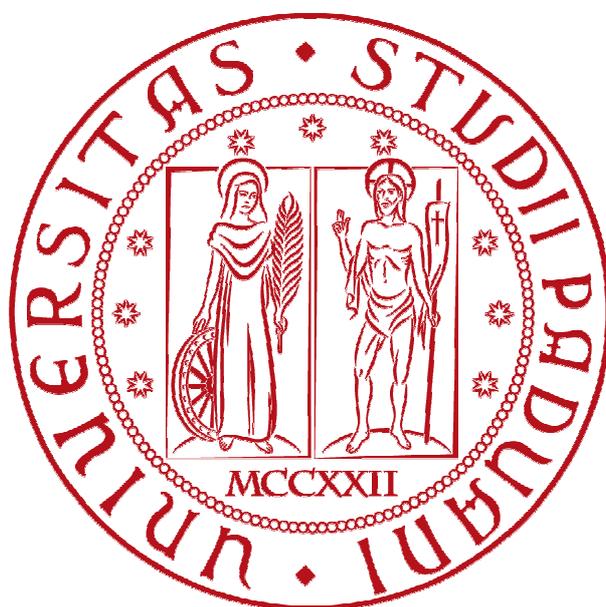


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Informazione



Tesi di Laurea

Il fotovoltaico a film sottile

Relatore: prof. Gaudenzio MENEGHESSO

Laureanda: Vera BETTINARDI

*Al più formidabile costruttore di motoscafi di tutta la Sardegna,
a sua figlia, mia sorella, e a Ginevra, che amo già tantissimo.*

*Ai miei genitori, senza i quali nulla sarebbe stato
possibile,*

*e a tutti i miei nonni e zii, che mi hanno sempre
dimostrato un grandissimo affetto.*

Indice

Indice delle figure

CAPITOLO 1

Le energie rinnovabili

CAPITOLO 2

Nozioni fondamentali

- 2.1 L'effetto fotovoltaico e la cella solare
- 2.2 Tecniche impiegate per ridurre la riflessione sulla superficie della cella solare
- 2.3 La caratteristica elettrica delle celle solari
- 2.4 Il concetto di efficienza
- 2.5 Vantaggi e svantaggi del fotovoltaico
- 2.6 Gli impianti fotovoltaici
- 2.7 L'Italia e il solare

CAPITOLO 3

Il fotovoltaico a film sottile

- 3.1 Vantaggi e svantaggi del film sottile
- 3.2 Il metodo dello sputtering
- 3.3 Suddivisione interna al film sottile
 - 3.3.1 Silicio amorfo
 - 3.3.2 CIS
 - 3.3.3 CIGS
- 3.4 Un'alternativa "green" per CIS e CIGS
- 3.5 Prezzi ed efficienze a confronto

3.6 Un nuovo materiale ibrido aumenta l'efficienza delle celle

3.7 Brilla più luce nelle celle solari a film sottile con epi-Si

3.8 Le possibilità del film sottile

3.9 Film sottile e silicio cristallino a confronto

CAPITOLO 4

Il fotovoltaico di terza generazione: celle solari organiche

4.1 Celle solari organiche ed ibride

4.2 Vantaggi e svantaggi delle celle DSSC

4.3 Vantaggi e svantaggi delle celle organiche

4.4 Da “green grass” a “bright green”: dal MIT le celle solari ricavate dall'erba tagliata

4.5 Fotovoltaico organico e tradizionale a confronto

CAPITOLO 5

Valutazione sulla reale qualità dei moduli fotovoltaici

CAPITOLO 6

Alcune considerazioni

6.1 La ricerca della grid parity: tra sogno e realtà

6.2 Fukushima e il fotovoltaico: perché non voltare pagina?

CAPITOLO 7

Nuove generazioni di celle fotovoltaiche

7.1 Celle fotovoltaiche con materiali non conduttori

7.2 Celle fotovoltaiche con cristalli liquidi

Fonti

Indice delle figure

Figura 1: *Struttura cristallina schematica del silicio*

Figura 2: *Rappresentazione delle bande di energia*

Figura 3: *Struttura cristallina del silicio drogato con atomi di boro e di fosforo*

Figura 4: *Riduzione della riflessione attraverso a) un singolo strato anti-riflessione e b) il metodo di texturizing della superficie*

Figura 5: *Perdita energetica media della cella*

Figura 6: *Caratteristica elettrica delle celle solari*

Figura 7: *Caratteristica I-V della cella e suo punto di massima potenza*

Figura 8: *Caratteristica del fotodiodo*

Figura 9: *Caratteristica della cella al buio e della cella irradiata*

Figura 10: *Circuito equivalente di una cella fotovoltaica*

Figura 11: *Integrazione architettonica di pannelli nella copertura dei parcheggi*

Figura 12: *Impianto fotovoltaico*

Figura 13: *Comparazione delle produzioni di celle a film sottile CdTe, CIGS, amorfo e organico*

Figura 14: *Pannello a film sottile e pannello con celle solari wafer integrate*

Figura 15: *Sezione trasversale di una tipica cella con uno "epitaxial stack" consistente in un BSF, una base attiva di tipo p e un emettitore di tipo n*

Figura 16: *Riflessione della luce in una cella epi con diversi riflettori di Bragg PSi*

Figura 17: *Layer epi dopo l'applicazione di due metodi di texturing: plasma texturing e piramidi casuali*

Figura 18: *Sezione trasversale di una cella solare di tipo p con texturing della superficie al plasma e di una cella di tipo n con texturing della superficie a piramidi casuali*

Figura 19: *Una possibile realizzazione delle autostrade fotovoltaiche*

Figura 20: *Principali differenze costruttive e tecnologiche fra silicio cristallino e film sottile*

Figura 21: *Esempio di modulo fotovoltaico organico*

Figura 22: *Cella solare DSSC*

Figura 23: *Modulo fotovoltaico con celle DSSC*

Figura 24: *Curva a "vasca da bagno"*

Figura 25: *Distribuzione dei guasti tra le 21 maggiori aziende produttrici di moduli fotovoltaici*

Figura 26: *Analisi delle cause di fallimento di moduli PV*

Figura 27: *Esperimenti in laboratorio per estrarre energia dal campo magnetico della luce del laser*

Le energie rinnovabili

Lo sviluppo della nostra società, fin dalle sue origini, è sempre stato legato al fabbisogno di energia in tutte le sue forme; si è infatti impiegato il fuoco, successivamente il carbone e infine il petrolio. Fino ad oggi la maggior parte dell'energia elettrica è stata prodotta attraverso l'impiego di fonti fossili che, come ben sappiamo, oltre a essere non-rinnovabili, generano ingenti quantità di CO₂, minacciando pertanto l'ecosistema mondiale.

Per risolvere questo problema energetico si deve essenzialmente investire nell'ambito delle energie rinnovabili; risulta infatti da reports della Comunità Europea che tutte le energie rinnovabili possono provvedere a 3000 volte circa la richiesta energetica che abbiamo oggi: l'energia solare potrebbe produrre fino a 2850 volte l'energia che abbiamo al mondo, le biomasse 20 volte, l'energia geotermica 5 volte, l'energia delle onde 2 volte e la parte idroelettrica 1 volta. La Comunità Europea dunque, spinta anche da cambiamenti a livello climatico, ha scritto un'equazione di forte impatto: $20 + 20 - 20 = 2020$, volendo con questa dichiarare di impegnarsi ad aumentare del 20% l'utilizzo delle fonti rinnovabili, ad aumentare del 20% l'efficienza energetica e a ridurre del 20% l'emissione di anidride carbonica, il tutto entro il 2020.

Data dunque l'esigenza di ridurre la dipendenza dalle fonti di natura fossile, sono aumentati gli investimenti nelle energie rinnovabili: nascono così le biomasse, scarti di origine vegetale che permettono di trarvi energia elettrica, eliminando gli scarti prodotti dalle attività agroforestali (nel 2005 sono stati prodotti, solo in Italia, 2,4 milioni di tonnellate equivalenti petrolio di energia termica da biomasse, nel 2010 la produzione di energia termica ed elettrica da biomasse è stata di 6,7 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio. Secondo il PAN, Piano Energetico Nazionale, questa fonte di energie rinnovabili da biomasse dovrebbe diventare la prima in Italia, coprendo circa il 44% di consumi da energie rinnovabili); l'energia delle onde, una fonte inesauribile che sembra fin da ora competitiva nei confronti delle altre fonti di energia tradizionale, con circa 10 centesimi di euro al kilowatt; l'eolico, che si distingue in quanto di recente è stato sviluppato sia a livello domestico che industriale, e questo grazie al cosiddetto minieolico, una soluzione che presenta grandi potenzialità di sviluppo negli anni a venire; l'energia geotermica, cioè quella generata per mezzo di fonti geologiche di calore, e che dunque si basa sullo sfruttamento del calore naturale della Terra dovuto all'energia termica rilasciata in processi di decadimento nucleare naturale di elementi radioattivi contenuti all'interno della Terra; poi vi è il fotovoltaico, in continua espansione sia in termini di rendimento ed efficienza, che di tecnologie e materiali utilizzati, con la *grid parity* (termine che indica il pareggio tra il prezzo dell'energia elettrica prodotta dalle fonti rinnovabili e il prezzo dell'energia tradizionale) quale obiettivo sempre più vicino; gli impianti a pannelli solari termici, che consentono di risparmiare denaro limitando nel contempo le emissioni di CO₂ e permettono di riscaldare o raffreddare gli ambienti domestici piuttosto che produrre calore da usare nei processi industriali. E non per ultimo, forse un domani installeremo sulle nostre case pannelli fotovoltaici in grado di produrre energia dall'acqua: è quanto lascia immaginare una recente ricerca condotta da un ingegnere statunitense della Duke University, nel North Carolina; lo studioso ha messo a punto un sistema di pannelli solari capaci di trasformare una miscela di acqua e metanolo in idrogeno, da utilizzare subito grazie a una cella a combustibile, o da immagazzinare in un serbatoio per poi rifornire la fuel cell quando è necessario. L'invenzione è stata presentata al meeting annuale sulle energie rinnovabili dell'American Association of Mechanical Engineering, e sembra che questa nuova tecnologia sia da 5 a 10 volte superiore agli altri sistemi.

Nel campo delle energie rinnovabili la Comunità Europea ha previsto investimenti pari a migliaia di miliardi, e nonostante il report sia del 2005/2006, prima quindi del periodo di crisi che stiamo vivendo, questo settore ne risentirà molto poco, visto che di recente la Cina ha dichiarato di essere pronta ad accettare il protocollo di Kyoto e i limiti di riduzione delle emissioni. E mentre nel nostro paese si inizia a discutere della possibilità d'installare batterie d'accumulazione nelle reti elettriche, proprio la Cina sta facendo passi da gigante nel campo delle energie rinnovabili, con un maxi centro di stoccaggio collegato alla rete nazionale. L'allettante possibilità di assorbire l'energia prodotta da fonti come l'eolico, le biomasse e il fotovoltaico per poi distribuirla secondo i picchi di consumo, potrebbe vanificare il problema legato all'intermittenza di queste fonti. Con un investimento di 500 milioni di dollari, l'azienda cinese Byd e la società che gestisce le linee elettriche (State grid corporation of China) hanno realizzato un sistema di batterie agli ioni di litio con una capacità totale di 36 MWh. Il progetto definitivo è ancora più ambizioso, volendo raggiungere i 110 MWh di capacità di stoccaggio, abbinata a impianti eolici e solari per 600 MW complessivi di potenza disponibile.

Nozioni fondamentali

L'intensità della radiazione solare al suolo dipende dall'angolo di inclinazione della radiazione stessa su una superficie orizzontale: più piccolo è il valore assoluto dell'angolo, maggiore è lo spessore di atmosfera che essa deve attraversare e quindi è minore l'irraggiamento che giunge sulla superficie. La *radiazione diretta* colpisce una superficie qualsiasi con un angolo ben definito, mentre quella *diffusa* colpisce la stessa superficie con tanti angoli. Tale fenomeno è molto importante perché i pannelli fotovoltaici funzionano anche in presenza della sola componente diffusa. Inoltre, una superficie inclinata, quale appunto quella dei pannelli fotovoltaici, può ricevere anche *radiazione solare riflessa*. La necessità di distinguere tra radiazione solare diretta, diffusa e riflessa deriva dal fatto che i pannelli non rispondono in maniera uguale se colpiti in proporzioni diverse dalle tre componenti.

2.1 L'effetto fotovoltaico e la cella solare

La conversione fotovoltaica è un fenomeno fisico che permette di trasformare l'energia solare in energia elettrica all'interno di dispositivi elementari chiamati *celle fotovoltaiche*. L'effetto fotovoltaico fu notato per la prima volta dal fisico francese Edmund Becquerel: nel 1839 osservò che il platino colpito dalla radiazione solare produceva corrente elettrica, inoltre egli notò l'apparizione di una piccola corrente quando due elettrodi identici, all'interno di una debole soluzione conduttrice, venivano illuminati. Il primo pannello fotovoltaico risale invece al 1889, e fu realizzata da Charles Fritts di New York; il pannello era costituito da un sottile strato di selenio steso su una lastra metallica, coperto con una pellicola semitrasparente di oro. La sua efficienza era all'incirca dell'1%. Fu poi nel 1954, all'interno dei Laboratori Bell negli Stati Uniti, che venne creata la prima cella fotovoltaica in silicio monocristallino.

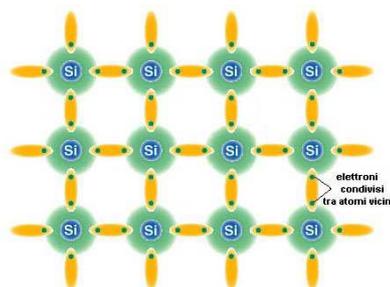


Figura 1: Struttura cristallina schematica del silicio

In un monocristallo di Silicio ogni atomo è legato in modo covalente ad altri quattro atomi: due atomi affiancati di un cristallo hanno in comune una coppia di elettroni, uno dei quali appartenente ad un atomo e l'altro a quello vicino. Questo legame elettrostatico, molto forte, detto legame covalente, può essere spezzato con una quantità di energia (che per l'atomo di Silicio è di 1,124 eV) che permette all'elettrone di liberarsi dal legame covalente con l'atomo, di superare la banda proibita (detta energy gap) e di passare quindi dalla banda di valenza alla banda di conduzione, dove è libero di spostarsi contribuendo così al flusso di elettricità. Quando passa nella banda di conduzione l'elettrone si lascia dietro un "vuoto" chiamato lacuna, che viene facilmente occupato da un elettrone

vicino attraverso il processo di ricombinazione, durante il quale l'elettrone restituisce una parte di energia cinetica che possedeva sotto forma di calore. Un flusso luminoso di fotoni che investe il reticolo cristallino del Silicio, ha proprio la capacità di liberare un certo numero di elettroni al quale corrisponde un ugual numero di lacune.

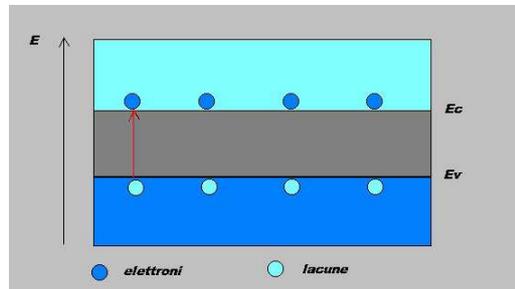


Figura 2: Rappresentazione delle bande di energia

Per sfruttare l'elettricità è necessario creare un moto coerente di elettroni (e di lacune), ovvero una corrente, mediante un campo elettrico all'interno della cella. Per fare ciò è necessario introdurre nel Silicio una piccola quantità di atomi appartenenti al terzo o al quinto gruppo del sistema periodico in modo da ottenere due strutture differenti, una con un numero di elettroni insufficiente, l'altra con un numero di elettroni eccessivo: questo trattamento viene detto *drogaggio*.

