe la parte anteriore con i contatti posteriori. Per rimuovere queste regioni, viene praticata un'incisione a secco, una procedura a bassa temperatura.

Fase 6: deposizione dell'ARC: il diossido di titanio (TiO_2) è spesso usato per creare il rivestimento antiriflessivo, poiché ha un indice di rifrazione quasi ottimale per le celle incapsulate. Una tecnica, molto usata, è la deposizione chimica da vapore a pressione atmosferica (APCVD) del titanio in composti organici ed acqua: la miscela viene spruzzata sul wafer a $200^\circ C$ ed il composto idrolizza sulla superficie.

Fase 7: stampa a contatto frontale ed asciutta: i requisiti per la metallizzazione frontale sono a contatto ridotto al silicio, bassa resistività alla rinfusa, larghezza della linea ridotta con proporzioni elevate, buona adesione meccanica, saldabilità e compatibilità con l'incapsulamento dei materiali. La resistività, il prezzo e la disponibilità rendono l'argento l'ideale scelta come materiale di contatto. La stampa serigrafica è utilizzata per attaccare una pasta contenente polvere d'argento alla faccia anteriore del wafer nel modello comb-like.

Fase 8: stampa a contatto posteriore ed asciutta: le stesse operazioni vengono eseguite sul retro della cella, tranne per il fatto che la pasta contenente l'argento e l'alluminio siano stampate in modo diverso. L'alluminio è richiesto per evitare che si formino contatti ohmici con p-Si. La bassa temperatura eutettica del sistema Al-Si sta ad indicare che un po' di silicio sarà dissolto e quindi ricristallizzato al raffreddamento in uno strato di tipo p. Sebbene in linea di principio un contatto continuo fornisca prestazioni elettriche migliori, resistenza inferiore, la maggior parte dei wafer commerciali presenta un contatto posteriore con una struttura reticolare: è dovuto al fatto che i diversi coefficienti di espansione produrranno deformazioni della cella durante il successivo passaggio termico.

Fase 9: co-combustione di contatti metallici: è ancora necessario un passaggio ad alta temperatura: i componenti organici della pasta devono essere bruciati, i grani metallici devono sinterizzare insieme per formare un buon conduttore, e devono formare un contatto elettrico con il silicio sottostante. Al momento della cottura, il componente attivo della pasta anteriore deve penetrare nel rivestimento dell'ARC per

contattare il n-emettitore senza metterlo in cortocircuito: una temperatura di cottura elevata motiverà l'argento a raggiungere attraverso l'emettitore di contattare la base.

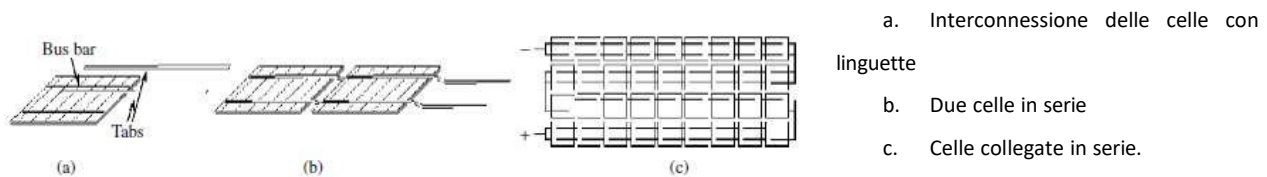
La pasta dorsale a sua volta deve perforare completamente l'emettitore posteriore parassita raggiungendo la base durante la cottura.

Moduli fotovoltaici in silicio cristallino

Il potere di una singola cella solare è piccolo, bisogna che vengono associate elettricamente per formare un generatore pratico. Il modulo è l'unità di costruzione per i generatori che può essere acquistato sul mercato, ovvero, è il vero prodotto fotovoltaico. Prestazioni e durata dei sistemi FV dipendono dalla protezione che la costruzione del modulo offre al sistema attivo dei dispositivi fotovoltaici.

In un modulo, le celle sono solitamente disposte in serie. Dopo la finitura cellulare, vengono saldati dei nastri di rame stagnato alle sbarre del bus nella parte anteriore⁵¹. Le lunghezze delle schede devono sovrapporsi ad una lunga distanza lungo la lunghezza della sbarra poiché la conduttanza delle barre stampate sono troppo basse.

Figura 6.6 Rappresentazione dei moduli



Vengono utilizzate due schede per cella, fornendo così ridondanza che consente alla corrente di fluire nel caso in cui la continuità elettrica venga interrotta a causa di un guasto. Le schede forniscono un collegamento non rigido tra le celle che consentono espansioni termiche ospitate nell'interconnessioni in serie delle stringhe mediante saldatura delle linguette sul retro di una cella adiacente. Le stringhe sono interconnesse con le schede ausiliarie per formare la matrice cellulare. Se le stringhe non sono parallele internamente, i loro terminali sono portati fuori dal modulo in modo da consentire la configurazione flessibile del circuito. Una configurazione di modulo comune utilizza 36 celle collegate in serie, che producono circa 15 V alla massima potenza.

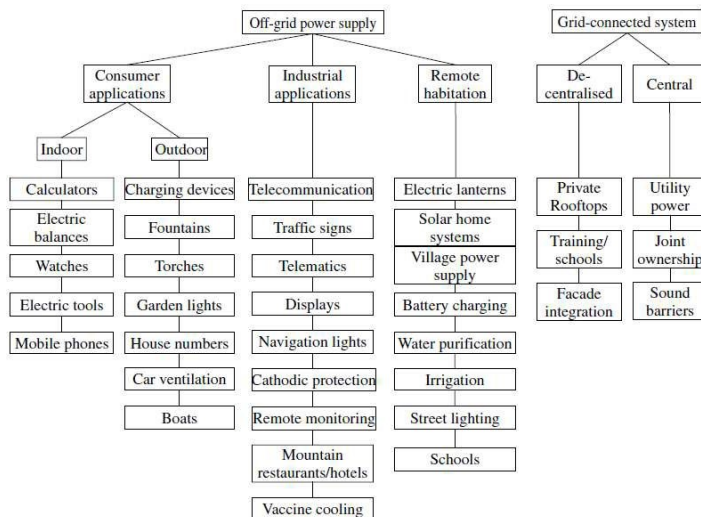
⁵¹ *Bus bars*: In distribuzione di energia elettrica, una sbarra è un nastro metallico o bar, tipicamente alloggiata all'interno del quadro, quadri elettrici, e recinzioni blindo per una distribuzione di corrente massimo locale. Sono anche utilizzati per collegare apparecchiature ad alta tensione a casse elettriche e apparecchiature a bassa tensione nei banchi batterie.

7. Sistemi fotovoltaici

Introduzione ai sistemi fotovoltaici e varie forme di applicazioni

La natura modulare dei generatori fotovoltaici, composta da moduli fotovoltaici, ovvero il sistema di approvvigionamento energetico può essere costruito per una potenza di gamma estrema. Lo spettro di potenza va da pochi milliwatt, per orologi da polso o calcolatrici scientifiche, a sistemi di kilowatt per alimentazioni di aree remote, alle centrali fotovoltaiche (PV) che producono megawatt.

Figura 7.1 Aree di applicazione dei sistemi fotovoltaici.

