

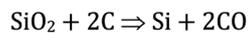


## Redazione

(3) La terza parte è stata pubblicata sul fascicolo precedente.

### Silicio per applicazioni fotovoltaiche

La fabbricazione delle celle fotovoltaiche in silicio ha inizio dalla materia prima, normalmente quarzo di silice ( $\text{SiO}_2$ ), che in presenza di carbonio ad alta temperatura ( $1900\text{ }^\circ\text{C}$ ) si trasforma in silicio secondo la reazione:



### QUARTA PARTE (3)

Il silicio così ottenuto è detto silicio metallurgico (MG-Si) e ha una purezza intorno al 99%. Esso contiene varie sostanze sotto forma di impurità, come Fe, Al, Ti, Mn, C, Ca, Mg, B, P e molte altre. Tuttavia il grado di purezza richiesto per il silicio per applicazioni fotovoltaiche è come minimo 6 N, ossia con un grado di purezza che contiene almeno 6 *Nine* e quindi 99,9999% (il silicio per applicazioni elettroniche ha normalmente un grado di purezza maggiore: almeno 9 N).



# Produzione industriale delle celle fotovoltaiche

Tuttavia, l'applicazione pura e semplice di questo semplice criterio sarebbe fuorviante, in quanto alcune impurità più di altre pregiudicano il comportamento del materiale ed inoltre alcune impurità sono più facili da eliminare di altre.

Di conseguenza, la qualità del silicio di grado solare è giudicata non solo in base al suo grado di purezza, che spesso sale anche a 7N e 8N, ma anche dal tipo di impurità presenti e, più in generale, dalla resistività del cristallo ottenuto.

Un tempo, quando la diffusione del fotovoltaico era ancora agli inizi, gli scarti di lavorazione dei semiconduttori erano suf-

ficienti ad alimentare l'intera filiera, oggi invece è quasi sempre necessario partire dalla materia prima per arrivare al prodotto finito.

Tradizionalmente, la raffinazione del silicio metallurgico avveniva mediante il processo Siemens, nel quale il silicio metallurgico viene distillato ad alta temperatura assieme ad acido cloridrico ad alta temperatura e pressione (500 °C e 30 Mpa) per ottenere triclorosilano ( $\text{HSiCl}_3$ ). Da qui è possibile eliminare la maggior parte delle impurità per distillazione frazionata. Infine, si ottiene la deposizione chimica del silicio facendo combinare il triclorosilano con idrogeno a circa 1000 °C.

Il processo Siemens, pur permettendo di ottenere silicio di elevata purezza, è di per sé costoso, anche da punto di vista energetico, per cui nel corso degli anni sono stati messi a punto altri metodi per ottenere silicio di grado solare, tra cui l'utilizzo del reattore a letto fluido (FBR) e il ricorso al Silano ( $\text{SiH}_4$ ) meno pericoloso e impattante dal punto di vista ambientale rispetto al triclorosilano.

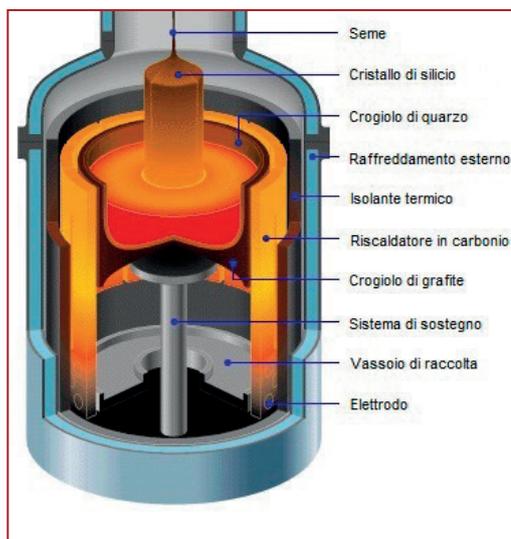
Ulteriori processi di raffinazione del silicio sono spesso basati su processi metallurgici come la segregazione delle impurità tra le fasi liquida e solida e la solidificazione direzionale. Altre tecniche, spesso utilizzate in combinazione tra loro, sono: *Acid leaching*, *Vacuum refining* (basata sulla distillazione a vuoto), *Plasma refining*, *Solvent refining*. Da qui anche i processi Elkem e Photosil.