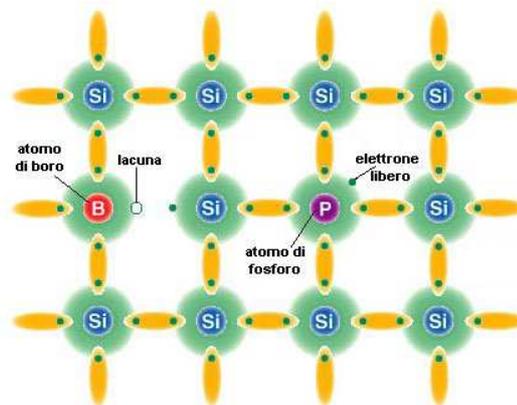


Figura 3: Struttura cristallina del silicio drogato con atomi di boro e di fosforo

Generalmente si utilizzano il **Boro** (terzo gruppo) ed il **Fosforo** (quinto gruppo) per ottenere rispettivamente una struttura di **tipo p** (con un eccesso di lacune) ed una di **tipo n** (con un eccesso di elettroni). Ponendo a contatto i due tipi di strutture, la cui zona di separazione è chiamata *giunzione p-n*, tra i due strati si attiva un flusso elettronico dalla zona n alla zona p

dovuto alla differente concentrazione dei due tipi di carica libera (elettroni e lacune); tale gradiente forza gli elettroni a diffondere dalla zona n a quella p e le lacune dalla zona p a quella n. Quando le lacune abbandonano il materiale di tipo p, lasciano degli ioni accettori che sono carichi negativamente. Di conseguenza il materiale di tipo p risulta carico negativamente nelle vicinanze dell'interfaccia p-n. Similmente, una carica positiva si forma dalla parte di tipo n della giunzione, dato che gli elettroni, diffondendo, lasciano gli ioni donori, carichi positivamente. La regione della giunzione in cui sono venuti a mancare i portatori maggioritari, lasciando gli ioni fissi accettori e donori, è chiamata *regione di svuotamento o di carica spaziale*. Le cariche danno luogo ad un

campo elettrico lungo l'interfaccia che è diretto dalla regione n alla regione p. Tale campo si contrappone alla diffusione di lacune e di elettroni poiché causa una deriva degli elettroni dalla zona p alla n e delle lacune dalla zona n alla p. In condizioni di equilibrio, la carica fissa di svuotamento crea un campo elettrico tale che le correnti di deriva sono uguali ed opposte alle correnti di diffusione, ottenendo quindi un flusso netto nullo [1]. Illuminando la giunzione p-n si generano delle coppie elettrone-lacuna in entrambe le zone n e p. Il campo elettrico separa gli elettroni in eccesso, generati dall'assorbimento della luce, dalle rispettive lacune spingendoli in direzioni opposte (gli elettroni verso la zona n e le lacune verso la zona p). Una volta attraversato il campo gli elettroni liberi non tornano più indietro, perché il campo, agendo come un diodo, impedisce loro di invertire la marcia.

Se si connette la giunzione p-n con un conduttore, nel circuito esterno si otterrà un flusso di elettroni che parte dallo strato n, a potenziale maggiore, verso lo strato p, a potenziale minore. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce con regolarità sotto forma di corrente continua. È importante che lo strato esposto alla luce, generalmente lo strato n, sia tale da garantire il massimo assorbimento di fotoni incidenti in vicinanza della giunzione. Di tutta l'energia che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti. L'efficienza di conversione per celle fotovoltaiche al Silicio monocristallino è in genere compresa tra il 13% e il 17%, mentre applicazioni speciali in laboratorio hanno raggiunto valori del 32,5%.

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

- **riflessione:** non tutti i fotoni che incidono su una cella penetrano al suo interno, dato che in parte vengono riflessi dalla superficie della cella e in parte incidono sulla griglia metallica dei contatti. Per avere la massima efficienza del modulo fotovoltaico bisogna infatti che la luce non venga riflessa nel suo percorso verso lo strato assorbente, e che la luce che attraversa questo strato non venga successivamente riflessa verso l'esterno, o trasmessa attraverso la cella. Per questo motivo sono state sviluppate una serie di tecnologie anti-riflessione nei moduli fotovoltaici che si possono raggruppare in due macro categorie: rivestimenti non riflettenti che riducono la riflessione alle interfacce sovrastanti lo strato che assorbe la luce, e una lavorazione superficiale specifica (texturized surfaces) che, abbinata ad una superficie riflettente sul retro della cella, ha il duplice scopo di incrementare la trasmissione della luce aumentandone il cammino ottico nel semiconduttore (e dunque aumentando la probabilità del suo assorbimento) e di intrappolarla all'interno dello strato assorbente. Molto spesso le strategie più efficaci impiegano entrambe queste tecniche. La scelta della tecnologia anti-riflessione appropriata è a tutti gli effetti un problema di ottimizzazione di diversi fattori, che non include la sola prestazione della cella, ma anche la sua affidabilità, la producibilità, e fondamentalmente il costo; [2]

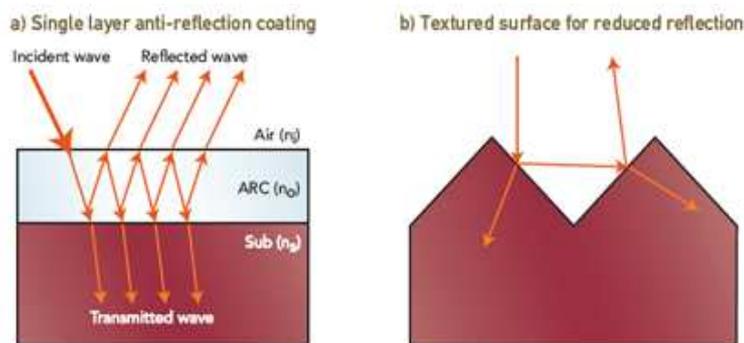


Figura 4: Riduzione della riflessione attraverso a) un singolo strato anti-riflessione e b) il metodo di texturizing della superficie

- **fotoni troppo o poco energetici:** per rompere il legame tra elettrone e nucleo occorre una certa energia, e non tutti i fotoni incidenti possiedono energia sufficiente a tale scopo. D'altra parte l'eccesso di energia dei fotoni non genera corrente elettrica, ma viene dissipata in calore all'interno della cella: alcuni fotoni troppo energetici generano coppie elettrone-lacuna dissipando in calore l'energia eccedente quella necessaria a staccare l'elettrone dal nucleo, provocando in tal modo processi di auto-riscaldamento della cella e quindi diminuendone l'efficienza;

- **ricombinazione:** non tutte le coppie elettrone-lacuna generate vengono raccolte dal campo elettrico di giunzione e inviate al carico esterno, dato che nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno

opposto e quindi ricombinarsi, così facendo l'elettrone restituisce una parte dell'energia cinetica che possedeva, sotto forma di calore;

- **resistenze parassite:** le cariche generate e raccolte nella zona di svuotamento devono essere inviate all'esterno. L'operazione di raccolta viene effettuata dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la

fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra Silicio e Alluminio dei contatti, resta una certa resistenza all'interfaccia, che provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico. Nel caso di celle al Silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente diminuita a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, ancor più nel caso di celle al Silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi.

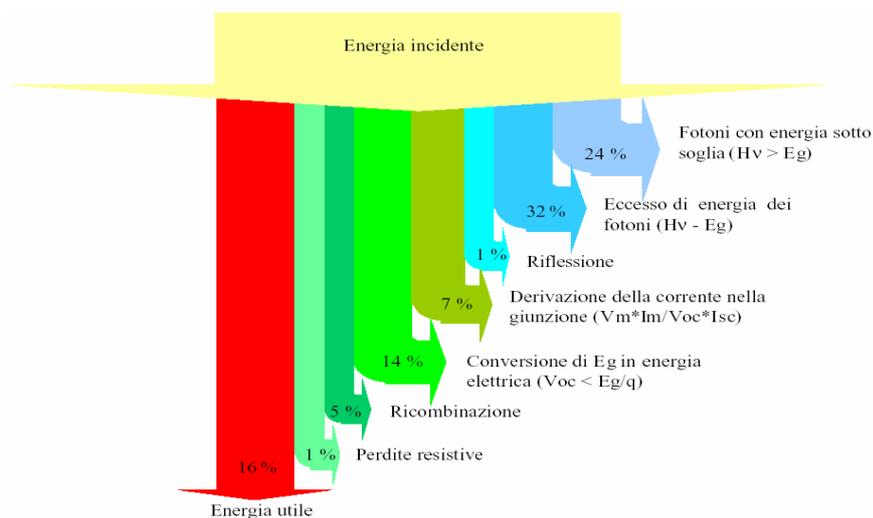


Figura 5: Perdita energetica media della cella fotovoltaica

2.2 Tecniche impiegate per ridurre la riflessione sulla superficie della cella solare

[3] Oggigiorno la sempre più crescente competitività ha costretto le aziende produttrici di pannelli fotovoltaici a differenziarsi tra loro attraverso metriche di valutazione quali i benefici del prodotto e le prestazioni in termini di efficienza. Mentre inizialmente l'attenzione si era concentrata sulle tecnologie della cella, oggi assume sempre più importanza un componente cruciale della cella: lo strato di vetro superficiale. Questo risulta difatti particolarmente interessante poiché negli ultimi anni sono stati studiati e realizzati processi molto raffinati di texturing che hanno apportato rilevanti migliorie. Tra i maggiori fattori che convincono i clienti, infatti, vi sono il prezzo, l'efficienza e la resa: l'uso di uno strato di vetro anti-riflessione o la realizzazione di un'accurata texturing del vetro anteriore, portano a un incremento della potenza in uscita di circa un 7.5% (in kWh/kWp). Una texturing incisiva ha finora dimostrato i risultati migliori, e ciò grazie ad uno sfruttando accorto degli effetti geometrici di confinamento della luce e alla riduzione della temperatura permessa dall'ampia area superficiale. Il principale svantaggio di questa tecnica è l'elevato costo di produzione dello specifico strato di vetro. Per quanto concerne l'aumento della potenza in uscita, esso è stato valutato del 5.4%, qualora i pannelli siano orientati a sud con un'inclinazione di 30°; inoltre le ricerche hanno rivelato come tali aumenti in uscita dovuti alla tecnica di texturing del vetro siano ben più rilevanti per moduli con orientazioni meno ideali, e ciò grazie all'ottimo utilizzo della luce indiretta permesso dal vetro speciale. Ecco dunque come pannelli costruiti con questa tecnologia possono trovare un buon mercato in Germania, Gran Bretagna e Scandinavia; inoltre in paesi quali Spagna e Italia, tali tipologie di impianti solari possono beneficiare di prestazioni ancora migliori grazie ad un netto incremento dell'efficienza. Confrontate alle celle che impiegano strati anti-riflessione, quelle con vetro lavorato, inizialmente più costose, consentono poi un rientro economico nella loro durata di vita grazie a maggiori incrementi dell'efficienza. Un ulteriore effetto positivo della tecnica di texturing è la riduzione dell'effetto abbagliante causato dai vetri lucenti dei normali moduli fotovoltaici. Questo è un aspetto positivo per pannelli installati in aree densamente popolate, aree molto trafficate e negli aeroporti: ad esempio, sui tetti dei parcheggi, nelle costruzioni aeroportuali, nelle corsie d'ingresso o negli hangars, è tuttora vietato in molti paesi installare pannelli fotovoltaici a causa dei possibili pericoli provocati dall'effetto abbagliante. Questa tecnica può pertanto aprire una nuova nicchia di mercato per moduli speciali che adottano la tecnica di texturing del vetro. Altri test hanno inoltre dimostrato che la pulizia dei moduli che incorporano vetro texturized non è per nulla problematica e anzi ha meno inconvenienti, o al più gli stessi, che si hanno pulendo i moduli tradizionali lisci. Un beneficio significativo che hanno questi moduli lavorati superficialmente è una maggior durata della loro vita media. L'altra tecnica invece, prevede che sul vetro della cella venga depositato, attraverso tecnica spray o rullaggio, un rivestimento antiriflesso (ARC). Scienziati e ricercatori stanno già sviluppando possibili modi per combinare le due succitate tecniche, quella di texturing e ARCs: i primi test di laboratorio sono stati più che soddisfacenti, e difatti ci si aspetta che questa nuova tecnologia impiegata sia, nel giro di un paio d'anni, disponibile per la produzioni di massa.

Riassumendo, i vetri delle celle solari si possono suddividere in:

- Prima generazione: questa categoria include vetri superficiali ad alta purezza e non riflettenti, con un basso contenuto di ferro. La riduzione dei composti ferro-ossido assorbenti la luce si traduce in un vetro extra-trasparente che riflette il 4% della luce che lo raggiunge;

- Seconda generazione: sono i vetri superficiali non riflettenti bianco brillanti, con un ARC. La portata della luce viene aumentata, mentre diminuisce la riflessione, sebbene il 2.5% della luce incidente venga ancora riflessa;
- Terza generazione: questi vetri non solo hanno un basso contenuto di ferro e aumentano la portata della luce, ma creano oltretutto un effetto di confinamento della radiazione luminosa grazie alla tecnica di texturing della superficie (che può essere sia modellata in modo piramidale sia ad onda); questo effetto si basa sulla riduzione della riflessione e sulle ripetute rifrazioni della luce.

2.3 La caratteristica elettrica delle celle solari

La cella fotovoltaica è sostanzialmente un diodo di grande superficie: esponendola alla radiazione solare, la cella si comporta come un generatore di corrente, il cui funzionamento può essere descritto per mezzo della caratteristica tensione-corrente illustrata in figura 6.

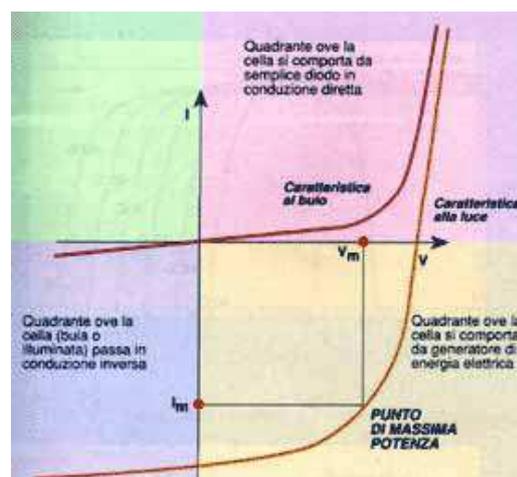


Figura 6: caratteristica elettrica delle celle solari

In generale la caratteristica di una cella fotovoltaica è funzione di tre variabili fondamentali: intensità della radiazione solare, temperatura e area della cella.

L'intensità della radiazione solare non ha un effetto significativo sul valore della tensione a vuoto; viceversa l'intensità della corrente di corto circuito varia in modo proporzionale al variare dell'intensità dell'irraggiamento, crescendo al crescere di questa.

La temperatura non ha un effetto significativo sul valore della corrente di corto circuito; al contrario, esiste una relazione di proporzionalità tra questa e la tensione a vuoto, diminuendo la tensione al crescere della temperatura. L'area della cella non ha alcun effetto sul valore della tensione; viceversa esiste una diretta proporzionalità tra questa e la corrente disponibile.

In condizioni di corto circuito la corrente generata è massima (I_{sc} in figura), mentre in condizioni di circuito aperto è massima la tensione (V_{oc}). In condizioni di circuito aperto e di corto circuito la potenza estraibile sarà nulla, poiché nella relazione $P = V \cdot I$ sarà nulla la corrente nel primo caso e la tensione nel secondo.

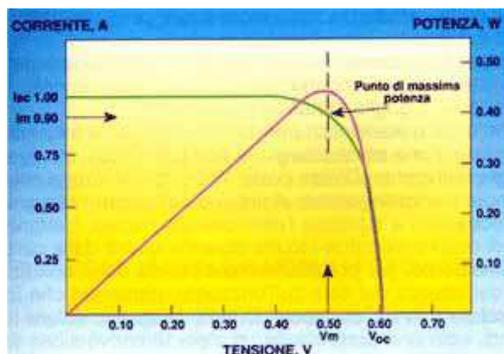


Figura 7: caratteristica I-V della cella e suo punto di massima potenza

Negli altri punti della caratteristica all'aumentare della tensione aumenta la potenza, raggiungendo quindi un massimo dato da $P_{max} = V_m * I_m$ e diminuendo repentinamente in prossimità della V_{oc} (~0,6 V).

Il comportamento di una cella fotovoltaica (o fotodiode) è descrivibile schematicamente mediante un grafico tensione/corrente come quello di figura, che riporta in ordinata la corrente che attraversa la giunzione ed in ascissa la tensione ai capi della giunzione.