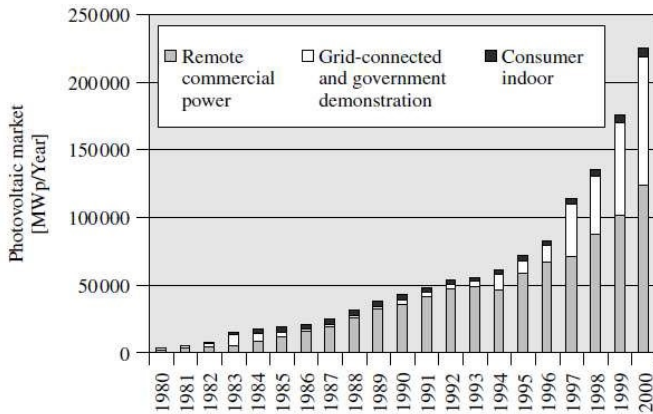


Le applicazioni sono suddivise in Sistemi "off-grid" e "grid-connected"

Inizialmente il fotovoltaico era considerato un metodo costoso per la produzione di energia elettrica. Nella situazione di off-grid, tuttavia, è risultato il metodo più economico per la produzione e la fornitura del servizio elettrico richiesto. Il mercato in crescita dappertutto il mondo, indica che l'energia solare non è più vista con scetticismo, ma è sempre più consapevole il vantaggio che può portare questa fonte di energia sostenibile. Inoltre, anche in Italia, il forte interessamento da parte di privati, aziende e governi, contribuisce lo sviluppo di un sistema di fornitura elettrica sempre più all'avanguardia delle tecniche; questo è affiancato anche alla riduzione del costo per la produzione di massa dei sistemi fotovoltaici che aiuta all'espansione di nuovi campi di applicazione.

La [figura 7.2](#) mostra come lo sviluppo del mercato per i moduli fotovoltaici, evidenzi tass di crescita superiori del 15% all'anno, negli anni ottanta, che arrivano anche al 40% alla fine degli anni novanta.

Figura 7.2 Sviluppo del mercato dei moduli foto voltaici negli anni 1980-2000



Come si può notare circa il 45% dei moduli installati nel 2000 è stato collegato alla rete elettrica pubblica. Queste applicazioni includono sia i sistemi più piccoli decentralizzati, con moduli solari tipicamente installati sui tetti, che grandi sistemi centrali, con ampie aree di moduli solari, solitamente montati su strutture di supporto.

Principi del sistema di alimentazione e configurazione del fotovoltaico e applicazioni

I sistemi fotovoltaici sono sistemi di produzione di energia solare, che forniscono direttamente energia alle apparecchiature elettriche o immettono energia nella rete pubblica.

L'alimentazione elettrica per elettrodomestici e per altri piccoli carichi, nella gamma di potenza che partono da pochi milliwatt a diverse centinaia di watt vengono applicati direttamente a causa del miglior rapporto costo-efficienza rispetto ad una connessione in rete. Altri vantaggi, che vengono offerti, sono la loro affidabilità, portabilità e la loro produzione di energia rispettosa dell'ambiente. I sistemi di generazione solare possono variare nelle dimensioni: da sistemi molto piccoli, costituito da una sola cella solare, a dimensioni un po' più consistenti in cui vengono impiegate più celle solari, collegate tra di loro per formare moduli solari, per la produzione di energia.

Un aspetto importante è quello in cui è prevista un'unità di accumulo di energia per colmare i tempi in cui non vi è luce o la luce è insufficiente per l'alimentazione dell'apparecchio. Le batterie ricaricabili al nichel-cadmio sono utilizzate nella maggior parte degli apparecchi alimentati da fotovoltaico, ma batterie e condensatori al piombo-acido (supercaps) possono anche essere usati. Negli impianti fotovoltaici per case continuamente occupate e sottoposte a cicli di carica/scarica giornalieri, le batterie usate sono batterie industriali heavy-duty, i cosiddetti "OpzS" batterie: sono caratterizzati da un'autoscarica molto bassa, con una tolleranza estremamente buona al ciclismo che comporta una lunga vita operativa. I costi relativi alla vita di un sistema sono altamente

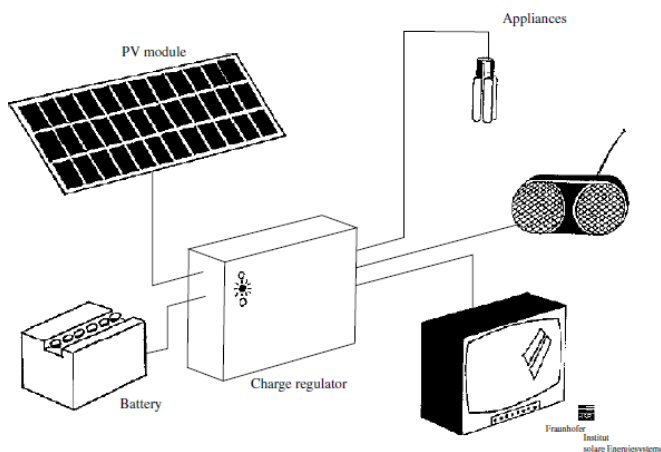
dipendenti dai costi della batteria: un'attenta selezione della tecnologia, più adatta all'applicazione e al rispettivo funzionamento, associati ai regimi di gestione sono fondamentali per un uso soddisfacente del sistema stesso.

Tra il generatore solare e la batteria è incluso un regolatore di carica per evitare che il sistema venga sovraccaricato o scaricato in profondità. Il controller di carica di solito ha un blocco, che impedisce alla batteria di scaricarsi durante la notte, un buon regolatore di carica ha un consumo energetico interno molto basso e include un interruttore di blocco carico che protegge la batteria dallo scarico. Un'energia condizionata potrebbe essere necessaria per adattare il livello di tensione del sistema fotovoltaico a quello del carico: questo solitamente è un convertitore DC/CD⁵² che trasforma una tensione continua all'altra. Se la tensione CA⁵³ è richiesta da un'utente, un inverter deve essere applicato: questo converte la tensione CC, fornita dal generatore solare o dalla batteria, ad una tensione CA.

Sistemi solari domestici

A 50 W il modulo fotovoltaico, dimensioni circa 50x100 cm², fornisce l'energia per tre lampade e un televisore in bianco e nero in una sola casa.

Figura 7.3 Schema a blocchi di un Solar Home Systems



Rappresentazione di un sistema in grado di coprire la domanda base di elettricità, illuminazione e comunicazione, nelle famiglie rurali.

⁵² *Corrente continua*: In elettrotecnica la corrente continua (CC o DC, dall'inglese: Direct Current) è un tipo di corrente elettrica caratterizzata da un flusso di intensità e direzione costante nel tempo.

⁵³ *Corrente alternata*: In elettrotecnica la corrente alternata (CA o AC dall'inglese: Alternating Current) è un tipo di corrente elettrica caratterizzata dal fatto di invertire la polarità elettrica continuamente nel tempo. In sostanza, a differenza della corrente continua, in cui la polarità è fissa ed invariabile, in alternata il polo positivo diventa negativo e viceversa con un'alternanza (da cui il nome) che avviene con periodicità fissa (tipicamente 50 Hz o 60 Hz).