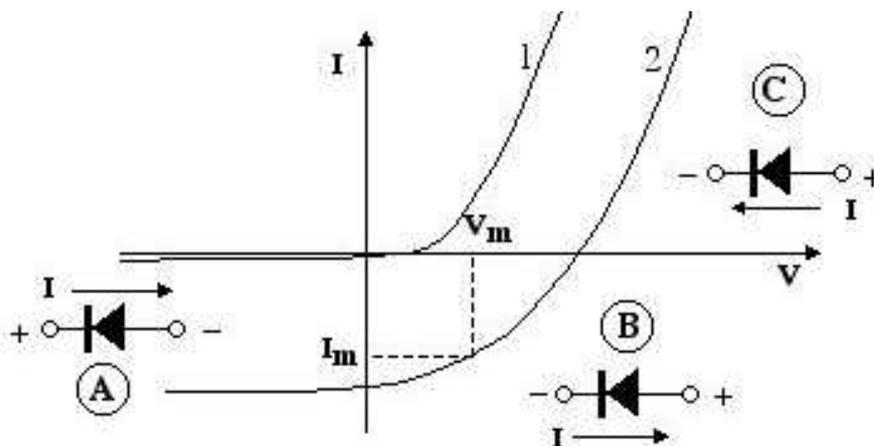


Figura 8: Caratteristica del fotodiode

Le caratteristiche attraversano tre quadranti: la curva indicata con 1 è quella in condizioni di *buio*, la curva indicata con 2 è quella che si ottiene in condizioni di *illuminamento*.

Nel quadrante A il fotodiode è polarizzato inversamente (cioè l'elettrodo p è negativo rispetto all'elettrodo n nella giunzione pn): nelle condizioni di buio la corrente inversa è trascurabile, come per ogni diodo raddrizzatore, che non conduce se polarizzato inversamente. Nelle condizioni di illuminamento tuttavia si nota che esso è attraversato da un'apprezzabile corrente inversa. La pendenza di tale curva è prossima a zero: la corrente è praticamente indipendente dalla tensione di polarizzazione. Nel quadrante C il fotodiode è polarizzato direttamente, e la corrente diretta, che scorre dall'elettrodo p a quello n, cresce esponenzialmente con la tensione applicata come in ogni diodo secondo l'equazione $I_D = I_S(e^{V_d/nV_T} - 1)$, anche se si usa approssimare l'esponenziale con una retta, che intercetta l'asse delle tensioni ad un valore che viene chiamato V_{ON} .

Nel quadrante B (quello normalmente utilizzato nella produzione fotovoltaica di energia elettrica), pur essendo il fotodiode polarizzato direttamente, esso è attraversato da una corrente inversa e si comporta come se avesse resistenza negativa, ovvero se si pone una resistenza tra gli elettrodi p e n il fotodiode si comporta come una sorgente di forza elettromotrice, anche in assenza di un generatore di tensione.

Graficamente quindi, la caratteristica tensione-corrente di un cella illuminata risulta equivalente a quella di un diodo, traslata verticalmente verso il basso di una quantità pari alla corrente fotogenerata, proporzionale all'intensità luminosa.

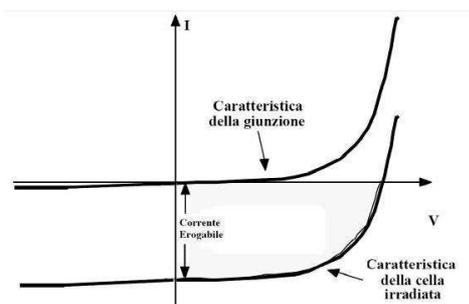


Figura 9: Caratteristica della cella al buio e della cella irradiata

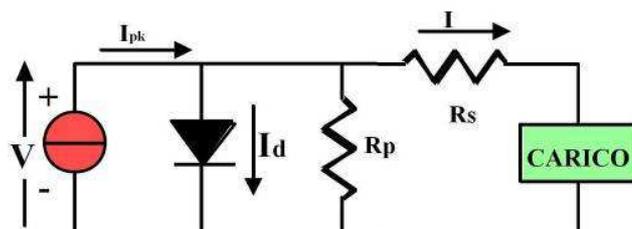


Figura 10: Circuito equivalente di una cella fotovoltaica

Il circuito equivalente di una cella comprende pertanto un generatore di corrente I_{pk} , che tiene conto della corrente generata per effetto fotovoltaico; il diodo che “descrive” la ricombinazione interna alla cella, R_s che rappresenta la resistenza parassita della cella che comprende la resistenza dei due strati di silicio e la resistenza ohmica dei contatti metallici, mentre nella resistenza R_p (resistenza di shunt) sono concentrate tutte le perdite dovute alle correnti di dispersione che si richiudono all'interno della cella. [4]

I pannelli oggi più comuni in commercio hanno una potenza di picco compresa tra gli 80 e i 300 Wp. Il termine “potenza di picco” indica la massima potenza che la cella fotovoltaica eroga in condizioni di lavoro ottimali; tale grandezza viene indicata con l'unità di misura Wp ed esprime la potenza elettrica generata (in Watt) in condizioni standard, le quali corrispondono ad un irraggiamento di 1000 W/m^2 e ad una temperatura della cella di 25°C . Oltre alle condizioni standard ci sono inoltre altre varianti che possono influenzare la potenza di picco, come ad esempio la tolleranza dichiarata dal costruttore.

2.4 Il concetto di efficienza

L'efficienza di una cella solare è il rapporto tra la potenza elettrica che essa trasferisce al carico e la potenza ottica incidente sulla cella; la massima efficienza si ha dunque quando la potenza trasferita al carico è P_{max} . Un numero comunemente usato per caratterizzare la cella solare è il fill factor (*fattore di riempimento*) FF, che viene

definito come il rapporto tra P_{max} e l'area del rettangolo formata da V_{OC} e I_{SC} : $FF = P_{max} / (V_{OC} \cdot I_{SC})$. La potenza ottica incidente è normalmente associata alla potenza solare sulla superficie della Terra, che è approssimativamente di $1mW/mm^2$. La massima efficienza può quindi essere scritta come: $\eta = P_{max} / P_{in} = FF(V_{OC})(I_{SC})/P_{in}$. I_{SC} è direttamente proporzionale alla potenza incidente P_{in} , ma anche V_{OC} cresce in modo logaritmico con la potenza incidente. Tuttavia, con alte concentrazioni di luce solare, gli effetti termici e le perdite elettriche nelle celle limitano l'aumento di efficienza che può essere raggiunto. Pertanto l'efficienza di una cella solare, nella pratica, raggiunge un massimo ad un ben definito livello di concentrazione della radiazione solare.

2.5 Vantaggi e svantaggi del fotovoltaico

L'uso del solare fotovoltaico si è già diffuso enormemente in Europa, da qualche anno anche l'Italia sta velocemente cercando di guadagnare il tempo perduto. In tutto il mondo l'Italia è conosciuta come "il Paese del sole", questo grazie sicuramente alla sua disposizione geografica che la rende particolarmente adatta allo sfruttamento dell'energia solare e poco o nulla adatta allo sfruttamento di altre energie rinnovabili (ad esempio eolica o maree). Come dimostrato da numerose misurazioni effettuate su tutto il territorio e riportate dall' ENEA in un volume intitolato "La radiazione solare globale al suolo in Italia" pubblicato nel 2000, ci si può facilmente rendere conto della potenzialità di produzione di energia elettrica, attraverso lo sfruttamento della luce solare in Italia. Si può affermare che per ogni kWp installato in maniera ottimale (orientamento dei moduli a sud ed inclinazione di 30°) corrisponde la seguente produzione annua :

Nord Italia: 950 kWh/anno

Centro Italia: 1.100 kWh/anno

Sud Italia: 1.275 kWh/anno

Gli aspetti positivi della tecnologia fotovoltaica possono riassumersi in:

- L'energia solare non fa rumore, non produce scorie e non emette cattivi odori, dunque vi è assenza di qualsiasi tipo d'emissione inquinante durante il funzionamento dell'impianto;
- Risparmio dei combustibili fossili;
- Come è risaputo la fonte primaria per il funzionamento degli impianti è quella solare, una fonte inesauribile;
- L'alta radiazione solare in Italia permette grandi volumi di energia prodotta;
- Estrema affidabilità poiché, nella maggior parte dei casi, gli impianti sono fissi, non hanno parti usurabili o in movimento, garanzia ulteriore di affidabilità nel tempo (vita utile superiore ai 20anni). La manutenzione degli impianti è ormai quasi nulla, con costi di esercizio veramente minimi
- Non ha un impatto visivo negativo e non deturpa l'ambiente, anzi i moduli fotovoltaici si prestano molto bene per l'integrazione architettonica e per valorizzare l'estetica di case, edifici ed altri elementi di arredo urbano (come ad esempio costituire la copertura di parcheggi, come mostrato in figura 10, e come si può osservare nel parcheggio in prossimità del nuovo stadio a Padova);



Figura 11: Integrazione architettonica dei pannelli nella copertura dei parcheggi

- Gli edifici che incorporano elementi fotovoltaici trasmettono un'immagine positiva, legata alla cura per l'ambiente e allo sviluppo sostenibile; immagine importante in una società, quale quella attuale, in cui l'ecosostenibilità dei prodotti è fortemente richiesta;
- La tecnologia fotovoltaica non ha bisogno di aree dedicate, in quanto sfrutta aree che altrimenti rimarrebbero inutilizzate (es. tetti, pensiline, facciate di edifici, aree compromesse, parcheggi);
- L'energia elettrica viene generata direttamente sul punto di consumo evitando perdite dovute al trasporto ed ai cambi di tensione. Pertanto la generazione diffusa di molti impianti fotovoltaici riduce i carichi sulla rete elettrica;
- Gli impianti fotovoltaici si utilizzano normalmente direttamente presso l'utilizzatore finale, fattore che ne consente una distribuzione e utilizzo ottimale;
- Ha costi di manutenzione inferiori a tutte le altre fonti energetiche (rinnovabili e non) in quanto tecnologia a stato solido e priva di parti in movimento;
- L'energia viene prodotta quando più ce n'è bisogno (d'estate durante le ore più calde della giornata);
- Modularità: un sistema fotovoltaico può alimentare da una calcolatrice tascabile ad un intero paese, infatti gli impianti possono essere ampliati a piacere aumentando anche successivamente la capacità produttiva semplicemente incrementando il numero di moduli;
- Il fotovoltaico si integra ottimamente con le tematiche legate al risparmio energetico. L'edilizia sostenibile e la progettazione di utenze a basso consumo stanno prendendo velocemente piede attraverso l'attuazione della normativa energetica degli edifici;
- Un generatore fotovoltaico è molto veloce e semplice da installare, ad esempio un impianto da 20 kWp connesso alla rete ed installato su di un tetto, viene realizzato in circa 7-10 giorni dall'inizio dei lavori;
- Possibilità di accesso a strumenti di finanziamento.

I principali svantaggi sono:

- Variabilità e aleatorietà della fonte (radiazione solare);
- Investimento iniziale e costo degli impianti elevato a causa di un mercato che non ha ancora raggiunto la maturità tecnica e economica;
- Necessità di avere a disposizione un'elevata superficie rispetto alla potenza installata (circa 10 m² per ogni kWp installato).
- Il timore della sicurezza sul funzionamento: molti ritengono pericoloso avere "in testa" un sistema che produce energia elettrica; anche queste considerazioni saranno presto rese inesistenti dalla conoscenza maggiore sulle caratteristiche costruttive degli impianti, dai dati statistici sul funzionamento e sulla loro

quasi nulla manutenzione, oltre che dalla serietà e dalla competenza dell'azienda predisposta alla loro installazione e manutenzione.

Per ovviare a quest'ultimo svantaggio, in molti paesi (Germania, Francia, Spagna, Grecia, Italia) lo sviluppo del fotovoltaico è guidato e sostenuto da programmi e meccanismi d'incentivazione governativi, che hanno innescato una forte crescita del mercato, attualmente caratterizzato dal più alto tasso di crescita annuo dell'intero settore elettrico (30-40%).

2.6 Impianti fotovoltaici

L'energia prodotta nelle ore di irraggiamento diurno deve essere opportunamente accumulata per un utilizzo differito anche nelle ore notturne. Proprio in funzione dei diversi sistemi di accumulo gli impianti fotovoltaici sono classificati in due diverse tipologie: *impianti ad isola* e *impianti connessi alla rete*.

Gli impianti *connessi in rete* (o grid connected) prevedono l'interconnessione dell'impianto alla rete elettrica nazionale o locale; quelli *isolati* (o stand alone) sono progettati per rimanere appunto isolati, e vengono realizzati in situazioni particolari in cui la connessione alla rete elettrica è impossibile o comunque troppo costosa. Gli impianti connessi in rete sono più flessibili, e meno costosi di quelli isolati, perché non richiedono l'acquisto di accumulatori per immagazzinare l'energia elettrica prodotta e non consumata.

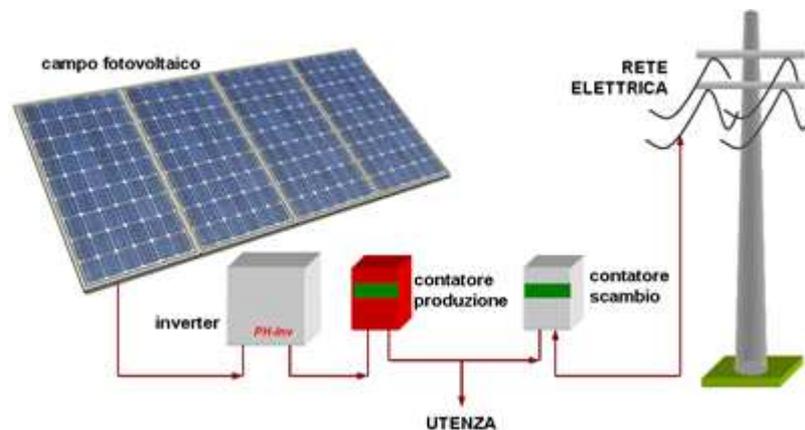


Figura 12: Impianto fotovoltaico

La struttura degli impianti fotovoltaici connessi in rete (i soli per i quali è previsto l'incentivo in Conto Energia), è piuttosto semplice: sono composti dal campo fotovoltaico, dall'inverter e dai contatori (Figura 11). Il campo fotovoltaico non è altro che l'insieme di più moduli fotovoltaici opportunamente collegati tra loro, che svolge il compito di catturare l'energia solare e convertirla in corrente continua; l'inverter è il dispositivo elettronico che svolge la funzione di trasformare la corrente continua prodotta dal campo fotovoltaico, in corrente alternata di caratteristiche compatibili con quella della rete elettrica; i contatori (che possono essere uno o più di uno, a seconda della tipologia), hanno il compito di contabilizzare l'energia elettrica prodotta dal campo fotovoltaico (per ricevere l'incentivo del Conto Energia), e quella eventualmente scambiata con la rete elettrica. L'installazione ideale di un impianto fotovoltaico prevede che le superfici dei pannelli siano esposte a sud, con inclinazione di circa 30-35° rispetto all'orizzonte. Tuttavia esposizioni e inclinazioni diverse, entro certi limiti,

non riducono troppo le prestazioni dell'impianto. In ogni caso la configurazione dell'impianto va studiata e adattata caso per caso.

Il Conto Energia prevede delle tariffe incentivanti per ogni kWh di energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico connesso in rete. Le tariffe, riconosciute per 20 anni, sono variabili a seconda della taglia dell'impianto (maggiori per quelli più piccoli), e del suo grado di integrazione architettonica (tariffe maggiori per gli impianti meglio integrati).

L'energia elettrica prodotta può poi essere utilizzata direttamente oppure immessa in rete, potendo scegliere tra il regime di scambio sul posto (per impianti di taglia inferiore a 200 kW) o la cessione, cioè la vendita, in rete (per tutti gli impianti). Il guadagno dunque è doppio: nel caso dello scambio sul posto, oltre alla tariffa incentivante, si ha un risparmio in bolletta per l'energia elettrica non prelevata; nel caso di cessione in rete invece, si ha l'ulteriore guadagno derivante dalla vendita dell'energia elettrica.

Il settore del fotovoltaico nel nostro paese ha raggiunto un livello di sviluppo tale che ora ciò che fa veramente la differenza, non è la quantità, ma la qualità: l'innovazione delle tecnologie assume così un peso sempre maggiore nel comparto produttivo e nel mercato. Sotto questo aspetto, l'approdo nel nostro paese di nuovi modelli di micro-inverter (frutto di ricerche condotte negli USA) segna un salto di qualità per il fotovoltaico. A differenza dei tradizionali inverter, questa nuova tecnologia permette di convertire la corrente continua in alternata direttamente sul tetto, perché il sistema è montato singolarmente su ogni modulo fotovoltaico: il cablaggio è interamente in parallelo e in corrente alternata. In tal modo, l'ottimizzazione energetica si manifesta con incrementi nella produzione di energia che vanno dal 5% al 25% rispetto ai sistemi tradizionali.

2.7 L'Italia e il solare

Il fotovoltaico ha ottenuto un largo consenso dagli italiani, che dimostrano di considerarlo una forma di risparmio sia a livello domestico che per le attività produttive. Il tutto in sintonia con un generale orientamento verso forme di energia pulite ed eco-sostenibili. Lo confermano i dati diffusi dall'Ufficio Studi di Confartigianato, in base ai quali il fotovoltaico ha compiuto un sorpasso storico sull'eolico, divenendo la prima fonte rinnovabile dopo l'idroelettrico. In particolare, a febbraio 2012 il settore ha fatto registrare 10678 GWh di potenza installata, contro i 10568 GWh dell'eolico. Lo sviluppo del fotovoltaico è stato rapido e deciso: fra maggio 2011 e maggio 2012 la produzione da fotovoltaico è aumentata di 11220 GWh (contro un aumento di 2448 GWh dell'eolico). Nel frattempo le fonti tradizionali hanno fatto registrare una diminuzione di 12373 GWh. Più in generale, attualmente, l'energia prodotta da fonti rinnovabili in Italia ammonta al 26,2%. Inoltre, i dati del Gse relativi agli impianti installati nel corso del 2011 (da 7647 a 330196), confermano l'Italia quale prima nazione al mondo per il fotovoltaico. La nuova potenza fotovoltaica installata sul territorio nazionale ha infatti rappresentato più del 33% di tutto il mercato mondiale dello scorso anno; a crescere sono stati soprattutto gli impianti di piccola taglia, con l'incremento maggiore nel range 1-5 Megawatt di potenza. Nel corso del 2011, secondo quanto confermato anche dall'Epia (Associazione europea dell'industria fotovoltaica) nel suo ultimo Global market outlook, l'Italia ha installato 9300 Mw fotovoltaici, seguono la Germania con 7500 Mw, e le due principali potenze extra-europee: Cina (2200 Mw) e Stati Uniti (1900 Mw). In totale, gli impianti in esercizio nel nostro Paese alla fine del 2011 avevano una potenza complessiva di 12700 Mw, valore che a maggio 2012 ha in realtà raggiunto e superato i 13160 Mw. A livello regionale la maggiore potenza installata si trova in Puglia (17,1% del totale) e Lombardia (10,3%), poi a seguire Emilia Romagna, Veneto e Piemonte. In termini di numero di impianti la leadership regionale spetta alla Lombardia (14,7%), seguita da Veneto (13,6%) ed Emilia Romagna. Quanto alla localizzazione degli impianti, il 49% è su terreno, il 41% è su tetti, il 6% è su pensiline e serre e infine vi è un 4% residuale. In termini di tecnologie usate, il 70% dei moduli è in silicio policristallino, il 23% in silicio monocristallino e il 7% è rappresentato da film sottili. Circa il 65% della potenza fotovoltaica installata in Italia fa riferimento al settore industriale, mentre la quota del comparto residenziale si attesta sul 9%. I dati sono in sintonia con l'andamento positivo del mercato delle rinnovabili, passato da 18,3 GW di potenza installati nel 2000 (per il 91% allora rappresentati dalle centrali idroelettrici) a 41,3 GW nel 2011, con un incremento del 125%. Il 75% dell'aumento si è avuto solo negli ultimi 4 anni; a guidare questo boom dell'energia "pulita" è stato proprio il fotovoltaico che a fine 2011 rappresentava il 31% della potenza rinnovabile installata, mentre l'idroelettrico si attesta ora al 43%. La produzione elettrica da fonti "pulite", che nel 2000 era di 51 TWh, nel 2011 ha raggiunto quota 84 TWh: 33 TWh di produzione elettrica dovuta quasi totalmente a eolico, fotovoltaico e bioenergie.

Il fotovoltaico a film sottile

I pannelli fotovoltaici, nell'arco di vent'anni, sono passati dall'essere una fonte di energia emergente ad una tecnologia generante energia, commercialmente valida in più di quaranta paesi, e questo grazie ai progressi tecnologici e alla disponibilità di strumentazioni e macchinari sempre più efficienti ed affidabili. Il mercato mondiale del fotovoltaico è in rapida espansione, con l'installazione di pannelli che, dal 2009, è aumentata del 79% e con una capacità globale dei pannelli installati aumentata anno per anno del 55,3%.

La ricerca scientifica ha fatto davvero passi da gigante nell'implementare la resa dei pannelli solari. Tra le applicazioni sulle quali oggi si scommette di più, un posto di riguardo spetta senz'altro al fotovoltaico a film sottile, che costituisce uno dei settori in più rapida crescita nel mercato dei pannelli solari. Questo probabilmente è dovuto al fatto che il costo di produzione di questi nuovi sistemi risulta essere assai più contenuto rispetto a quelli di silicio tradizionali. Questi nuovi sistemi richiedono infatti un minor impiego di silicio per produrre energia elettrica, soddisfacendo così per l'appunto le attuali esigenze di contenimento dei costi. La materia principale del solare, il silicio, è presente in abbondanza, ma nella sua forma pura risulta costoso, tanto da indurre molte aziende a rinviare gli investimenti in mancanza di liquidità necessaria. Il film sottile consente di ovviare a questo problema utilizzando strati molto sottili di silicio, riducendo in tal modo i costi, inoltre i moduli a film sottile impiegano materiali indubbiamente affidabili e, se confrontati con quelli delle celle tradizionali, sicuramente economici (ricordiamo che il costo dei materiali incide per il 50% sul costo complessivo del pannello). L'altro lato della medaglia tuttavia è costituito da un'efficienza in media lievemente inferiore rispetto ai pannelli che utilizzano celle solari tradizionali, tasto sul quale comunque si sta sviluppando la ricerca. Le più grandi aziende si stanno attrezzando: il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti ha recentemente messo a disposizione 646 milioni di dollari per un impianto a film sottile da 230 MW dell'Antelope Valley Solar Ranch 1 Project, che sarà realizzato con moduli a film sottile al tellururo di cadmio di First Solar in California; mentre General Electric fornirà moduli con questa tecnologia per contribuire a creare una centrale da 50 MW nello Stato di Ceará, in Brasile. Ed anche in Italia si lavora per produrre pannelli "thin film" pensati per essere installati soprattutto sui tetti di capannoni e strutture industriali.

3.1 Vantaggi e svantaggi del film sottile

Riassumendo quindi, il film sottile fotovoltaico ha due principali vantaggi: prezzo contenuto di produzione e vasta gamma di applicazioni. Tuttavia non si esauriscono qui: tra i molti vantaggi apportati dall'uso del film sottile occorre ricordare che:

- La produzione diminuisce di misura inferiore con l'aumentare della temperatura. I pannelli al silicio a film sottile hanno difatti un notevole vantaggio nelle loro prestazioni energetiche effettive, dovuto innanzitutto ad un proprio coefficiente di "penalità" di temperatura che è inferiore di più del 50% di

quello delle convenzionali celle al silicio cristallino. Con climi caldi, questo si traduce in una produzione che supera del 5-10% per watt installato quella del silicio cristallino;

- Si degrada immediatamente subito dopo la produzione e resta poi stabile nel tempo;
- Risente in misura minore delle zone d'ombra;
- È meno sensibile all'inclinazione non ottimale, al contrario del cristallino, quindi è più adattabile alle superfici;
- Usufruisce di più ore di luce: inizia a produrre prima al mattino e termina più tardi la sera;
- Sfrutta meglio la luce diffusa e riflessa
- Produce in misura maggiore con cielo nuvoloso;
- La fabbricazione di un modulo a film sottile richiede meno processi delle convenzionali celle al silicio cristallino;
- La tecnologia a film sottile impiega solo sostanze atossiche ed eco-compatibili;

In contrasto a questi fattori positivi risulta esserci ancora il limite dell'efficienza ad ostacolare un rapido e deciso sviluppo; ma attualmente, si stanno sviluppando nuove e numerose tecniche che rapidamente potrebbero effettivamente far superare per diffusione e convenienza i pannelli di silicio tradizionali. Significativo è infine il fatto che secondo il Centro di Ricerca della Commissione europea, il mercato del fotovoltaico raddoppierà entro i prossimi cinque anni; lo studio indica anche le sfide da affrontare: secondo il rapporto, per mantenere la crescita, le industrie dovranno ridurre la quantità di silicio usata per ogni cella e aumentare la fabbricazione di pannelli a film sottile.

3.2 Il metodo dello sputtering

Vi sono numerosi metodi per realizzare film sottili di diversi materiali; si suddividono principalmente in tre macro classi: metodi in fase gassosa, liquida o solida. Ogni metodo fa ottenere risultati differenti sia a seconda delle condizioni di temperatura, pressione e materiale di partenza, ma anche e principalmente in funzione del metodo di organizzazione. Nella tecnologia del film sottile i singoli semiconduttori sono semplicemente evaporati e depositati in strati sopra un supporto di vetro o di metallo, ma anche su supporti flessibili come teli che possono essere opportunamente piegati secondo le esigenze applicative. Tra i vari sotto metodi di produzione, un particolare accenno è doveroso effettuarlo in riferimento alla tecnologia denominata con il termine di “*sputtering*” (rientrante nella macro classe dei metodi in fase gassosa). Lo sputtering risulta essere un sistema in cui un bombardamento di ioni estrae atomi da vari materiali depositandoli sul substrato scelto. Questo processo avviene sotto vuoto e richiede un tempo minore rispetto alla semplice evaporazione. Lo sputtering è la tecnologia più pulita di ogni altra tecnica di rivestimento e fornisce una differenziata combinazione di vantaggi basata prima di tutto su un metodo di deposizione economicamente efficiente che genera un sottile e uniforme

rivestimento, ed in secondo luogo su un processo a bassa temperatura. Altri vantaggi evidenziano un forte legame tra il film semiconduttore ed il substrato perché entrambi sono saldati a livello molecolare, una versatilità operativa perché è un trasferimento a freddo, che può essere usato per depositare materiali su ogni tipo di substrato, come i metalli, la ceramica, il vetro e i materiali plastici, ed infine il processo ha la possibilità di automatizzare il controllo di deposizione. La deposizione per sputtering consente di avere film di ottima qualità, composti da ogni tipo di materiale e con particolari accorgimenti consente la creazione di ricoprimenti con proprietà differenti dal materiale di partenza.

3.3 Suddivisione interna al film sottile

Attualmente i principali materiali impiegati per la realizzazione dei moduli a “film sottile” risultano essere:

- Il *Silicio amorfo*, in cui gli atomi silicei vengono depositi chimicamente in forma amorfa, ovvero strutturalmente disorganizzata, sulla superficie di sostegno. Questa tecnologia impiega quantità molto esigue di silicio (spessori dell'ordine del micron), e i moduli in silicio amorfo mostrano in genere un'efficienza meno costante delle altre tecnologie rispetto ai valori nominali, pur avendo garanzie in linea con il mercato.
- *Tellururo di cadmio (CdTe)*: sono i pannelli a film sottile più economici e col più basso rendimento termodinamico. A Maggio 2011, il Consiglio d'Europa ha confermato che non esiste alcun divieto di produzione o installazione di questi pannelli, allo scopo di rispettare gli obiettivi prefissati in termini di energie rinnovabili ed efficienza energetica; contestualmente, data la sua documentata tossicità, ha inserito il cadmio nella lista dei materiali vietati nelle produzioni elettriche o elettroniche. Il divieto di utilizzo nella produzione di celle fotovoltaiche parte dal 2013.
- *Solfuro di cadmio (CdS) microcristallino*, che presenta costi di produzione molto bassi in quanto la tecnologia impiegata per la sua produzione non richiede il raggiungimento delle temperature elevatissime necessarie invece alla fusione e purificazione del silicio. Esso viene applicato ad un supporto metallico per spray-coating, cioè viene spruzzato come fosse una vernice. Tra gli svantaggi legati alla produzione di questo genere di celle fotovoltaiche vi è la tossicità del cadmio ed il basso rendimento del dispositivo.
- *Arseniuro di gallio (GaAs)*, una lega in grado di assicurare rendimenti elevatissimi, dovuti alla proprietà di avere un gap diretto, a differenza del silicio. Viene impiegata soprattutto per applicazioni militari o scientifiche avanzate, come missioni automatizzate di esplorazione planetaria o fotorivelatori particolarmente sensibili. Tuttavia il costo proibitivo del materiale monocristallino a partire dal quale sono realizzate le celle, lo ha destinato a un impiego limitato.
- *Diseleniuro di indio rame (CIS)*, con opacità variabile dal 100% al 70% ottenuta mediante fori ricavati direttamente nel film.
- *Diseleniuro di indio rame gallio (CIGS)*

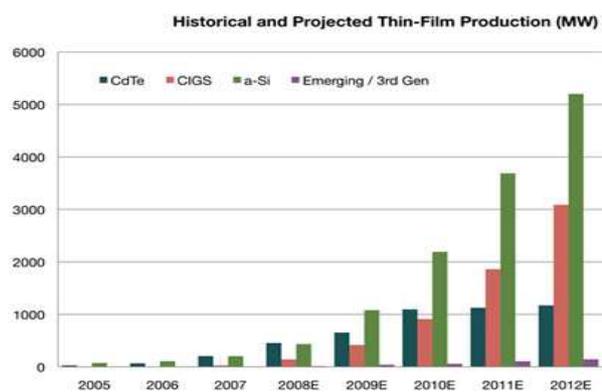


Figura 13: Comparazione delle produzioni di celle a film sottile CdTe, CIGS, amorfo e organico

3.3.1 Silicio amorfo

Da molti anni sono in funzione sistemi fotovoltaici che usano pannelli in silicio amorfo, il primo impianto da 1 MW risale al 1984. Il silicio amorfo depositato su un supporto opportuno rappresenta una scelta concreta per avere il fotovoltaico a costi bassi rispetto a pannelli che usano altre forme del silicio (monocristallino e policristallino).

I pannelli in a-Si necessitano di un quantitativo abbastanza basso di energia per essere prodotti. Il rendimento di questi pannelli non è molto elevato e questa è il loro maggior svantaggio, per ogni metro quadrato di pannelli solari in silicio amorfo si ottengono tipicamente solo 60 W di picco. L'efficienza dell'amorfo, quindi, intesa come capacità di trasformare l'energia del sole in energia elettrica, è molto più bassa del monocristallino, perciò sono necessarie aree più grandi per avere la stessa energia. Dopo tre-sei mesi, il rendimento iniziale dell'a-Si cala e si stabilizza su un meno 20% che è già compreso nella potenza del pannello indicata in etichetta, quindi nei primi mesi si ha un pannello più potente di quello indicato nelle specifiche. Nel peggiore dei casi un pannello in a-Si ha nei primi 20 anni una potenza che è l'80% della potenza di picco, quindi se il prezzo di vendita è di 2€/Wp, in realtà diventa 2.5€/Wp (2€/0.80) per i pannelli dopo 20 anni di funzionamento, con un costo medio che è la via di mezzo. Comunque anche le altre tecnologie del fotovoltaico hanno gli stessi problemi di decadimento del rendimento, per questo generalmente i pannelli sono garantiti per l'80-85% della potenza dopo 20-25 anni, di qualsiasi tecnologia si tratti.

In più l'amorfo rispetto al monocristallino ha maggiore capacità di trasformare la luce solare quando il sole è forte (bassa dipendenza dell'efficienza dalla temperatura) e quando il sole è debole (con bassa luminosità l'efficienza è alta), sono differenze non di grande rilevanza, si parla di un 5-10-15%, ma ci sono studi che dimostrano che in un anno si produce più energia per ogni watt di picco con l'amorfo rispetto ad altre tecnologie.

Riassumendo, il vantaggio dei pannelli in silicio amorfo è un costo minore e lo svantaggio è una maggiore superficie usata (dal 40 al 100% in più).

Ci sono diverse tecnologie per costruire le celle in silicio a film sottile e a seconda della particolare tecnologia si hanno rendimenti più elevati ma anche costi più elevati. Il silicio policristallino e quello monocristallino, come si vede dalla Tabella 1, hanno costi superiori ma anche efficienze più elevate, tipicamente per un metro quadro di pannelli di questo tipo si hanno potenze pari a 130-140 W di picco.