Una batteria al piombo, con regolatore di carica, immagazzina l'energia del giorno per la notte che può durare per due o tre giorni nuvolosi. In molte situazioni, il Solare Home Systems (SHS) offre vantaggi rispetto al classico modo di approvvigionamento dell'elettricità, in quanto quest'ultimo è scarsamente esteso nelle regioni più rurali e con condizioni ambientali ostili. Nonostante ci sia un vantaggio ed una miglioria delle condizioni per quei nuclei famigliari che vivono in zone geografiche difficili, il basso consumo energetico fa sì che non vi sia un adeguato investimento finanziario. Questa mancanza di interesse comporta una scarsa qualità dell'alimentazione elettrica, di queste zone, che può essere osservata in molte regioni del mondo. Una soluzione, per porvi rimedio, viene fornita dalla maggiore privatizzazione dell'alimentazione elettrica che incentiva la crescita e la modernizzazione anche per queste aree difficili. In termini di costi, il fotovoltaico, a primo impatto potrebbe sembrare una soluzione costosa, ma se si vanno ad analizzare i costi per quei sistemi che hanno piccoli generatori a diesel, si può notare che quest'ultimi, che possono risultare inizialmente economici, nel corso del tempo hanno bisogno di manutenzioni continue e il costo stesso del gasolio per il loro funzionamento risultano una scelta svantaggiosa, a fronte del sistema fotovoltaico che non ha bisogno di grandi manutenzioni. Perciò l'elettrificazione decentralizzata con Solar Home Systems, finanziata privatamente, risulta essere la scelta migliore per un'elettricità rurale sostenibile e vantaggiosa: garantisce l'informazione, la comunicazione per gli utenti privati; allunga il tempo giornaliero di lavoro, fino a tarda sera; fornisce elettricità a strutture quali scuole, centri sociali che hanno un ruolo fondamentale per la crescita e lo sviluppo dell'economia.

Sistemi fotovoltaici ibridi

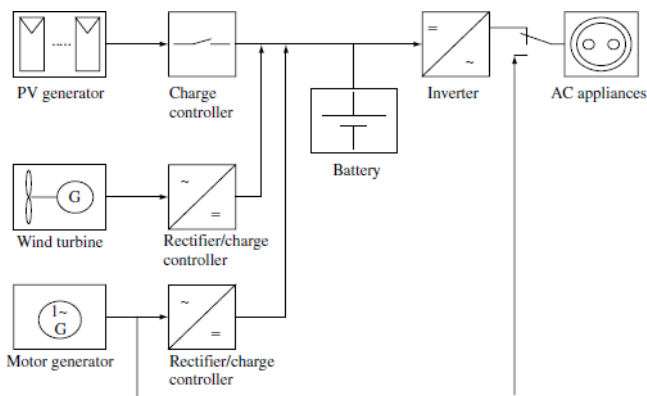
Se è necessaria una potenza maggiore o se si utilizzano elettrodomestici e apparecchiature industriali devono essere utilizzati, è auspicabile, una tensione di sistema di 230 o 110 V in corrente alternata. Aumentare l'affidabilità dei sistemi di alimentazione e ridurre l'investimento dei costi per un certo servizio energetico, sistemi più grandi, cioè il consumo di diversi chilowatt al giorno, sono in genere costruiti come sistemi "ibridi", cioè la combinazione di un generatore diesel e un generatore fotovoltaico. A seconda della disponibilità delle risorse naturali, altri generatori di elettricità, come i convertitori eolici o idroelettrici, quali le centrali, possono essere utilizzati per integrare il sistema di alimentazione. Una batteria assicura che la potenza sia disponibile continuamente. In condizioni climatiche favorevoli, la domanda totale di energia del consumatore è soddisfatta dal generatore solare che opera silenziosamente e senza gas di scarico. L'energia in eccesso è immagazzinata nelle batterie: durante la notte o in condizioni climatiche sfavorevoli, la domanda di energia viene soddisfatta

attraverso l'energia immagazzinata dalle batterie. Quando queste sono in condizioni di profonda scarica, il generatore diesel o a gas fornisce l'elettricità e carica contemporaneamente la batteria.

Un inverter converte la corrente continua della batteria, generata dal sistema, a 230 V alternando corrente in modo che tutti gli apparecchi elettrici convenzionali possono essere azionati.

Diversi generatori funzionano tramite controller/raddrizzatori di carica separati per la corrente continua. Un inverter genera l'onda sinusoidale CA desiderata, creando la rete CA in frequenza e tensione; se la generazione ed il consumo sono uguali, la batteria non prende parte al flusso di energia. In caso contrario, la batteria memorizza l'eccedenza di potenza generata o eroga la potenza aggiuntiva mancante. Al fine di proteggere la batteria contro i danni, un regolatore di carica, nella maggior parte dei casi il regolatore di carica PV, disconnette l'inverter prima che la batteria si scarichi completamente.

Figura 7.4 Illustrazione sistema ibrido



Il cuore di un sistema accoppiato AC è un inverter bidirezionale. I moduli del fotovoltaico e tutti i generatori sono collegati ad una barra bus AC tramite adatti inverter. Così, i consumatori di AC vengono alimentati con l'elettricità, e solo l'eccedenza di energia è rispedita alle batterie di accumulo. La gestione dell'alimentazione è effettuata da un solo dispositivo di accumulo: l'inverter bidirezionale. Esso deve essere in grado di lavorare in diverse modalità: caricare e scaricare la batteria; deve costruire la rete AC locale in frequenza e tensione e deve essere sincronizzato con qualsiasi altro generatore elettrico cronico del sistema.

Dimensionamento di un sistema fotovoltaico

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 ed 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 deve 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.

Il dimensionamento ottimale è quello che garantisce il 70% di autoconsumo medio annuale, garantendo la migliore correlazione tra produzione annuale dell'impianto e l'autoconsumo medio dell'utente. Si parla sempre di stime annuali perché, come si può intuire, la produzione fotovoltaica è soggetta alla forte influenza della stagionalità. Più si riesce ad elevare la quota di consumo diurno, più l'impianto fotovoltaico consentirà di risparmiare. Un modo per elevare la quota di consumo diurno può essere quella di sostituire gradualmente i tradizionali apparecchi a gas, caldaia, cucina, riscaldamento, con apparecchi elettrici in grado di sfruttare al meglio la produzione dell'impianto. In questo modo si avranno anche benefici del gas metano.

8. Stoccaggio elettrochimico per il fotovoltaico

Introduzione

La disponibilità di energia solare non è solo diversa rispetto al rendimento annuale, ma varia anche nelle stagioni dell'anno, durante il giorno e la notte e di giorno in giorno, a causa delle condizioni meteorologiche. Così fanno i carichi elettrici⁵⁴: per bilanciare il diverso tempo di carico e produzione, l'accumulo di energia deve essere incluso in quasi tutti i sistemi di alimentazione autonomi. Pochi sistemi di alimentazione fotovoltaica (PV) non hanno il sistema di accumulo della batteria.

Gli alimentatori autonomi con alimentazione fotovoltaica, producono energia per gli apparecchi che vanno da quelli di piccole dimensioni con pochi requisiti di potenza, milliwatt, a quelli di grandi sistemi di alimentazione con circa 10 kW di potenza richiesta.