Esistono poi i pannelli fotovoltaici in Tellururo di cadmio prodotti dalla First Solar che hanno attualmente i prezzi migliori del mercato. Un metro quadrato del semiconduttore Tellururo di cadmio ha tipicamente 105 watt di picco, un costo di produzione di 93 centesimi di dollaro al watt di picco e un prezzo di vendita del produttore di circa 1.70-1.80 \$/Wp.

	Silicio amorfo	Silicio mono/policristallino	Tellururo di cadmio
Watt di picco/m²	60	140/130	105
Costo al produttore (\$/Wp)	1.50	1.80-2.00	0.93

Tabella 1: Confronto produzione-costo tra amorfo, cristallino e CdTe

3.3.2 CIS

I moduli in CIS (*diseleniuro di indio rame - CuInSe₂*), integranti orizzontalmente, sono capaci di assorbire su un vasto spettro di luce ed offrire una notevole potenza sviluppata, anche in condizioni meteo non proprio ottimali. Per mezzo della loro elevata affidabilità e vita utile, i moduli solari CIS sono particolarmente adattabili alla maggior parte delle applicazioni e per irradiazione solare di intensità variabili. Se paragonate alle tecnologie in silicio mono e policristallino, i sistemi CIS, in condizioni reali, indicano rese energetiche superiori, grazie alle ottime prestazioni anche in situazioni di illuminazione più bassa e dei migliori - cioè più bassi - coefficienti di temperatura. L'aspetto del prodotto, connotato da un colore nero intenso dei nuovi moduli CIS, e la loro adattabilità, da un punto di vista prettamente dimensionale e di forme, rendono questi sistemi elementi architettonici di elevato valore proponendoli per soluzioni di design di stile e funzionali. Per esempio oltre per l'integrazione negli edifici, i moduli al CIS sono molto indicati per l'integrazione su misura in prodotti utilizzabili nella vita quotidiana (cellulari, laptop).

3.3.3 CIGS

Il CIGS è la più promettente tecnologia fotovoltaica composta da Rame, Indio, Gallio e Selenio. Questi quattro materiali rendono le potenziali prestazioni delle CIGS molto più alte di ogni altro film sottile. Il CIGS infatti, a parità di quantità di luce, produce più elettricità rispetto agli altri film sottili e perciò possiede un'alta "efficienza di conversione", estremamente stabile nel tempo: ciò significa che le prestazioni rimangono invariate per molti anni. Il Diseleniuro di Rame Indio (CuInSe₂) ha un' estrema capacità di assorbire lo spettro solare che gli permette di utilizzare il 99% della luce già nei primi micron di materiale: questo fattore lo rende un ottimo ed efficace materiale fotovoltaico. Aggiungendo poi una piccola quantità di Gallio al CuInSe₂ si copre l'intero spettro solare, che lo avvicina al massimo possibile di assorbimento delle radiazioni solari, aumentando di conseguenza l'efficienza della cella fotovoltaica. Le celle con tecnologia CIGS vengono oggi poste sul mercato con una garanzia di 25 anni in quanto non vi è alcun processo intrinseco che ne determini una drastica riduzione delle prestazioni nel tempo; anzi, al contrario dei pannelli in silicio cristallino, queste celle spesso migliorano le loro prestazioni col passare del tempo poiché durante le condizioni operative reali la struttura del reticolo cristallino viene "rigenerata" durante il funzionamento per mezzo della presenza del rame. I moduli CIGS vengono realizzati con macchinari a stampaggio che depositano uno strato di nano inchiostro assorbente su di un sottile foglio metallico come l'alluminio. L'uso dell'alluminio come sottostruttura assicura un alto livello di conducibilità consentendo contemporaneamente una riduzione notevole dei costi, evitando di depositare separatamente uno strato posteriore che funga da elettrodo. Proprio grazie al CIGS, l'azienda italiana P.Energy, azienda di automazione industriale nel settore fotovoltaico, e la start-up svedese Midsummer Ab, specializzata nello sviluppo di tecnologie per la deposizione di film sottile, hanno prodotto un nuovo materiale che permette di realizzare pannelli fotovoltaici riciclabili al 100%, senza l'impiego di silicio, né di E.v.a. (etilene vinile acetato). Il principio sfruttato consiste nel deposito di uno strato sottile di film CIGS su celle di acciaio; il materiale permette di sostituire l'E.v.a., che non può essere riutilizzata ma soltanto bruciata in un altoforno, con conseguente pesante impatto ambientale. Il CIGS, al contrario, permette di recuperare completamente i moduli alla fine del ciclo di vita; viene infatti garantita la reversibilità del processo a 200°C, senza che questo impieghi gas contenenti acidi acetici. I vantaggi sono importanti anche dal punto di vista della performance, in quanto il CIGS ha una forza di adesione al vetro superiore a quella dell'E.v.a., una migliore capacità di isolamento

elettrico e offre una barriera contro l'umidità. Sebbene quindi il CIGS sia una tecnologia già applicata nei pannelli a film sottile, la partnership italo-svedese ha messo a punto un inedito processo di assemblaggio, realizzato attraverso un nuovo macchinario per la saldatura delle celle CIGS, e una nuova modalità di laminazione per produzioni su larga scala. Le materie prime impiegate per l'assemblaggio, infine, sono al 100% rinnovabili e riutilizzabili.

Le celle solari quali CIS e CIGS sono generalmente depositate su substrati in vetro e flessibili. L'uso di substrati flessibili è stato perseguito per motivi di leggerezza e di resistenza, giacché questi non si rompono facilmente; inoltre possono essere fabbricati usando un roll-to-roll process e dunque permettendo la produzione di massa. Tuttavia celle CIS flessibili che usano poliammide come substrato, per esempio, hanno generalmente efficienze di conversione inferiori rispetto ai film su substrato di vetro. Questo è dovuto al fatto che la formazione di celle CIS a film sottile di alta qualità con bassa densità di difetti richiede temperature superiori ai 500°C e, se termoresistente, un normale poliammide può solo sostenere temperature fino a 450°C. Tuttavia alcuni ricercatori giapponesi hanno sviluppato un poliammide con resistenza al calore maggiore di 500°C, grazie a questo si possono dunque usare temperature di processo appropriate (500°), necessarie per la corretta formazione delle celle solari CIS e CIGS.

3.4 Un'alternativa “green” per CIS e CIGS

Le celle fotovoltaiche a film sottile, strutturate come un diodo pn, hanno dunque due strati, uno di tipo p e uno di tipo n. Le celle di tipo CIS e CIGS comunemente hanno uno strato tampone di solfuro di cadmio (CdS), che viene posto a contatto con il layer di tipo p. Nella maggior parte dei casi, lo strato di solfuro di cadmio viene depositato usando una tecnica di deposizione a bagno chimico (CBD). Ma questo è un processo lento che richiede numerose ripetizioni per ottenere lo spessore desiderato, e utilizza una gran quantità di prodotti chimici, incluso il cadmio, che è una sostanza estremamente tossica. Rimpiazzare il cadmio e il CBD permetterebbe di eliminare i pericoli ad essi connessi nel corso della produzione, del trattamento e dello smaltimento dei rifiuti. Per queste ragioni, la Solar Frontier sta già offrendo moduli CIS senza cadmio, e prima o poi ogni azienda produttrice di moduli CIS dovrà sviluppare una soluzione senza l'utilizzo del cadmio affinché sostituisca in modo adeguato lo strato di cadmio, qualora venga proibito l'uso nel mercato del materiale tossico. Nell'agosto dell'anno scorso, il ricercatore Martines R. Casiano della US-based Heliovolt Corp. è stato premiato per il suo processo senza cadmio di film sottile. Tale processo prevede quattro step: la formazione di un iniziale precursore liquido, la formazione di un secondo precursore, la miscelazione di entrambi per formare il materiale di rivestimento, e infine il rivestimento del substrato con il materiale. Si possono impiegare un certo numero di materiali come valide alternative per produrre precursori liquidi e uno strato tampone senza cadmio, Casiano si è concentrato sul solfuro di zinco (ZnS) come sostituto. I film con solfuro di zinco hanno grani più piccoli e pellicole più sottili con buona copertura (zona di ricezione), mentre i film a solfuro di cadmio hanno grani grossi e sono più spessi. Secondo il brevetto di Casiano, insieme ai benefici quali la compatibilità ambientale, il solfuro di zinco ha anche una maggiore trasmissione ottica e risposta spettrale nella zona a bassa lunghezza d'onda, oltre che una miglior prestazione elettrica dei film sottili al solfuro di cadmio.

Alcune aziende sono già prossime al lancio sul mercato di celle solari con efficienze superiori al 25-30% realizzate con l'utilizzo di film sottili assai costosi come il GaAs. Il mercato oramai si sta allineando a quanto

previsto già diversi anni fa, ossia alla richiesta di prodotti sempre più performanti ed a basso costo. In sintesi l'evoluzione sembrerebbe la seguente: alla prima tipologia di celle solari ad efficienza bassa (15-20%) e ad elevato costo, si stanno sostituendo gradualmente una seconda genesi di prodotti a basso costo ed efficienza ancor più limitata (5-10%). Si prevede che la futura terza generazione di celle solari avranno costi leggermente più sostenuti di quelli di seconda generazione ma efficienze elevate, generando in tal modo un costo unitario dell'elettricità chiaramente più basso.



Figura 14: Pannello a film sottile (a sinistra) e pannello con celle solari wafer integrate

Le opzioni dunque che ci offre l'odierna tecnologia, vedono schierati da un lato i *pannelli a film sottile*, dall'altro quelli basati sulla lavorazione dei *wafers*: i primi permettono costi molto inferiori, un'integrazione monolitica grazie alla connessione in serie mediante tecniche laser, nonché una minor necessità di materiale, un processo con un numero ridotto di step e facilmente automatizzabile; i secondi costituiscono una tecnologia ormai matura, in cui il silicio viene ottenuto in wafer che vengono in seguito connessi tra loro per formare il modulo fotovoltaico, e tuttavia risulta più costosa a causa della maggiore quantità di silicio richiesta.

CELLA SOLARE	MATERIA PRIMA (Si)	EFFICIENZA	POTENZA DI PICCO	POTENZA DI PICCO
c-Si	1200-1300 g/m ²	16%-20%	160 W/m ²	0.13 W/g
Film sottile-Si	5 g/m ²	9.7%-17.3%	100 W/m ²	20 W/g

Tabella 2: Confronto tra celle al silicio cristallino e celle a film sottile

La tecnologia del film sottile è in pieno sviluppo e permette un rendimento maggiore rispetto ai vecchi pannelli: anche la grid parity inizia ad avvicinarsi a 13-15 cent€ nelle migliori ipotesi; per arrivare veramente ad una parità occorre, oltre ad una diminuzione ulteriore dei costi, anche un aumento di efficienza.

3.5 Prezzi ed efficienze a confronto

Volendo determinare quale sarà la tecnologia a film sottile più utilizzata, non essendoci ad oggi problemi di produzione su larga scala con nessuno dei materiali visti in precedenza, il prezzo deciderà il vincitore. Attualmente il silicio amorfo ha un'efficienza tra le più basse (tra il 6,5% e il 7%), ma non presenta effetti tossici come il Tellururo di Cadmio, il quale ha raggiunto un costo di produzione tra i più bassi ma è tossico se disperso

nell'ambiente. Rimangono ancora alcuni difetti di standardizzazione per il Diseleniuro di indio rame e il Diseleniuro di indio rame gallio, che attualmente raggiungono già un'efficienza del 9% anche se si rivela essere quello più promettente. La ricerca negli ultimi mesi ha fatto progressi da gigante: in laboratorio si è arrivati a raggiungere un'efficienza energetica superiore al 20%, mentre negli USA alcune società come la MiaSolè vendono dei pannelli di materiale polimerico CIGS che raggiungono le stesse prestazioni del silicio cristallino, ovvero quasi il 16%. I costi di quest'ultimo sono ancora i più alti ma le previsioni di ricerca fanno sperare in una riduzione veloce dei prezzi di commercializzazione grazie anche al risparmio energetico ottenuto nel processo di fabbricazione (450 gradi contro i 550 precedenti necessari). Il CIGS ha un'efficienza di conversione stabile che permette prestazioni costanti per molti anni: inoltre l'uso dell'alluminio come sottostruttura garantisce un alto livello di conducibilità e costi molto contenuti. Riducendo così il 99% del silicio utilizzato rispetto ai pannelli tradizionali è possibile un risparmio di costi, di cui beneficiano soprattutto gli stabilimenti su larga scala.

Ad oggi la diminuzione dei prezzi sul multicristallino porta una stima per il 2015 intorno a 0,93 \$/W (rispetto a 1,30\$/W del 2010). La riduzione dei costi avverrà anche grazie all'aumento dell'efficienza delle strutture che passeranno da una resa del 14% nel 2009 al 16,1% nel 2015. Miglioramenti sono previsti anche per i film di silicio che passeranno da un'efficienza attuale del 9% - 10% a più del 11%, portando i costi da 1,25 \$/W a 0,80 \$/W nel 2015. Il tellururo di cadmio rimane la tecnologia più economica nonostante sia quella meno efficiente: è prevista una discesa da 0,75 \$/W nel 2010 fino a 0,54 \$/W nel 2015. La vera novità in termini di costi sarà per le tecnologie CIGS che secondo gli ultimi dati crolleranno da 1,69 \$/W a 0,76 \$/W nel 2015 e sarà garantita un'efficienza del 14,2%.

	Silicio multicristallino	Silicio amorfo	Tellururo di cadmio	CIGS	CIS
Costo nel 2010 (\$/W)	1,30	0,8	0,75	1,69	0,9
Costo nel 2016 (\$/W)	0,43	0,3	0,54	0,76	0,5
Efficienza nel 2010	14%-19%	7%	16%-17.3%	9%-15.91%	12.2%
Efficienza nel 2020	23%			< 16,2%	15.5%

Tabella 3: Confronto costo-efficienza tra diversi tipi di celle a film sottile e quella multicristalline

È davvero un settore in fermento quello dei fotovoltaici a film sottile. A livello industriale si segnalano almeno due notizie significative: la prima è rappresentata dalla recente apertura a Catania del più grande stabilimento produttivo italiano di pannelli fotovoltaici. Frutto di una joint venture paritetica tra Enel Green Power, Sharp e STMicroelectronics, lo stabilimento produce moduli fotovoltaici a film sottile multigiunzione e l'obiettivo iniziale è fissato a 160 MW l'anno. L'azienda punterà a soddisfare la domanda dei mercati del solare dell'area Emea (Europa, Medioriente e Africa). La seconda è rappresentata dai progressi nel settore raggiunti a livello industriale dalla elvetica Oerlikon Solar: la società ha annunciato che la nuova generazione della sua linea di moduli thin film consente un abbattimento dei costi di oltre il 20%. Da quanto segnalato dalla società, la nuova linea produttiva è in grado di produrre moduli a film sottile al silicio di alta qualità a un costo di circa 0,35 euro/Wp. Le due notizie sono segnali chiari che testimoniano il dinamismo di un settore, quello appunto del fotovoltaico a film sottile, per il quale è prevista a una sensibile diffusione. Secondo le ultime ricerche del

Politecnico di Milano, infatti, la tecnologia a film sottile, dal 2008 dove veniva utilizzata nel 16% dei casi, arriverà ad una diffusione del 34% entro fine 2012.

3.6 Un nuovo materiale ibrido aumenta l'efficienza delle celle

Un team di ricercatori dell'Ohio State University, guidato dal professore Malcolm Chisholm e finanziato dalla National Science Foundation, ha sviluppato nell'ottobre del 2008 un materiale ibrido ottenuto dall'unione di diversi materiali conduttivi, fra cui plastica e metalli, compresi il molibdeno e il titanio. Questo materiale, sostengono i ricercatori, sarebbe in grado di utilizzare l'intera gamma dei colori nella luce visibile (la porzione dello spettro elettromagnetico visibile dall'occhio umano è approssimativamente compresa tra 400 e 700 nanometri di lunghezza d'onda, ovvero tra 750 e 428 THz di frequenza). Questo intervallo coincide con la regione di massima emissione da parte del sole ma le normali celle fotovoltaiche non sono in grado di catturare l'intero spettro del visibile il che le rende parzialmente inefficienti. Esistono diversi materiali ibridi utilizzati nella tecnologia dell'energia solare ma il vantaggio del materiale ibrido che è stato scoperto è che è in grado di coprire l'intera gamma dello spettro solare. Le celle solari tradizionali infatti potevano solo catturare una piccola frazione di energia contenuta nella luce del sole. Questo materiale è risultato il primo che sia riuscito ad assorbire tutta l'energia contenuta nella luce visibile in una sola volta.

3.7 Brilla più luce nelle celle solari a film sottile con epi-Si

[5] Le celle a film sottile con silicio epitassiale si presentano sullo scenario del futuro del fotovoltaico come un'alternativa attraente alle celle solari tradizionali al silicio. Queste celle si basano su uno strato epi sottile di alta qualità che cresce sopra un layer di silicio fortemente drogato. Il processo di realizzazione di tali celle, sebbene con una propria specificità, si può ritenere simile a quello usato per le celle tradizionali. In Figura 15 è illustrata la sezione trasversale di una cella epi-Si. A seconda della qualità del layer epi, per ridurre il costo per W_p , è solitamente ritenuto ottimale uno spessore di 20 micron. Uno strato attivo così sottile limita però l'assorbimento della luce, provocando una diminuzione della prestazione della cella. Risulta quindi necessaria l'implementazione di una accorta struttura di confinamento della luce; ad esempio, è questo il caso di una struttura con una texturized surface e un riflettore intermedio di silicio poroso (PSi). Il ruolo del riflettore PSi è quello di incrementare l'assorbimento, nello strato attivo epi, dei fotoni a bassa energia. Esso è collocato all'interfaccia del substrato epi, come si vede in Figura 15, e viene inserito elettrochimicamente nel substrato fortemente drogato.

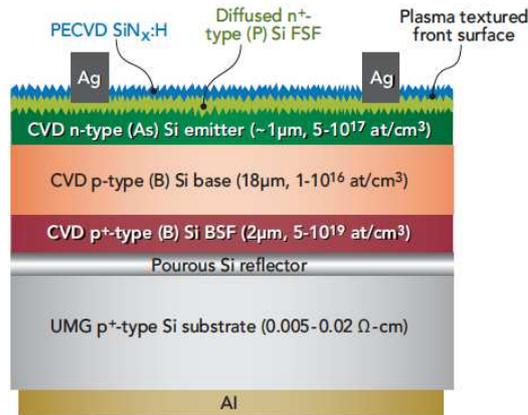


Figura 15: Sezione trasversale di una tipica cella con uno “epitaxial stack” consistente in un BSF, una base attiva di tipo p e un emettitore di tipo n

Affinché si crei una “pila riflettente” di strati PSi è necessario un ottimo controllo della porosità, che si concretizza in un’alternanza di alta e bassa porosità, nonché dell’incisione in profondità. Così facendo si cambia l’indice di rifrazione del layer, mentre si mantiene costante lo spessore ottico. Si può quindi creare un’interferenza costruttiva della luce riflessa per un certo range di lunghezze d’onda (effetto di Bragg). Con questo metodo si riesce ad ottenere una riflessione della luce superiore al 90% per uno stabilito set di lunghezze d’onda. In Figura 16 viene mostrata la riflessione totale della luce da parte di una cella epi-Si con differenti tipi di riflettori di Bragg all’interfaccia della superficie epi. Per l’intervallo di lunghezze d’onda [850-1000]nm, si ottiene appunto una riflessione maggiore del 90%.

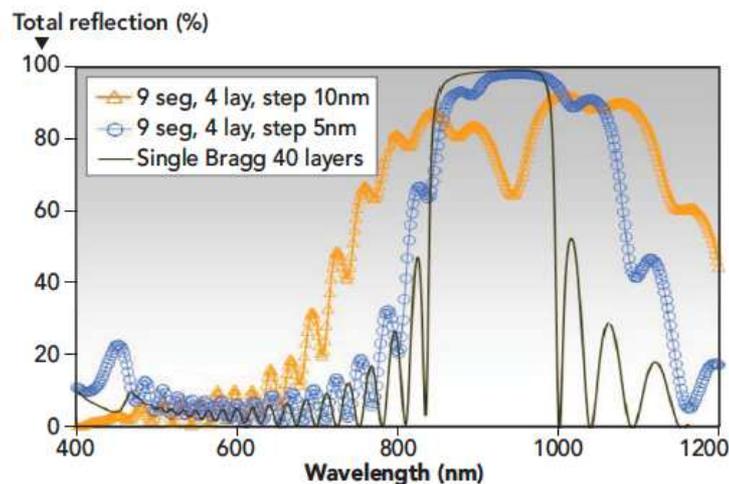


Figura 16: Riflessione della luce in una cella epi con diversi riflettori di Bragg PSi.

Nella realizzazione della cella, gli strati attivi vengono fatti crescere epitassialmente sopra il riflettore di silicio poroso, usando forni ad elevate temperature. Durante questa fase, la struttura del poro cambia da colonnare a un grande spazio vuoto chiuso con uno strato molto sottile e denso sulla superficie. Le proprietà ottiche rimangono pressoché invariate, ma quest’ultimo strato permette la crescita di uno stack epi di alta qualità, la quale avviene per deposizione chimica ad una temperatura di circa 1130°C. Per i drogaggi delle regioni p ed n vengono poi impiegati rispettivamente il Boro e l’Arsina, al posto del Fosforo che viene comunemente usato nelle celle

tradizionali standard, per limitare la diffusione ad alte temperature. Dopo la crescita dell'epi, che si concretizza in una superficie molto levigata, si procede con il texturing della superficie, processo che può avvenire in modo identico a quello delle celle tradizionali, purché la rimozione del silicio dello stack epi sia minima. Si possono quindi applicare due differenti tipi di texturing sugli strati epi: texturing al plasma e formazioni di piramidi casuali. Il primo ha il vantaggio di essere un processo a secco che viene applicato ad un solo lato, e può far sì che si ottenga una riflettanza al di sotto del 16% per una lunghezza d'onda di 600nm, rimuovendo solo 1micron di silicio. Inoltre, questo processo non dipende dall'orientazione dei cristalli, e ciò lo rende applicabile su tutti i tipi di substrato, inclusi il silicio policristallino. La superficie che ne risulta è frattale, come si può vedere dalla Figura 17 (a sinistra) che mostra un'immagine di una superficie epi dopo il texturing al plasma.

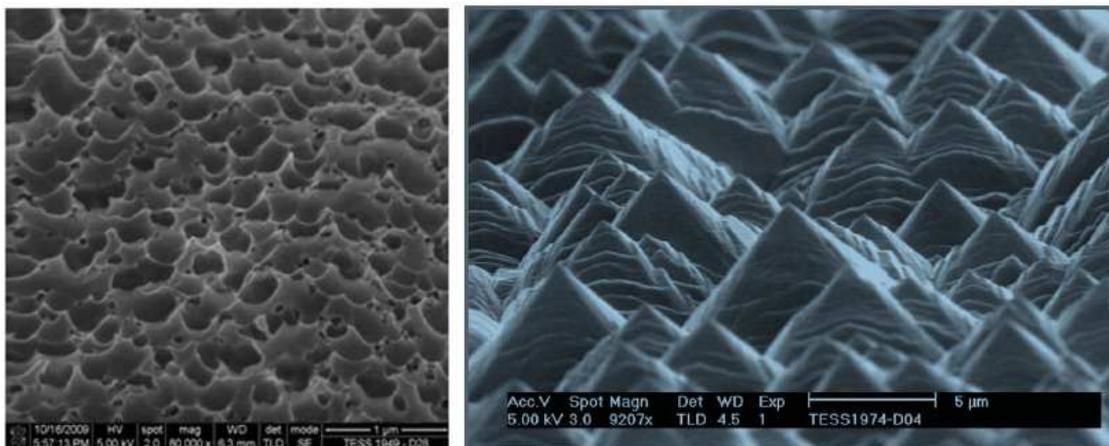


Figura 17: Layer epi dopo l'applicazione di due metodi di texturing: plasma texturing (a sinistra) e piramidi casuali (a destra).

Le piramidi casuali si formano invece bagnando la superficie con una soluzione alcalina (NaOH); si ottiene una riflettività più bassa se comparata a quella del texturing al plasma, e il processo può essere applicato solo a substrati monocristallini. Solitamente in media viene eliminato uno strato di 4micron di silicio durante la formazione delle piramidi. Il principale vantaggio di questo metodo è la levigatezza della struttura che si forma, per cui la successiva deposizione di altri layer risulta più facile rispetto a quanto può avvenire nel primo processo.

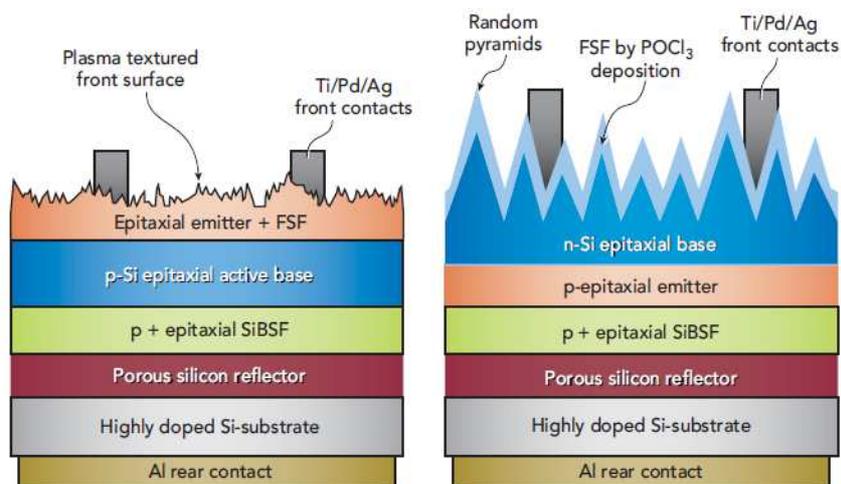


Figura 18: Sezione trasversale di una cella solare di tipo p con texturing della superficie al plasma (a sinistra) e di una cella di tipo n con texturing della superficie a piramidi casuali (a destra).

3.8 Le possibilità del film sottile

[6] Uno dei punti caldi della discussione sul fotovoltaico, è l'utilizzo del suolo destinato all'agricoltura come collocazione dei pannelli. Tra le numerose possibili applicazioni che offre il fotovoltaico a film sottile, ve n'è una che prende in considerazione un'area molto estesa, ma che non sottrae superficie ai terreni agricoli: l'installazione di pannelli lungo le autostrade (la rete autostradale italiana è pari a 6 mila chilometri), progetto non così lontano da una possibile realizzazione pratica giacché ne esiste perfino un brevetto depositato nel 2011 dall'inventore italiano Luciano Paoletti. È già possibile osservare dei pannelli solari sulle barriere anti-rumore in alcuni tratti di autostrada, quale ad esempio l'autostrada del Brennero A22, in una parte del tratto Trento-Bolzano. L'idea di base proposta dal Paoletti è simile, ma prevede l'installazione dei pannelli fotovoltaici sulle barriere divisorie tra le carreggiate. La precedente generazione di pannelli, in silicio mono o policristallino sorretti da una struttura in vetro, non si prestava a un utilizzo del genere, poiché avrebbe causato problemi di sicurezza. Ma come ha spiegato lo stesso Paoletti in un'intervista al Corriere della Sera, le celle fotovoltaiche CIGS, dallo spessore di pochi micron, possono essere stese facilmente come una pellicola sui blocchi di cemento armato che separano le carreggiate (chiamate barriere new jersey). Fino ad ora erano stati depositati brevetti che però consideravano solo tratti limitati di guard-rail. L'idea di Paoletti, pur non essendo applicabile su tutta la rete, a causa dell'angolazione non sempre favorevole, garantirebbe una buona media di resa solare. La natura modulare, inoltre, permetterebbe di non interrompere il servizio in caso di incidente, ad esempio. La società che gestisce l'autostrada potrebbe quindi utilizzare l'energia prodotta per alimentare i pannelli di segnalazione o addirittura vendere la produzione in eccesso alla rete elettrica. Ma le possibilità sarebbero molteplici: si possono alimentare anche pannelli di segnalazione di velocità e indicazioni a led delle località che si stanno percorrendo, oppure integrando fotocellule a led luminosi che segnalano la presenza di autoveicoli in quel tratto di autostrada, inviare la segnalazione ai Gps montati sui veicoli per segnalare in tempo reale code e rallentamenti.



Figura 19: Una possibile realizzazione delle autostrade fotovoltaiche

3.9 Film sottile e silicio cristallino a confronto

Tecnologia costruttiva	silicio cristallino	film sottile
Perdite per effetto della temperatura [%/°C]	-0,45	-0,25
Densità energetica [W/m ²]	145	80
Decadimento delle prestazioni (nei primi 20 anni) [%/anno]	-0,807	-0,256
Efficienza dei moduli [%]	13÷19	4÷12
Spazio richiesto per kW [m ² /kWp]	7,5	12
Tipologia costruttiva	alluminio anodizzato e wafer di silicio	film sottile fra lamine di vetro
Strutture di montaggio	standard, disponibili a livello commerciale	possono richiedere particolari configurazioni
Applicazioni tipiche	residenziale/commerciale/industriale	commerciale/industriale
Principali case costruttrici	Kyocera, Evergreen, Sanyo, Schuco, Canadian Solar, Sharp, Yingli, ET Solar, Solon, Schott, Conergy, REC, Solarworld, Sunpower	First Solar, Solyndra, UniSolar, Konarka, Dye Solar, Bosch Solar, Sharp, Abound Solar

Figura 20: principali differenze costruttive e tecnologiche fra silicio cristallino e film sottile

Laddove l'irraggiamento sia elevato e tale da generare alte temperature, laddove lo smaltimento termico o la temperatura esterna medi siano tali da causare elevate temperature d'esercizio dei moduli, i moduli al silicio cristallino registrano un calo di rendimento notevole rispetto alle condizioni nominali. Per quanto riguarda il rendimento medio delle celle policristalline, questo si attesta attorno al 15%, mentre quello del silicio amorfo (rappresentativo della famiglia del film sottile) è circa il 9%. Da ciò risulta immediato che, a parità di superficie occupata, la potenza installata con il film sottile può arrivare al 40% in meno rispetto al cristallino. I pannelli a film sottile hanno però due principali vantaggi che compensano la scarsa densità energetica: un minore decadimento delle prestazioni nel tempo (il coefficiente di invecchiamento nel fotovoltaico a film sottile è molto minore che nel fotovoltaico tradizionale) e un maggiore fattore di conversione della luce diffusa, che si traduce quindi in un rendimento complessivo maggiore in condizioni di basso irraggiamento, di cielo coperto, di foschia diffusa e in presenza di ombre o esposizioni non ideali. Quando il pannello fotovoltaico non è orientato (a sud) o inclinato correttamente rispetto al piano verticale, la componente diffusa raccolta dal modulo aumenta rispetto a quella diretta: i pannelli a film sottile sono in questo caso più efficienti e riescono a captare meglio la componente diffusa. Quando invece si hanno condizioni ideali, la resa fotovoltaica è a favore del cristallino: esso raccoglie uno spettro di frequenze meno energetiche ma più ampio, ed essendovi in esse radiazione diretta, fanno sì che alla fine la resa globale sia maggiore.

Concludendo, è preferibile installare pannelli a film sottile laddove le condizioni di irraggiamento solare siano sfavorevoli (inclinazioni non ideali, orientamento rispetto a sud impossibile, presenza di ombre, ecc.), per le restanti applicazioni il silicio cristallino è più performante a parità di potenza installata. [7]

Il fotovoltaico di terza generazione: celle solari organiche



Figura 21: Esempio di modulo fotovoltaico organico

L'elettronica organica è ormai entrata nell'elettronica di consumo come parte luminescente, come led, ed un esempio ne è lo schermo del Samsung Galaxy; e man mano sta entrando come parte dei transistor organici. Non per ultimo, la società americana Konarka ha messo a catalogo per l'acquisto, dei pannelli fotovoltaici organici flessibili basati su tecnologia polimerica. Sempre Konarka, e il fornitore automobilistico Webasto Roof Systems, hanno annunciato la loro associazione nell'integrare le celle solari organiche nella struttura dei tetti delle automobili. Webasto ha in progetto di integrare le celle organiche della Konarka, lavorando per aumentarne l'efficienza affinché possano essere impiegate su diversi tipi di macchine: l'elettronica organica sta dunque rivoluzionando completamente il modo con cui noi ci avviciniamo all'elettronica.