Le tecnologie di archiviazione più promettenti, per le applicazioni trattate, sono i sistemi elettrochimici. La batteria al piombo è ancora, e lo sarà ancora per un po' di tempo, il cavallo da lavoro per sistemi di alimentazione autonomi. Gli effetti dell'invecchiamento sono limitati e le strategie di controllo consentono di ottimizzare e di aumentare la durata della batteria e un notevole riduzione dei costi complessivi del sistema. Per la memorizzazione di grandi quantità di energia, con requisiti di bassa potenza, sono in fase di sviluppo sistemi di storage⁵⁵, con unità di storage e di conversione di energia separate. Questi sono i sistemi di stoccaggio dell'idrogeno con un elettrolizzatore ed una cella a combustione come convertitori e sistema di batteria redox. Quest'ultimi utilizzano ioni caricati dai Sali di metallo disciolti in liquidi come mezzo di memorizzazione ed un'unità di conversione del tutto simile ad una cella a combustione.

⁵⁴

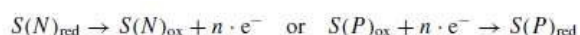
Carico elettrico: In elettrotecnica, il carico è un qualsiasi circuito- anche costituito da un singolo elemento - che collegato all'uscita di un altro circuito ne assorbe potenza. In alternativa, il carico è la potenza assorbita dallo stesso circuito. Il carico influenza il comportamento del circuito a cui è collegato, nel senso che da esso dipendono i valori di tensione e corrente in uscita.

⁵⁵

Storage: In ambito informatico con il termine storage si identificano i dispositivi hardware, i supporti per la memorizzazione, le infrastrutture ed i software dedicati alla memorizzazione non volatile di grandi quantità di informazioni in formato elettronico.

Concetto generale di batteria elettrochimica

L'elemento base di ogni batteria è la cella elettrochimica. Si hanno un elettrodo positivo ed uno negativo immersi in un elettrolito⁵⁶. Le sostanze reattive, i materiali reattivi, sono immagazzinati negli elettrodi. Si verificano due reazioni chimiche ed elettrochimiche, reazioni degli elettrodi, su entrambi gli elettrodi, che rilasciano o assorbono elettroni secondo:



N e P indicano elettrodi negativi e positivi, S_{red} e S_{ox} indicano lo stato ridotto e quelli ossidati dei composti chimici che reagiscono e n è il numero di elettroni coinvolti nel processo. La possibilità di dividere la reazione cellulare in due separate, le reazioni degli elettrodi, è un prerequisito decisivo per la realizzazione di qualsiasi cella elettrochimica. Solo allora è possibile raccogliere lo scambio di elettroni collegato alle reazioni agli elettrodi, come una corrente che scorre attraverso il consumatore, o il dispositivo di ricarica, e l'energia di ingresso o di uscita collegati con la reazione chimica che li converte in energia elettrica. La carica sarebbe scambiata direttamente tra le sostanze che reagiscono e l'energia rilasciata sarebbe convertita prevalentemente in calore e in una certa misura in energia volumetrica.

Il sistema di stoccaggio elettrochimico si basa sulla conversione di energia chimica in energia elettrica e viceversa. La quantità di energia che può essere immagazzinata nella cella è determinata dal diverso contenuto energetico delle sostanze chimiche che rappresentano gli stati carichi e scarichi. Di conseguenza, i parametri caratteristici del sistema sono determinati da un numero di reazioni elettrochimiche e dai cambiamenti energetici collegati a queste reazioni. Queste reazioni provocano le reazioni della cella che caratterizzano il sistema di batteria. Le leggi della termodinamica generalmente si applicano all'equilibrio; nella cella elettrochimica, questi dati possono essere misurati quando nessuna corrente scorre attraverso la cella o gli elettrodi. Questo equilibrio permette evidenza che i parametri termodinamici non dipendono dal percorso della reazione; dipendono solo dalla differenza fra i componenti finali ed iniziali della reazione elettrochimica. Le leggi, quindi, evidenziano il possibile limite superiore dei dati sulle prestazioni. Non appena la corrente attraversa la cella, le perdite di energia si verificano a causa di restrizioni cinetiche e resistenze ohmiche. Lo

⁵⁶ *Elettrolita*: Il termine "elettrolita" si riferisce alla capacità di condurre la corrente elettrica grazie all'intervento di ioni, caratteristica peculiare di queste specie chimiche. Un elettrolita costituisce quindi quello che viene definito conduttore ionico o, alternativamente, conduttore di seconda specie. Gli elettroliti sono capaci di condurre corrente elettrica, una volta sciolti in soluzione, proprio per la presenza di ioni positivi e negativi nella soluzione generata, derivati dalla dissociazione e ionizzazione dell'elettrolita.

scambio di energia, collegato alle reazioni elettrochimiche è descritto da i seguenti Parametri termodinamici, come differenza tra lo stato iniziale e finale della reazione.

- Entalpia della reazione ΔH , che descrive la quantità di energia rilasciata o assorbita. Deriva dal contenuto energetico dei composti chimici H.

- Entalpia libera della reazione ΔG , detta anche energia libera di Gibbs, che rappresenta la massima quantità di energia chimica che può essere convertita in energia elettrica e viceversa.

- Entropia ΔS , che caratterizza la perdita di energia o il guadagno connesso alla sostanza chimica o processo elettrochimico. Il prodotto $T\Delta S$ rappresenta lo scambio di calore con l'ambiente quando il processo avviene in modo reversibile.

T è la temperatura assoluta; la relazione più importante tra questi tre parametri è data dalle seguenti formule:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

Poiché ΔG descrive la quantità di energia che può essere convertita in energia elettrica, la relazione tra l'energia libera di Gibbs e la tensione di equilibrio E_0 della cella può essere descritta: $\Delta G = -n \cdot F \cdot E_0$, dove n rappresenta il numero di scambi di cariche, F è la costante di Faraday e nFE_0 descrive l'energia elettrica generata.

Il coefficiente di temperatura del potenziale della cella di equilibrio può essere derivato dalla seguente relazione termodinamica:

$$\frac{dE_0}{dT} = -\frac{\Delta S}{n \cdot F}$$

I calcoli termodinamici sono sempre basati su una cella completa e sulla tensione derivata, si fa riferimento alla differenza di potenziale tra due elettrodi. La differenza potenziale tra l'elettrodo⁵⁷ e l'elettrolita, il potenziale assoluto, non può essere determinato.

⁵⁷ *Elettrodo*: Un elettrodo è un conduttore di prima specie (per esempio metallo o grafite) usato per stabilire un contatto elettrico con una parte non metallica di circuito (per esempio un semiconduttore, un elettrolita o il vuoto).

9. Condizioni di potenza per il sistema fotovoltaico

Nei sistemi fotovoltaici, le unità di condizionamento sono utilizzate per fornire una corrispondenza tra le specifiche caratteristiche del generatore FV e dei componenti del sistema di bilanciamento collegato (BOS). In generale, la curva caratteristica di un generatore fotovoltaico varia in base alla radiazione solare e la temperatura non corrispondente alla curva caratteristica del carico. In questi casi, l'unità di condizionamento d'energia effettua una trasformazione della tensione e della corrente in modo tale che il generatore fotovoltaico venga azionato alla sua tensione operativa ottimale anche VMPP.