Per raggiungere gli obiettivi del 2020, che abbiamo visto inizialmente, la European Photovoltaic Industrial Association, operante nel campo del fotovoltaico, sostiene che oltre a dover aumentare le efficienze delle celle convenzionali al silicio, bisogna considerare anche nuovi materiali, nuove tecnologie che possono rendere il fotovoltaico pervasivo, cioè utilizzabile in contesti che non sono stati fino ad oggi considerati: tra queste parla delle celle organiche e delle celle sensibilizzate al colorante.

Le celle solari organiche permettono, oltre che di abbassare in un futuro non molto lontano i costi dei pannelli solari, giacché non richiedono l'utilizzo del silicio, anche di realizzare un fotovoltaico che ha delle qualità ulteriori, come la semitrasparenza e il colore, caratteristiche che lo renderebbero ideale in un contesto di forte integrazione architettonica.

4.1 Celle solari organiche ed ibride

Esistono diversi modi per fare il fotovoltaico organico: vi è un metodo completamente organico che è basato su *materiali polimerici* o *small molecules*, che possono essere, ad esempio, evaporate; il dispositivo ha in questo caso un contatto inferiore e uno superiore (anodo e catodo) e in mezzo tra i due ci sono una serie di materiali polimerici che permettono la fotoconversione. Persiste un'altra categoria di fotovoltaico organico che si chiama *ibrido* perché è un fotovoltaico organico-inorganico, il nome di questa tecnologia è DSSC (dye sensitized solar

cell), cella solare sensibilizzata al colorante, o anche detta cella di Grätzel dal nome del professore dell'Epfl di Losanna che riuscì a introdurre questo nuovo concetto di cella solare, ritenuta molto promettente, ma che presenta tassi di efficienza ancora troppo bassi. Definita spesso come '*fotosintesi artificiale*', questa soluzione utilizza un elettrolita, uno strato cioè di titanio, e un colorante (dye) di rutenio racchiusi da due substrati di vetro, metallo o polimerici. Il colorante eccitato dalla luce trasferisce elettroni al titanio che li assorbe generando una corrente elettrica di molte volte superiore a quella che si genera invece nella fotosintesi naturale delle piante, dove la CO₂ svolge il ruolo del titanio, mentre la clorofilla quello del colorante. Per questo in alcune applicazioni della tecnica sviluppata dal chimico svizzero, vengono utilizzate come "dye" molecole organiche estratte da frutti come more o lamponi.

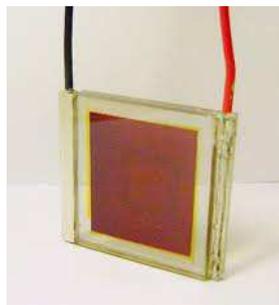


Figura 22: Cella solare DSSC

Le celle ibride sensibilizzate al colorante possono raggiungere in laboratorio efficienze tra l'11 e il 12,3%, il record attuale è del 13% (non certificato però), la stabilità è dimostrata di 20 anni, e ci sono attività di ricerca e di sviluppo sia nelle università che nell'industria. Per le celle completamente organiche, sia small molecules che polymers, il record attuale è intorno al 9%, la stabilità è intorno ai 3-5 anni, quindi ancora non raggiungono una stabilità tale da permettere una certificazione di 20 anni.

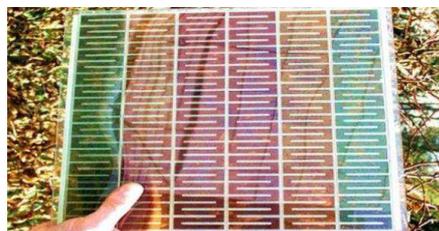


Figura 23: Modulo fotovoltaico con celle DSSC

4.2 Vantaggi e svantaggi delle celle DSSC

[8] È evidente che questa tecnologia beneficia di una serie di vantaggi per cui risulta giustificato il grande interesse in un suo rapido sviluppo:

- Riduzione dei costi rispetto alla produzione di celle al silicio: ciò è principalmente dovuto alla semplificazione del ciclo produttivo e all'impiego di materie prime poco costose (indubbiamente molto

più economiche del silicio). La possibilità infatti di utilizzare sistemi continui ad alta efficienza come la stampa roll-to-roll, rendono questa tecnologia molto meno costosa delle tecnologie tradizionali.

- Maggiore sfruttamento dello spettro della radiazione solare: i semiconduttori organici difatti, rispetto a quelli inorganici, possiedono un elevato coefficiente di assorbimento, ciò permette alle celle a colorante di lavorare in un ampio range delle condizioni di luce e di orientazione dei raggi solari. Quindi, le celle DSSC sono in grado di produrre elettricità in maniera molto più efficiente rispetto ai sistemi fotovoltaici attuali, pure in condizione di scarsa illuminazione e nuvolosità, sebbene con rendimenti inferiori.
- Integrazione architettonica: grazie alle caratteristiche di trasparenza, leggerezza e flessibilità possedute da questa tipologia di celle, è possibile inserire questi dispositivi negli edifici, senza andare a peggiorarne, ma anzi migliorandone l'estetica. Dunque le DSSC garantiscono un'elevata integrazione architettonica, essendo applicabili a fogli di metallo o pellicole polimeriche, per il rivestimento non solo del tetto ma anche delle facciate di un edificio, oppure, nel caso dell'applicazione su vetro, per la realizzazione di vere e proprie finestre fotovoltaiche: possono essere applicate verticalmente proprio grazie al fatto che, lavorando sulla luce diffusa, non necessitano di precisi angoli di inclinazione rispetto alla luce solare. In questo modo, le celle non dovranno per forza essere confinate nei tetti o nelle superfici inclinate ma, grazie alle differenti colorazioni e gradi di trasparenza ottenibili, in base alla tipologia di dye impiegato, troveranno applicazione soprattutto sulle vetrate degli edifici.

In contrapposizione a questi aspetti positivi c'è anche una serie di svantaggi:

- Efficienza di conversione: i livelli raggiunti dai moduli commerciali sono soddisfacenti ma ancora inferiori rispetto a quelli del fotovoltaico tradizionale. Obiettivo dei vari studi di ricerca è quello di riuscire a ridurre il band-gap dei coloranti, cercando di ottimizzare l'architettura del dispositivo in modo da ampliare lo spettro di assorbimento della luce solare e i meccanismi di trasporto delle cariche.
- Durata del tempo di vita: esistono infatti dei fenomeni di degradazione della cella che determinano una diminuzione graduale dell'efficienza di conversione nel corso degli anni.
- Utilizzo di un elettrolita liquido: a causa dello stato fisico in cui si trova l'elettrolita, bisogna predisporre sistemi ermetici per il suo contenimento limitando però il suo utilizzo su supporti flessibili. Studi in corso cercano di trovare soluzioni alternative, come elettroliti solidi o gel, in grado di compiere le stesse funzioni svolte dal tradizionale elettrolita liquido.

4.3 Vantaggi e svantaggi delle celle organiche

I principali vantaggi di questa tecnologia, e che rappresentano il cavallo di battaglia di questa tipologia di celle, sono:

- Abbattimento dei costi: questo è possibile grazie al fatto che questi moduli, oltre che ad avere una struttura molto semplice, utilizzano materiali economici e di facile reperibilità. Inoltre essi sono riciclabili al 100%, evitano così problemi di smaltimento tipici delle prime due generazioni di celle solari.
- È stato dimostrato che è possibile produrre dei moduli fotovoltaici con un sistema continuo di stampa roll-to-roll (come per le DSSC), facilitando notevolmente il processo di produzione. Grazie a questa caratteristica, le celle organiche possono essere assemblate a costi di gran lunga inferiori a quelle convenzionali.

- Flessibilità: caratteristica che permette a queste celle di essere utilizzate su supporti flessibili, e su superfici di diversa natura. Tutto ciò permette ovviamente un elevato grado d'integrazione architettonica di queste celle.
- Versatilità: queste celle sono estremamente sottili (50-250 micron), leggere (50 g/m²), hanno un elevato rapporto energia/peso e si presentano nelle forme più varie. Tutto ciò permette di inserirle nei più svariati prodotti, che, grazie a loro, diventano dei veri e propri produttori di energia.

I limiti di questa tecnologia sono rappresentati, come per le DSSC, dalle efficienze di conversione della radiazione solare e dai tempi di vita dei dispositivi ancora troppo bassi rispetto al fotovoltaico tradizionale. La chiave di volta per far sì che questa tecnologia prenda ancora più piede, è quella di sviluppare nuovi materiali con buone proprietà di trasporto delle cariche, con prestazioni stabili e un maggior assorbimento dello spettro solare.

4.4 Da “green grass” a “bright green”: dal MIT le celle solari ricavate dall'erba tagliata

Cosa c'è di più green di un pannello solare? Un pannello solare vegetale ricavato dall'erba tagliata! In particolare, l'idea di utilizzare il materiale vegetale di scarto per soddisfare il nostro fabbisogno energetico, rispettando l'ambiente, è del ricercatore del MIT, Andreas Mershin, che ha ripreso un progetto avviato otto anni fa da Shuguang Zhang, scienziato e direttore associato del MIT Center for Biomedical Engineering. Nel suo lavoro originale, Zhang era riuscito a mettere insieme un complesso di molecole conosciute come fotosistema-I, ossia piccole strutture all'interno delle cellule vegetali che svolgono la fotosintesi. Stabilizzato chimicamente il fotosistema-I e postolo a formare uno strato sul vetro, avrebbe quindi potuto produrre corrente elettrica quando esposto alla luce. Tale sistema, in un primo momento, aveva evidenziato qualche difficoltà visto che l'assemblaggio e la stabilizzazione delle sostanze chimiche necessarie al processo richiedevano sofisticate e costose attrezzature di laboratorio. Inoltre, la prima cella solare così realizzata era piuttosto debole: la sua efficienza infatti era troppo bassa per garantire un bilancio energetico positivo. Ma Mershin ha saputo semplificare il processo al punto da riuscire a realizzare in ogni laboratorio la speciale cella, permettendo a ricercatori di tutto il mondo di iniziare ad esplorare il processo e ad apportare eventuali miglioramenti. Oltre ai vantaggi sotto il profilo della sostenibilità ambientale e dell'approvvigionamento energetico, un ulteriore punto a favore della cella vegetale è quello di riuscire ad aiutare le popolazioni dei villaggi dove ancora la luce è un miraggio: queste popolazioni infatti, potrebbero utilizzare i rifiuti agricoli, privi di valore, come materia prima per questi pannelli fotovoltaici. In pochi anni, secondo Mershin, si direbbe addio al kerosene, ancora oggi la fonte di illuminazione più diffusa in tali luoghi.

4.5 Fotovoltaico organico e tradizionale a confronto

La capacità di fotoconversione dei sistemi fotovoltaici a base organica e polimerica risulta ancora oggi molto inferiore a quella dei dispositivi che sfruttano i semiconduttori inorganici. Ed è proprio questa caratteristica che rende l'utilizzo dei semiconduttori tradizionali nei sistemi fotovoltaici, l'unica realtà per la produzione di energia su larga scala, nonostante ciò comporti elevati costi di produzione. Un'altra problematica, è la durata nel tempo

dei materiali organici, che è molto ridotta rispetto a quelli inorganici a causa dei processi di ossidazione a cui vanno incontro, che ne comportano un veloce deterioramento, alterando così le proprietà utili ai fini della conversione fotoelettrica. Dati attuali attestano che un pannello fotovoltaico a base di silicio, dopo vent'anni di utilizzo mantiene almeno l'80% della sua efficienza di conversione iniziale. Nonostante l'enorme mole di studi e una vasta attività di ricerca, per il fotovoltaico a base organica siamo ancora distanti dal raggiungere questi standard.

Valutazione sulla reale qualità dei moduli fotovoltaici

[9] Con le nuove sfide che si pongono dinnanzi all'industria dei pannelli fotovoltaici, come l'impressionante sviluppo dei produttori cinesi e gli investitori sempre più esigenti, la qualità dei pannelli fotovoltaici non è mai stata così importante come in questi tempi.

La richiesta di prezzi più bassi ha portato l'industria dei pannelli fotovoltaici a trasferirsi nei paesi in via di sviluppo, in particolare in Cina, che oggi conta più del 50% della produzione mondiale dei moduli fotovoltaici. Come noto, c'è apprensione per ogni acquisto effettuato dai produttori cinesi, per cui è importante conoscere la qualità effettiva dei prodotti che si comprano; tuttavia tale qualità rimane un aspetto soggettivo, che dipende dalle aspettative dei compratori: si può affermare che generalmente un acquirente si aspetta che un pannello fornisca la giusta potenza in uscita, e che continui a farlo per qualche decennio. Ma a monte di queste basilari specifiche, ci sono delle richieste implicite, quali la sicurezza per l'utente e l'installatore. Alcune ulteriori considerazioni sono state recentemente aggiunte con l'aumentare delle installazioni residenziali, dal momento che gli utenti finali sono più esigenti in termini di aspetto estetico dei prodotti che sono integrati nelle loro case. Sebbene al giorno d'oggi sia impossibile per un fabbricante vendere i propri prodotti senza un certificato di conformità agli standard IEC, non si è ancora in grado di racchiudere in esso tutti gli aspetti in merito alla qualità dei moduli fotovoltaici.

Il comportamento tipico di un modulo fotovoltaico, in relazione alla percentuale dei difetti che presenta, segue un andamento "a vasca da bagno" (bathtub curve) come mostrato in figura 17. Un pannello, nel suo ciclo vitale, va incontro a tre diversi periodi, consecutivi tra loro:

1. Un periodo di *fallimento precoce*, durante il quale il tasso di difetti risulterà alto e decrescerà con il tempo. Tipicamente i difetti saranno dovuti a una cattiva progettazione (che causa fallimenti epidemici), a una fabbricazione che non ha tenuto conto della qualità richiesta e delle impostazioni corrette per il processo di lavorazione, o all'impiego di componenti difettose.
2. Un periodo di *vita normale*, durante il quale il tasso di difetti sarà basso e costante.
3. Un periodo di *usura* nel quale il tasso di difetti aumenterà con il tempo e diverrà molto alto. Questo poiché le componenti, una volta raggiunto il limite della loro durata intrinseca, cominceranno a consumarsi e dunque i fallimenti aumenteranno fintanto che l'intero pannello non si sarà completamente usurato.

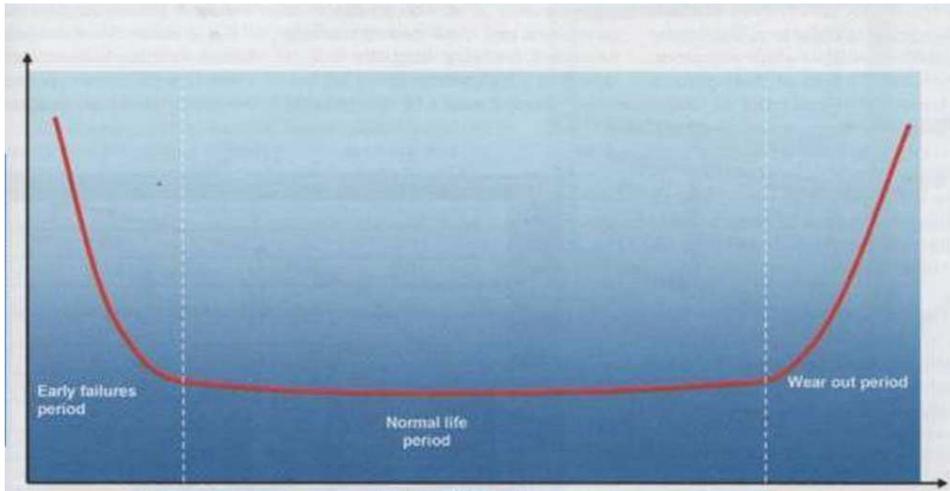


Figura 24: Curva a vasca da bagno, in ascissa la durata della vita del modulo, in ordinata la percentuale dei difetti riscontrati

Un problema rilevante è poi quello del campionamento: non è possibile eseguire i test su tutti i prodotti. C'è un dibattito continuo su cosa sia meglio tra eseguire ispezioni a campionamento, e quale frequenza di campionamento usare, o semplicemente controllare tutto, o altrimenti quali parti controllare del pannello. Mentre la maggior parte dei moduli inviati ai laboratori per ottenere i certificati di competenza passano i test con successo, il feedback dal campo indica un'alta percentuale di fallimenti. La maggior parte di questi è legata al processo di fabbricazione e alla sostituzione di componenti più che alla progettazione del modulo in sé. Di recente, molti sforzi si stanno facendo nell'industria per automatizzare il processo di produzione dei moduli, comprese quelle parti che dipendono essenzialmente da operazioni manuali (che generano numerosi problemi). Dal momento che alcune fabbriche non sono ancora provviste di apparecchiature per un'affidabile misurazione, o non le usano come dovrebbero, le misurazioni sono fuorvianti e portano alla fabbricazione, senza saperlo, di prodotti difettosi, convincendosi tuttavia del contrario.