In quasi tutti i sistemi stand-alone, è necessario un regolatore di carica per ottimizzare e far funzionare la batteria nei limiti di sicurezza prescritti dal produttore. L'abbinamento del generatore FV e del carico può essere ottenuto tramite DC/DC convertitori che possono essere parte integrante di un regolatore di carica, un inverter o una pompa DC, ma può essere anche un componente BOS separato. Se nei sistemi stand-alone il carico richiede una tensione CA, gli inverter sono abituati a convertire la corrente continua, che viene fornita dal generatore fotovoltaico o dalla batteria di accumulatori in corrente alternata. Gli inverter sono obbligatori nei sistemi fotovoltaici collegati alla rete. Oltre all'elevata efficienza, qualità dell'alimentazione, la sicurezza è una questione importante e deve essere affrontata.

Controlli e monitoraggio della carica dei sistemi per batterie in sistemi di energia fotovoltaica

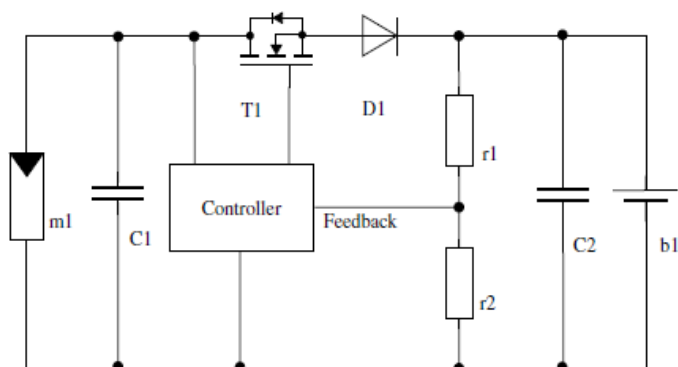
Nei sistemi fotovoltaici, le batterie sono ancora le componenti con la vita media più bassa. Rispetto ai moduli solari, che in linea di principio hanno una vita economica infinita, in molti casi offrono un periodo di garanzia di 25 anni, la durata delle batterie è molto più bassa. La durata massima, riscontrata nella pratica è di circa 8-10 anni; nella maggior parte dei casi è nell'intervallo di 3-6 anni. Il limite superiore sarà determinato dal normale invecchiamento.

Regolatori di carica: il compito fondamentale di un regolatore di carica è di far funzionare la batteria entro i limiti di sicurezza, definito in relazione al sovraccarico e alla scarica profonda da parte del produttore della batteria o della modalità operativa. La carica e l'energia sono molto limitate e dipendono dalla diversa insolazione e dalla domanda di carico. Un'elevata efficienza energetica, inoltre, è fondamentale per tutti i componenti della bilancia del sistema fotovoltaico.

Regolatori di carica lineare: in un regolatore di carica lineare, la corrente di carica verrà regolata da un elemento di controllo finale che agisce continuamente e si trova in serie o in parallelo con il generatore solare.

Guidando l'elemento di controllo in modo appropriato, la tensione della batteria può essere controllata in modo tale che non superi il limite di fine carica.

Figura 9.1 Schema circuitale a blocchi di un regolatore di carica lineare in serie.



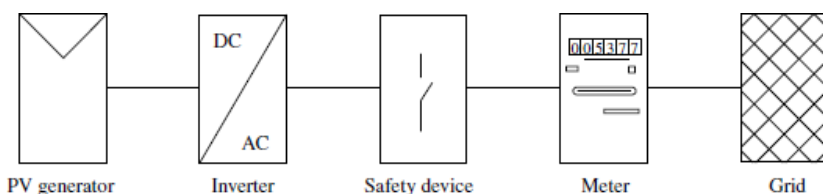
Nella fase a corrente costante, CC, in cui la tensione della batteria è inferiore alla fine della tensione di carica, l'elemento di controllo MOS-FET T1 è completamente conduttivo. Il generatore solare e la batteria sono accoppiati direttamente tramite il diodo di blocco D1. Il punto operativo del solare, il generatore, è determinato dall'insolazione istantanea e dalla

tensione della batteria. Le perdite all'interno dell'elemento di controllo, in questa fase sono trascurabili. La potenza aggiuntiva, dovuta alle perdite causate dalla caduta di tensione attraverso il diodo di blocco D1, che nella maggior parte dei casi è un diodo Schottky con una caduta di tensione diretta molto bassa. Per ridurre al minimo le perdite di potenza, il diodo di blocco può essere sostituito da un secondo MOS-FET collegato back-to-back in serie con T1. Con tali disegni, bisogna fare attenzione che entrambi i MOS-FET si spengano di notte, e che nessuna corrente inversa sfocia nel generatore solare.

Inverters

Questa configurazione consiste principalmente nelle seguenti componenti: il generatore fotovoltaico, l'inverter, i dispositivi di sicurezza e in molti casi il contattore elettrico.

Figura 9.2 Struttura generale di un impianto fotovoltaico collegato alla rete



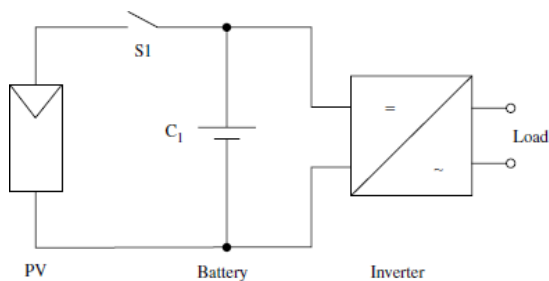
La potenza effettiva, immessa nella rete, può essere stimata moltiplicando la potenza attuale del generatore PV con l'effettiva efficienza dell'inverter, se si trascurano le perdite nel dispositivo di sicurezza e nel contattore. Più importante è l'energia prodotta dopo un certo periodo di tempo, ad esempio dopo un anno di funzionamento.

In questo caso l'efficienza media dell'inverter, che tiene conto di tutte le condizioni di carico di tutto l'anno, diventa importante. L'inverter deve consentire al generatore PV di operare nel MPP regolando la tensione di funzionamento corrispondente. Molti inverter regolano in continuazione questa tensione operativa sull'MPP, punto di massima potenza: questo funzionamento è chiamato tracking del punto di massima potenza, MPPT. Il metodo più comunemente utilizzato è quello di cambiare la tensione di ingresso effettiva in modo tale da ottenere la massima potenza. La simulazione ha dimostrato che per i sistemi PV collegati alla rete, tramite cavi CV, subisce perdite comprese tra l'1% e il 2%, se regolati correttamente.

Inverter per il funzionamento autonomo: Questi tipi di inverter sono spesso forniti da batterie. Devono fornire tensione e frequenza costanti ai carichi indipendentemente dal profilo del carico effettivo. Nel caso di carichi reattivi, devono fornire ed assorbire la potenza reattiva. Nei sistemi fotovoltaici ibridi, dovrebbero essere in grado di operare in modalità bidirezionale, cioè devono essere in grado di ricaricare la batteria in caso di potenza in eccesso al lato AC. Fondamentalmente, entrambi i tipi di inverter hanno un funzionamento in rete e stan-alone elementi molto simili rispetto all'energia elettronica.

Principi dell'inverter: Fondamentalmente, gli inverter convertono la corrente continua, DC, in corrente alternata, AC, per inversione della polarità DC nel ritmo della frequenza AC desiderata.

Figura 9.3 Configurazione tipica per i sistemi di alimentazione AC stand-alone



Il simbolo per descrivere un inverter è mostrato della figura 9.4.

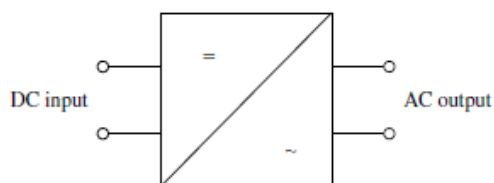


Figura 9.4 Rappresentazione di un inverter

La corrente alternata agli avvolgimenti primari del trasformatore, viene prodotta alternativamente chiudendo gli interruttori 1 e 2. Se l'interruttore 1 è chiuso, l'interruttore 2 sarà aperto, e viceversa. Il risultato è che la tensione di uscita CA è del tipo ad onda quadra, che può essere utilizzata per carichi di tipo resistivo, come lampadine ad incandescenza.

10. Analisi economica ed aspetti ambientali del sistema fotovoltaico

I sistemi fotovoltaici forniscono energia elettrica e la gamma di usi per cui viene impegnata sono enormi. Nonostante ciò l'energia elettrica prodotta con altre forme di risorse, quali combustibili fossili, idroelettrica, sono attualmente molto più utilizzate. La domanda che sorge è quella di come farà il fotovoltaico a competere con queste altre fonti di energia. In ogni modo è utile capire la redditività economica del fotovoltaico, presente o futura. Il costo dell'energia erogata è una caratteristica fondamentale dei sistemi fotovoltaici, che può essere influenzata dal design e dalle prestazioni del sistema, nonché dalle fonti e dai costi del capitale per finanziare il sistema. La scelta di posizionare il PV in una data situazione è influenzato anche da altre questioni, tra cui la concorrenza della fornitura elettrica stabilita, rischio finanziario e preoccupazioni ambientali, politiche ed umanitarie.

Sfondo

Una decisione razionale per sviluppare, fornire o utilizzare i sistemi fotovoltaici richiede di considerare molti fattori in modo organizzato e di affrontare l'ampia questione se il fotovoltaico è una buona scelta per colui o coloro i quali prenderanno in considerazione questa forma di energia.

Al giorno d'oggi ci sono vari modi per ottenere l'energia elettrica: tramite risorse rinnovabili, quali biomassa, vento, idroelettrico, e da fonti non rinnovabili come carbone, gas naturali, nucleare. Il fotovoltaico quindi si trova a competere sia con il tipo di risorse, per produrre energia, che dal punto di vista più pratico con le considerazioni finanziarie, di affidabilità, ambientali e di prestazioni. La decisione spetta a chi dovrà usufruire dell'energia elettrica ed al tipo di risorse impiegare per la sua produzione.

L'analisi economica nel mondo sviluppato punta a comprendere quale tecnologia di fornitura dell'energia soddisfi al meglio i criteri economici, ben definiti, per una data applicazione o classe di applicazione.

Nelle aree meno sviluppate del mondo, quelle senza reti elettriche, il contesto del processo decisionale è diverso. I sistemi fotovoltaici, in tali aree, vengono spesso definiti sistemi remoti o di villaggio; in questi casi la competizione si ha solitamente con generatori diesel o ad olio, fonti non rinnovabili, o da piccole fonti rinnovabili, vento, biomassa, idro. I fattori nella decisione di distribuzione possono includere fattori comuni alle regioni sviluppate, sebbene possono esserci meno alternative energetiche e le capacità del sistema individuale

sono molto più piccole rispetto alle regioni sviluppate. La redditività dei sistemi è un problema serio, come lo possono essere l'installazione e la manutenzione.

Le considerazioni finanziarie, nella decisione della scelta, possono essere abbastanza diverse, e variano da regioni sviluppate a quelle non sviluppate. In un paese sviluppato, l'economia delle singole unità, che possono essere famiglie, imprese, governi, hanno un flusso di cassa e bisogni energetici ben definiti; mentre nelle regioni sottosviluppate, la situazione più probabile è che le unità economiche siano individui o piccole imprese con flusso di cassa minimo o nullo.

Il confronto puramente finanziario delle fonti di energia elettrica da parte di entità private spesso diventa viene posto in secondo piano da iniziative pubbliche di sviluppo economico, nazionale e dalla politica internazionale che possono svolgere un ruolo molto importante per apportare delle accortezze e nuove tecnologie per migliorare il sistema fotovoltaico.

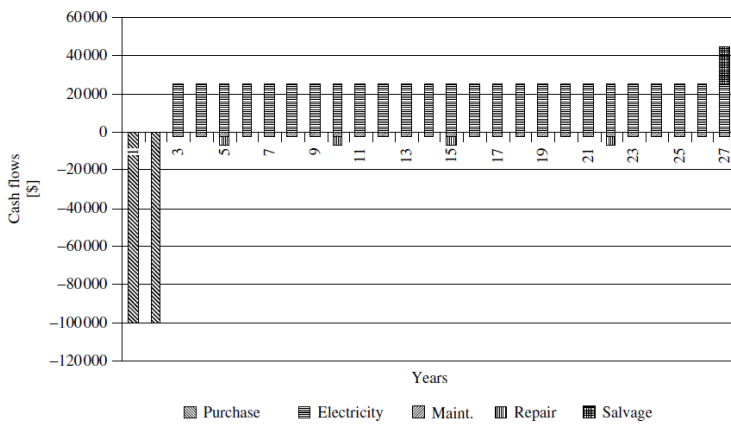
Analisi economica

Una volta resi noti i requisiti tecnici di un'applicazione PV ed il design del sistema fotovoltaico, l'analisi economica può essere effettuata. La valutazione include sia i costi che i benefici del sistema.

Concetti chiave: l'acquisto di un sistema fotovoltaico rappresenta una spesa di risorse di capitale importante in un primo momento, con l'aspettativa che i benefici, sotto forma di energia elettrica, verranno resi in un futuro periodo, generalmente pari alla vita del fotovoltaico. Per impianti di grandi dimensioni, l'ingente sforzo economico porta ad avere benefici futuri nella realizzazione dell'elettricità in un periodo compreso tra i 10 e i 30 anni. Il problema di base è, quindi, come misurare il valore dei benefici futuri da una spesa attuale. Bisogna prendere in considerazione il fatto che in un domani non ci saranno solo benefici, ma anche costi. Il costo della manutenzione e la sostituzione dei moduli guasti è un esempio primario.

Generalmente, si riconosce in modo intuitivo, che il valore di un costo o di un vantaggio in futuro non è uguale allo stesso costo o beneficio oggi. Questo mette in luce un aspetto importante: " il valore temporale del denaro" e definendo quel valore temporale pervade l'intero processo di analisi economica per i sistemi fotovoltaici. Queste spese e benefici, misurati in termini monetari, sono di solito chiamati flussi di cassa. L'acquisto ed il funzionamento di un sistema fotovoltaico coinvolge un flusso di flussi di cassa su un periodo di anni, e la valutazione economica richiede alcune coerenti misure di questi flussi di cassa da realizzare. Si potrebbe richiedere il confronto del valore associato a quel flusso con il valore di un flusso diverso per un sistema concorrente.