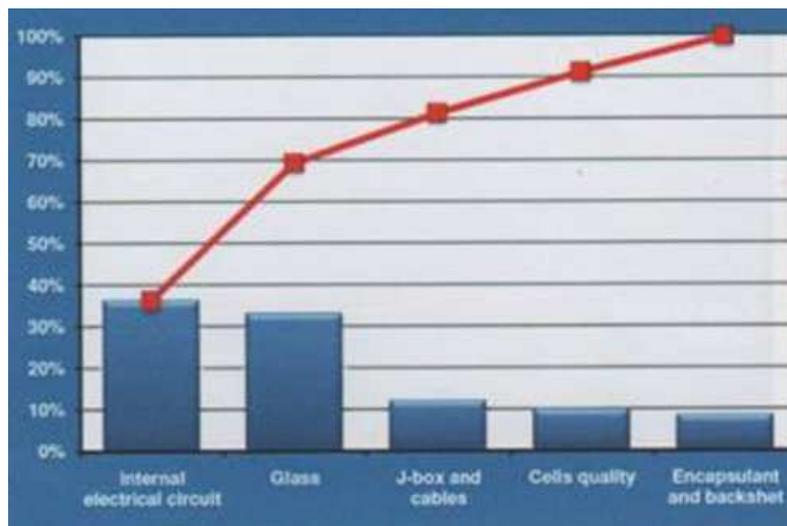


Figura 25: Distribuzione dei guasti tra le 21 maggiori aziende produttrici di moduli fotovoltaici nell'arco di 8 anni.

Negli ultimi anni, nonostante gli sforzi fatti da parte delle fabbriche per aumentare il livello di qualità dei propri prodotti, un ulteriore problema è che l'avidità per il profitto a breve termine e lo squilibrio tra domanda e offerta,

spesso prevalgono sulla qualità: da qui l'importanza di una valutazione indipendente della qualità da parte di terzi. Un controllo completo da parte di terzi, servirebbe ad evitare problemi di campionamento, che potrebbero non far emergere in modo corretto eventuali problemi di progettazione dei moduli e causare fallimenti a cascata. Tuttavia, per vincoli economici e di tempo, alcuni test non possono essere condotti su un gran numero di moduli. In definitiva, la scelta dei test che devono essere eseguiti deve quindi essere atta a creare il giusto equilibrio tra costo, tempo e qualità.

Importante è poi, oltre a utilizzare un simulatore solare affidabile, ispezionare e controllare con attenzione le celle solari del pannello fotovoltaico, essendo queste le sue componenti principali. Un metodo facile e non distruttivo per valutare la qualità delle celle, è quello di controllarle sotto luce elettroluminescente. Tale metodo sfrutta una proprietà comune a tutti i semiconduttori, che è l'opposto del normale utilizzo della cella solare: mentre una cella solare produce elettricità quando viene irradiata da fotoni di luce, se si applica un carico elettrico alla cella, questa emette radiazioni che possono essere catturate da un apparecchio fotografico. Più è efficiente la cella, maggiore sarà la sua radiazione. Aree come le crepe, non emetteranno radiazioni, ed evidenzieranno dunque efficienza minore che altrove, indicando così un problema nell'area considerata della cella.

Un'attenta analisi visiva dei prodotti, consente di scoprire alcuni seri difetti, per esempio dimensionali o di connessione, che possono causare problemi al momento dell'installazione, difetti di sigillatura che non possono assicurare un'adeguata protezione delle celle in condizioni ambientali difficili, o spigoli vivi che possono provocare lesioni agli installatori. Come si può comprendere facilmente, la lista dei problemi è molto lunga.

La qualità ha chiaramente delle dirette conseguenze sugli investimenti fatti per i progetti di moduli fotovoltaici. Anche se molti azionisti hanno compreso l'importanza di fornire moduli di qualità, la domanda su quale sia un prodotto di buona qualità rimane ancora senza risposta. La conformità agli standard IEC è necessaria alle fabbriche per vendere i propri prodotti, ma non è sufficiente a garantire il livello di qualità del prodotto così come lo immagina il compratore. Da un lato si stanno sviluppando test per valutare l'effettiva attendibilità del prodotto, dall'altro, rimane necessario un controllo di grandi quantità con test semplici e rilevanti. L'aiuto di terzi è dunque fondamentale per produttori e compratori, poiché permettono a questi di collaborare per raggiungere il comune obiettivo di sviluppare l'industria del fotovoltaico per un futuro più brillante.

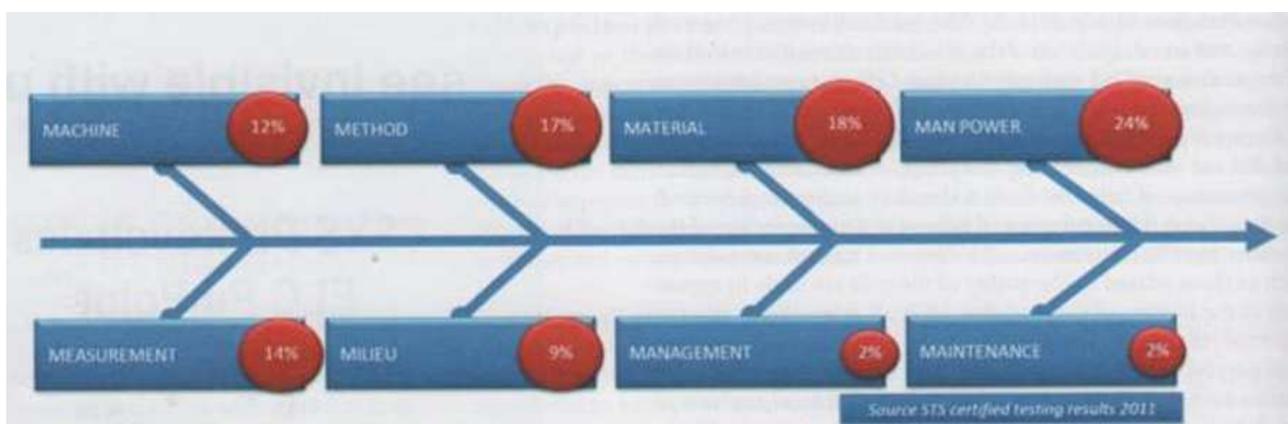


Figura 26: Analisi delle cause di fallimento dei moduli PV. Viene illustrata la distribuzione delle cause riferite ai difetti individuati durante attività di ispezione e test dei moduli

Alcune considerazioni

6.1 La ricerca della grid parity: tra sogno e realtà

[10] Per un lungo periodo, il solare è stato respinto con leggerezza in quanto troppo costoso. Ma dal momento che i prezzi del fotovoltaico continuano a scendere, il solare è diventato competitivo nel costo rispetto alle altre forme convenzionali di energia, come il gas naturale, e questo è precisamente ciò che si intende con l'espressione "grid parity". Questo incoraggiante sviluppo porta a una conclusione comune: quando il solare sarà conveniente quanto l'energia generata dai combustibili fossili, il mercato fiorirà da sé e sparirà la necessità degli incentivi. L'opinione generale è che sarà l'Italia, in particolare la Sicilia, a raggiungere per prima l'obiettivo della grid parity. Questa previsione è dovuta sia al fatto che l'Italia ha uno dei più alti costi al mondo di energia elettrica, sia perché è un paese abbastanza soleggiato. La California e altri stati europei non sono tuttavia da meno, poiché il costo dell'elettricità generata attraverso tecniche convenzionali (che tipicamente utilizzano ancora il carbone come fonte di energia) aumenta del 3-4% ogni anno, mentre il costo dell'energia solare è in diminuzione grazie ai continui incrementi di efficienza delle celle fotovoltaiche e al ridursi dei costi di fabbricazione. Tuttavia c'è chi sostiene che la grid parity sia solo un'utopia e che l'idea del solare senza incentivi sia solo un'illusione, portando, come esempio del fatto che la grid parity, definita come competitività nei costi, non si traduce automaticamente in un vivace mercato del solare, Rhode Island. Essa infatti ha tutt'oggi un tasso di elettricità sufficientemente alto da rendere competitivo il costo del fotovoltaico, e tuttavia Rhode Island ha poca capacità solare installata. In tutto il mondo poi, gli investimenti sul fotovoltaico sono stati promossi, in parte, dal presupposto che in futuro i costi dell'energia convenzionale sarebbero aumentati continuamente. Ma un dato poco confortante arriva dalla Germania: qui il solare costituisce il 4% del "mix energetico"; i prezzi dell'energia convenzionale tuttora subiscono dei cali in alcuni momenti del giorno e dell'anno, e questo a causa dei contributi apportati dal sistema fotovoltaico del paese. Si pensi dunque a cosa succederà quando il fotovoltaico raggiungerà un contributo del 10%-15% : mentre il prezzo dell'energia tradizionale si abbasserà, la grid parity diverrà un obiettivo in movimento che sarà sempre più difficile da raggiungere.

6.2 Fukushima e il fotovoltaico: perché non voltare pagina?

26 aprile 1986 e 11 marzo 2011: il mondo sperimenta due incidenti nucleari di enorme dimensione. In uno stato di shock, i leaders politici tedeschi hanno deciso di voltare le spalle al nucleare; perfino la Cina ha deciso di prendersi un periodo di pausa nella costruzione di nuovi impianti atomici. Peccato che nessun altro abbia reagito così prontamente, anzi, molti paesi hanno semplicemente confermato la loro fede nel "nucleare pulito"; ora che Fukushima continua a emettere radiazioni nell'ambiente, il pensiero del nucleare, e in questo caso del suo imminente pericolo, dovrebbe se non altro legittimare una rapida occhiata al proprio "portafoglio di produzione dell'energia". Sfortunatamente, non molti sembrano pensare al fotovoltaico. Perfino in Germania, dove la BDEW (Federal Association of Energy and Water Industries) ha stabilito che il nucleare dev'essere eliminato entro il 2020, il fotovoltaico è stato piuttosto trascurato in favore dell'eolico e delle biomasse. La catastrofe di Fukushima ha nuovamente mostrato a tutti come l'energia nucleare non sia controllabile. La differenza rispetto a

Chernobyl è però che oggi come oggi noi siamo in possesso di molte alternative tra le quali scegliere, e tra queste, un'economica energia solare. Ecco perché dunque bisogna continuare a studiare e far conoscere il solare come alternativa all'elettricità nucleare; ecco perché la necessità per il fotovoltaico di presentarsi come una tecnologia a basso costo, al fine di incentivare l'utilizzo del solare su larga scala. Il fotovoltaico deve presentarsi come il protagonista delle fonti energetiche rinnovabili, e questo perché con oltre 27 GW di produzione di celle nel 2010 e più di 66 GW nel 2011, esso si è dimostrato pronto a prendersi la sua parte di responsabilità; vale inoltre la pena di ricordare che il solare può crescere più velocemente dell'eolico e può già generare energia elettrica a costi inferiori.

Nuove generazioni di celle fotovoltaiche

7.1 Celle fotovoltaiche con materiali non conduttori

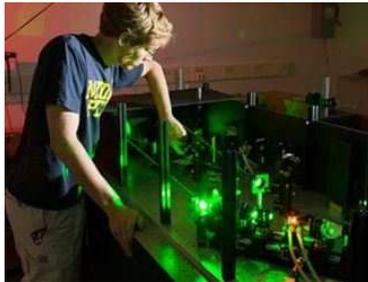


Figura 27: Esperimenti in laboratorio per estrarre energia dal campo magnetico della luce del laser

Agli inizi del 2011, il professor Stephen Rand ed i suoi colleghi della University of Michigan hanno scoperto come ricavare energia dalla luce del Sole, senza l'utilizzo delle classiche celle fotovoltaiche, nelle quali la luce attraversa un materiale semi-conduttore, viene assorbita e crea calore. I risultati della ricerca dell'equipe del prof. Rand, pubblicati nel *Journal of Applied Physics* [11], hanno dimostrato che il campo magnetico della luce, fino ad oggi considerato troppo debole per essere utilizzato in applicazioni pratiche, è invece una potentissima fonte d'energia: essa infatti, attraversando un materiale non-conduttore (come vetro o ceramica trasparente), crea un campo magnetico talmente intenso che è in grado di causare, nelle giuste condizioni, il fenomeno della *rettificazione ottica*, cioè la separazione delle cariche che avviene all'interno delle celle fotovoltaiche ad opera del campo elettrico della luce. Il campo magnetico è infatti in grado di curvare gli elettroni e generare sia un dipolo elettrico, che uno magnetico; convogliando un numero sufficiente di tali dipoli in una fibra abbastanza lunga, si può ottenere un grande voltaggio, tanto da costituire una vera e propria batteria ottica, e, una volta estratto, tale voltaggio può essere utilizzato quale fonte d'energia. Durante i prossimi esperimenti, gli scienziati prevedono di costruire una nuova generazione di celle solari che saranno, oltre che enormemente più potenti, anche molto più economiche di quelle utilizzate oggi. I risultati ottenuti potrebbero pertanto portare alla creazione di celle fotovoltaiche di nuova generazione, che ai materiali semiconduttori sostituiranno materiali non-conduttori, e che utilizzeranno il campo magnetico della luce per produrre energia.

7.2 Celle fotovoltaiche con cristalli liquidi

Una ricerca italiana potrebbe rivoluzionare il mondo del fotovoltaico. La scoperta scientifica fatta da un team di ricercatori del CNR e dell'Università Federico II di Napoli, riguarda i cristalli liquidi, elementi comunemente presenti in molti dispositivi tecnologici come cellulari, computer, televisori e celle dei pannelli fotovoltaici. I risultati dello studio mostrano la possibilità di scomporre i cristalli in piccole gocce riassemblabili, ovvero di progettare lenti di nuova generazione a focale variabile. Ciò significa che in futuro si potranno realizzare pannelli

in grado di assorbire energia solare da qualunque angolazione grazie a lenti sferiche e celle orientabili a seconda della provenienza dei raggi solari.

Fonti

1. Jan M.Rabaey, Anantha Chandrakasan, Bora Nikolic, "*Circuiti integrati digitali. L'ottica del progettista*", Pearson, Prentice Hall, seconda edizione italiana a cura di Andrea Cester e Andrea Gerosa, Università di Padova, Milano, settembre 2005
2. Dan M.J. Doble, Jhon W. Graff (Massachusetts Institute of Technology, USA), Minimization of reflected light in photovoltaics modules, "*Photovoltaics World*", marzo/aprile 2009
3. Daniel Pohl, Turbo mode for solar modules: Second- and third-generation front glasses, "*Photovoltaics International*", agosto 2011
4. Pierangelo Sandri, "*Convertitore CC/CA per sistemi fotovoltaici connessi alla rete: progetto e realizzazione*", settembre 2007, capitolo 1
5. Els Parton, Kris Van Nieuwenhuysen, Izabela Kuzma-Filipek, Yan Van Hoeymissen, Maria Recaman, Sivaramakrishnan Radhakrishnan Hariharusdan, Frédéric Dross, Jef Poortmans, Shining more light in epitaxial thin-film silicon solar cell, "*Photovoltaics World*", maggio/giugno 2011
6. http://www.tecnici.it/solare-un-idea-per-l-autostrada-fotovoltaica_news_x_11164.html
7. <http://www.energyhunters.it/content/policristallino-o-film-sottile-differenzevantaggi-e-svantaggi-nel-fotovoltaico-di-oggi>
8. E.Tessarini, "*Stato dell'arte del fotovoltaico organico*", capitolo 6
9. Thibaut Lemoine, Assessing the real quality of PV modules, "*Photovoltaics International*", agosto 2011
10. Pete Singer, The quest for grid parity, "*Photovoltaics World*", marzo/aprile 2009
11. <http://www.nuovaresistenza.org/2012/02/02/pannelli-solari-addio-buono-buono-good/#more-111781>