Figura 10.1 Flusso di cassa di un sistema fotovoltaico nel corso di 27 anni



I valori dell'energia prodotta, dal sistema, sono visti come positivi. Nei primi due anni si considerano le spese di installazione, del sistema, pari a 100 000\$ per anno. Il valore di elettricità generata ogni anno ammonta a 25 000 \$ e viene valutato in base ai costi evitati grazie all'impianto, ad esempio quelli dati dalla rete elettrica pubblica. La produzione annuale di potenza in chilowatt-ora, generata dal sistema, è compresa nel grafico e riportata sotto forma di costo. Ogni quinquennio viene considerata una spesa di 5 000 \$ dovuti a costi di riparazione. Nell'anno 27 si valuta un ricavo totale pari a 20 000 \$.

Per avere un singolo valore dei flussi di costo e di beneficio, che si verificano nel tempo, l'approccio usuale è quello di riferire tutti i costi ed i benefici ad un momento specifico, di solito quello attuale, sommare i valori per i flussi dati e confrontare le somme. Queste somme sono chiamate "valore attuale" o "valore attuale dei sistemi". Per confrontare due o più sistemi tra di loro, il valore attuale di ciascuno è calcolato per fornire un confronto economico.

Una somma o una spesa fatta al momento attuale, ha un valore attuale, e viene indicata con P. Una somma spesa o ricevuta in un periodo futuro di n anni ha un valore futuro, F. Se P è un investimento, con un tasso di interesse percentuale annuo, il suo valore futuro alla fine del primo anno sarà: $F = P + Pi = P(1+i)$.

Il futuro valore alla fine del secondo anno sarà: $F = [P(1+i)](1+i) = P(1+i)^2$, mentre il valore futuro dopo n anni è: $F = P(1+i)^n$. Viceversa, il valore attuale di una somma futura sarà dato da: $P = \frac{F}{(1+i)^n}$.

Le equazioni appena scritte si riferiscono ad un sistema energetico: il fattore i viene indicato come fattore di sconto. Il tasso di sconto è il valore che il proprietario del sistema mette sul capitale investito nel sistema, e viene spesso chiamato opportunità dell'investitore; cioè il tasso di ritorno il più vicino all'investimento sostenuto. Il valore del sistema fotovoltaico, misurato dal valore attuale ad inizio dell'anno in cui il sistema inizia a produrre elettricità è dato da $P_S = P_{investimento} + P_{elettricità} + P_{manutenzione} + P_{sostituzioni} + P_{recupero}$

Quando si fanno queste analisi, bisogna tenere presente che il valore annuo, somma annua fornita dall'impianto, possa essere considerata costante durante tutto il periodo o varia nel corso del tempo. Se questa aumenta costantemente ogni anno, a causa dell'inflazione nei costi dell'elettricità, e questo possa avvenire anche per i costi della manutenzione si avrebbero risultati diversi nell'analisi. Se vengono trascurate queste problematiche nelle ipotesi, tutti i valori monetari ed il loro potere d'acquisto vengono mantenuti costanti a quelli presente: si opera con valore del dollaro costante. Mentre, quando si tiene presente di queste problematiche, si va ad affrontare un'analisi in cui la quantità di denaro viene calcolata in base al dollaro corrente.

Per un dato anno n, il flusso di cassa netto, basato sui rendimenti del capitale netto, è pari a:

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

R_n : entrate generali nell'anno n, generalmente pari al valore dell'elettricità generata;

C_n : costi dovuti alla manutenzione del sistema, inclusa la manodopera, materiali e pezzi di ricambio;

I_n : interessi del debito pagati nell'anno n;

D_n : tasso di deprezzamento del sistema, calcolata in base alla legge della tassa;

T : tasso di rata marginale del proprietario, tasse pagate in entrata dal proprietario;

K_n : spesa di capitale nell'anno n;

S_n : valore di recupero nell'anno n;

B_n : quantità di denaro in prestito usato nelle spese di capitale;

P_n : pagamenti principali nel capitale di debito;

W_n : aumento netto nel capitale lavorativo nell'anno n.

La definizione di flusso di cassa netto, su base azionaria, è qui utilizzata perché le organizzazioni a scopo di lucro tendono a giudicare le proprie prestazioni finanziarie in base ai rendimenti ottenuti dal capitale azionario.

Il flusso di cassa netto annuo, per ogni anno di vita di progetto PV viene inserito nell'equazione:

$$NPW = \sum_{n=0}^L \frac{X_n}{(1+m)^n} \quad \text{dove } L \text{ è la lunghezza di vita del sistema, } m \text{ è l'equivalente matematico del tasso di sconto. Si calcola quindi il valore netto presente nel sistema, NPW, valore attuale netto, inserendo in questa equazione il flusso di cassa calcolato per ogni anno di vita del sistema.}$$

Bisogna prendere in considerazione che il proprietario possa vendere energia. Se questo avviene, il reddito è tassabile, altrimenti si pone $T=0$. Un metodo meno sofisticato, può essere quello del tempo impiegato dal sistema per il recupero del denaro investito inizialmente, che può essere ricavato dall'equazione:

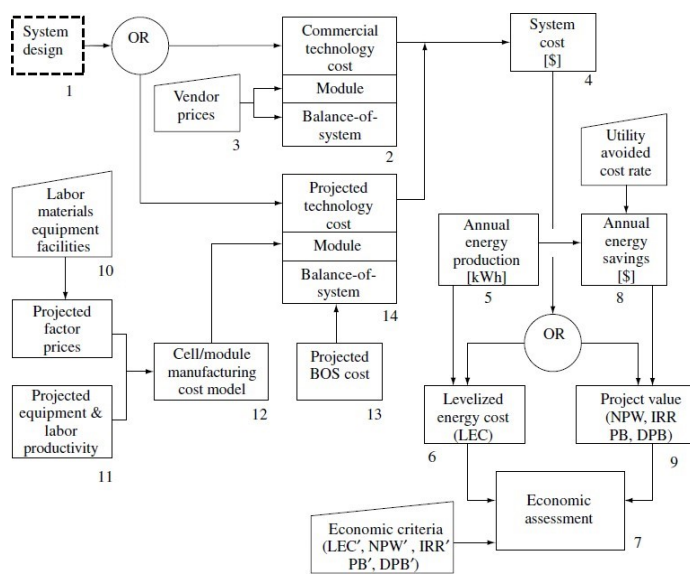
$$\sum_{n=0}^{PB} X_n = 0$$

Questo tipo di calcolo non va a considerare né i flussi di cassa né il valore del denaro nel tempo.

Metodologia generale

Una metodologia generale per la valutazione economica dei sistemi fotovoltaici è illustrata nella seguente figura.

Figura 10.2 Valutazione economica



La valutazione inizia con il **passaggio 1:** progettazione del sistema, in cui deve essere eseguita prima un'analisi economica.

Passaggi 2,3,4: costo del sistema. Nel determinare il costo, la completezza e la precisione del sistema, in termini di costi per i singoli componenti, portano ad una buona stima dei costi di sistema. Vengono suggeriti due percorsi per stimare il costo. Se il design del sistema è basato sulla tecnologia attuale disponibile, si ha la definizione di una distinta base completa e quindi si ottengono le

quotazioni dai venditori. Se la tecnologia della cella/modulo deve essere proiettata in futuro, o se la tecnologia attuale non è in produzione, i prezzi delle componentistiche possono essere previsti tramite una modellazione del processo di produzione. Per sistemi di grandi dimensioni, la cui installazione può protrarsi per mesi o anni, un programma ben definito sulla valutazione delle spese, sarà necessario per calcolare correttamente le misure economiche da adottare.

Passaggi 10,11,12,13,14,4: costo di sistema, modellazione costo-produzione. Nella figura sono illustrati due tipi di percorsi per determinare il costo di produzione. Il percorso che utilizza la tecnologia commerciale è stato affrontato nella figura. Quando una tecnologia di celle/moduli fotovoltaici non è commercialmente disponibile è da considerare e da prevedere il costo della cella e/o del modulo. Un approccio per prevedere i costi di cella/modulo viene illustrato nello step 12, come un modello di costo di fabbricazione di celle/moduli.

Passaggio 5: produzione annuale di energia. All'interno del quadro di valutazione, la produzione annua di energia per il sistema sarà calcolata da dati solari locali e dai dati di prestazione del sistema. Per un utente privato l'energia considerata è quella utile: energia effettivamente consumata più quella venduta.

Passaggio 6: costo energetico livellato, LEC. LEC è definito come costante del costo annuale (\$/kWh) in un determinato periodo di anni, in cui il valore attuale è lo stesso come quello del flusso di costi associato alla sua produzione. LEC incorpora il costo del capitale e la produzione annuale dell'energia; è tipicamente calcolato da utility, ma potrebbe essere anche utilizzato dal PV privato nei sistemi.

Passaggio 7: valutazione economica. Il passo finale in questa metodologia di valutazione è decidere se il valore della misura economica calcolata è un valore accettabile se confrontata con il criterio economico. Il LEC viene confrontato con il costo dell'elettricità prodotte da altre fonti; per un utente privato la comparazione potrebbe essere fatta tramite un generatore diesel-elettrico o una cella a combustibile.

Passaggio 8: valore energetico annuale. Per calcolare le misure del valore di progetto al punto 9, è necessario il valore di produzione annuale di energia. Per connessione alla rete, il valore è il costo evitato non acquistando energia dalla rete, step 5. Il valore è calcolato dal tasso di energia elettrica e dalla produzione di energia. Dove il tasso ha componenti stagionali, la produzione di energia, come la funzione del tempo, dovrebbe essere presa in considerazione per valutare correttamente l'energia.

Passaggio 9: valore del progetto. Sono state definite diverse misure finanziarie per i sistemi fotovoltaici, ognuna delle quali dipende dal flusso di cassa netto, X_n che include un termine di ricavo, R , che è il valore dell'acquisto di elettricità in cui si evita l'uso del sistema PV. L'energia elettrica annuale prodotta, dal sistema fotovoltaico, è implicitamente inclusa in R .

Restituzione dell'energia e riduzione dell'inquinamento.

I sistemi fotovoltaici convertono la luce solare in energia elettrica. È stato notato che l'energia viene consumata nella produzione di conversione PV, cioè vi è un costo energetico per produrre energia. Il mining, la raffinazione e la purificazione dei materiali a dei conduttori, l'energia consumata per la fabbricazione di tutti i materiali in uso nel fotovoltaico, quali vetro, acciaio, alluminio, plastica, quelli di supporto incorporati nel modulo, sono tutte elaborazioni, il trasporto e l'installazione sono fasi che comportano un dispendio di energia elettrica. Durante la vita di un impianto fotovoltaico, di solito circa 20-30 anni, l'energia prodotta è vista come un ritorno di energia impiegata nella sua creazione.

La domanda che maggiormente viene posta è quella se con la produzione di energia fotovoltaica vi è un beneficio energetico netto; la risposta che viene indicata è quella di un “recupero energetico”, che è pari al numero di anni necessari per rimborsare il contenuto energetico del sistema fotovoltaico con il suo consegnato di energia. Quindi, in termini di confronto per il recupero di energia, con altre fonti di produzione, questi devono essere attentamente analizzate e devono essere significativi. La questione del vantaggio economico viene adeguatamente fornita, quando il costo di tutti i materiali, attrezzature di produzione e il capitale sono contabilizzati. La domanda di recupero di energia è essenzialmente ecologica, cioè la creazione di Sistemi fotovoltaici, che generano più energia di quella consumata per produrli, rappresentano un uso saggio rispetto alle risorse fossili? Un problema correlato, a questa questione, è la riduzione dell’effetto serra, derivante dai gas per la generazione di energia elettrica, che sfruttando il sistema fotovoltaico non sono generati. Un ritorno economico potrebbe essere fornito, qualora venissero introdotte delle sanzioni sulla produzione di energia tramite i combustibili fossili, in modo tale di dissuadere questa forma di energia.

La questione del recupero di energia è stata esaminata quantitativamente; il recupero di energia è determinato da quattro fattori:

- Il design del sistema fotovoltaico, compresi tutti i componenti.
- La posizione del sistema.
- La vita del sistema fotovoltaico.
- La parte della catena di produzione di energia inclusa nel recupero.

Il design del sistema determina l’efficienza di conversione da parte dello stesso e i livelli di potenza, oltre a definire il contenuto energetico dell’hardware.

La posizione del sistema determina l’energia incidente per il sistema, che insieme alla vita del sistema, determinano l’energia totale fornita dal sistema fotovoltaico.

Il contenuto energetico totale del sistema fotovoltaico, dipende da quanto indietro viene effettuata l’analisi nella catena.

Nella maggior parte dei casi, il contenuto energetico del PV, si basa su studi precedenti fatti sul contenuto energetico dei materiali di base.

In una sintesi degli studi sull’investimento energetico si è notato che l’energia per i sistemi fotovoltaici sul tetto si riducono fino a 4,3,2,1 anni:

quattro anni per i sistemi che utilizzano silicio policristallino nei moduli fotovoltaici; tre anni per i moduli a film sottile, due anni per i moduli futuri a tecnologia multi cristallina e un anno per i futuri moduli a film sottile.

Questi dati assumono una durata di 30 anni. I moduli multi cristallini hanno un ritorno di energia più lungo in quanto hanno una maggiore concentrazione di silicio rispetto ai moduli a film sottile.

BIBLIOGRAFIA:

- Antonio Luque, Steven Hegedus-“Handbook of Photovoltaic Scienze and Engineering” Wiley, 2003
- Peter Würfel “Physic of Solar Cells- From Principles to New Concepts” Wiley-VHC, 2005
- G. Valitutti, A. Tifi, A. Gentile “Chimica: Molecole in Movimento, le molecole e le loro interazioni”.
- R. Bertani, D.A. Clemente, G. Depaoli, P. Di Bernardo, M. Gleria, B. Longato, U. Mazzi, G.A. Rizzi, G. Sotgiu, M. Vidali “Chimica generale e Inorganica”
- Antonio Martì, Antonio Luque-“Next Generation Photovoltaics” IOP Publishing Ltd, 2004

SITI INTERNET:

- www.wikipedia.it
- www.Solarpowereurope.org