**La fusione avviene in atmosfera inerte di argon**

#### Le celle in silicio cristallino

Partendo dal silicio con grado di purezza adeguata è possibile ottenere una massa solida pronta per essere tagliata e sagomata operando in due modi: il primo consiste nel produrre un singolo cristallo per estrazione verticale (metodo Czochralski), mentre il secondo, più semplice ed economico, consiste nel fondere dei frammenti di silicio di qualsiasi pezzatura e dimensione in un crogiolo a forma di parallelepipedo e fare poi solidificare tutta la massa. Il processo basato sul metodo Czochralski, illustrato in *figura 3.16*, consiste nel sollevamento verticale e nella contemporanea rotazione di un seme monocristallino di silicio, appropriatamente orientato e introdotto nel silicio fuso a  $1425\text{ }^\circ\text{C}$  mediante un'asta metallica, mentre il crogiolo gira in senso opposto. Il crogiolo è di grafi e rivestito di quarzo. La parte del seme immersa fonde, ma la parte restante lambisce la superficie del fuso. Durante il sollevamento e rotazione, avviene una progressiva solidificazione all'interfaccia fra solido e liquido, generando un monocri-



**Figura 3.16 - Metodo Czochralski per la produzione di lingotti a singolo cristallo.**

stallo di forma cilindrica e grande diametro. Le velocità di crescita tipiche si aggirano intorno ad alcuni millimetri al minuto. Elementi come boro o fosforo possono essere aggiunti per ottenere un semiconduttore già dopato. La fusione avviene in atmosfera inerte di argon.

La temperatura del silicio nel crogiolo è mantenuta di pochi gradi superiore a quella di fusione, per cui il silicio fuso si solidifica molto rapidamente, replicando la struttura monocristallina del seme a cui aderisce. Il controllo rigoroso della temperatura del materiale fuso, dell'atmosfera nella camera (si utilizza generalmente argon), e della velocità di estrazione, nonché l'assenza assoluta di vibrazioni, consentono la produzione di cristalli perfettamente cilindrici e altamente puri.

Ai cilindri monocristallini così ottenuti vengono poi eliminate le estremità, conservando quindi la parte centrale più omogenea. Questi monocristalli sono tagliati a fette sottili (*slicing*) per mezzo di lame diamantate e le singole celle così ottenute sono rifinite in modo da dare loro forma quadrata. Il materiale di scarto risultante da queste operazioni è ovviamente raccolto e successivamente riutilizzato

per la produzione di altri cristalli. Le celle policristalline seguono invece una procedura più semplice, in quanto la massa cristallina eterogenea che si è formata per solidificazione in un crogiuolo di quarzo ha già forma squadrata, per cui in questo caso risulta semplice ricavare delle celle perfettamente squadrate di qualsiasi dimensione e spessore.

Le sottili fette di silicio, monocristalline o policristalline, così ottenute prendono il nome di *wafer* e da queste, mediante opportuni trattamenti è possibile ricavare le celle solari. I *wafer* di silicio sono già dopati, normalmente di tipo P, in modo da potere successivamente realizzare la giunzione P-N per diffusione del dopante N sulla faccia superiore.

Tuttavia, la superficie esterna di un cristallo di silicio in assenza di imperfezioni ha un aspetto metallico simile a quello di uno specchio, per cui, in assenza di ulteriori trattamenti, una considerevole frazione della radiazione incidente andrebbe persa per riflessione. A questo inconveniente si cerca di porre rimedio in due modi, texturizzando opportunamente la parte frontale e mediante un opportuno rivestimento antiriflettente.

La texturizzazione viene effettuata sagomando la superficie frontale della cella in modo da creare una serie di micro cuspidi e avvallamenti che siano in grado di intrappolare la luce solare all'interno del wafer. I modelli utilizzati sono spesso di tipo piramidale o derivati da questi. In figura 3.17 si può vedere in sezione l'effetto di una semplice texturizzazione a piramidi inclinate di 45° su un raggio luminoso perpendicolare alla superficie frontale.

Per semplicità, nell'esempio si ipotizza che il 10% della radiazione sia riflessa dalla superficie della cella. Vediamo allora che il 90% della radiazione incidente penetra nella cella mentre il 10% è riflesso. Se la superficie fosse liscia questa frazione andrebbe persa.

Tuttavia, per effetto della texturizzazione, la frazione riflessa incontra la micro-piramide adiacente che assorbe il 90% del 10% prima riflesso, quindi il 9% del totale. In definitiva va quindi solo l'1% della radiazione abbandonata alla cella, mentre il 99% viene assorbito.

In figura si vede anche un altro importante fenomeno che caratterizza l'assorbimento della radiazione solare e che viene esaltato dalla presenza di una superficie texturizzata, vale a dire la rifrazione della radiazione solare ad opera del silicio cristallino. La radiazione solare infatti, quando passa tra due mezzi con diverso indice di rifrazione, aria e silicio cristallino nel nostro caso, subisce una deviazione che ubbidisce alla Legge di Snell:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$$

Cioè il prodotto dell'indice di rifrazione del materiale da cui proviene la radiazione incidente, moltiplicato per il seno dell'angolo di incidenza rispetto alla perpendicolare alla superficie è uguale all'indice di rifrazione del secondo materiale moltiplicato per il seno dell'angolo tra la direzione risultante finale e la perpendicolare alla superficie. Nel nostro caso,  $n_1$  è pari all'indice di rifrazione dell'aria, di valore unita-



**Le sottili fette di silicio, monocristalline o policristalline, così ottenute prendono il nome di wafer**

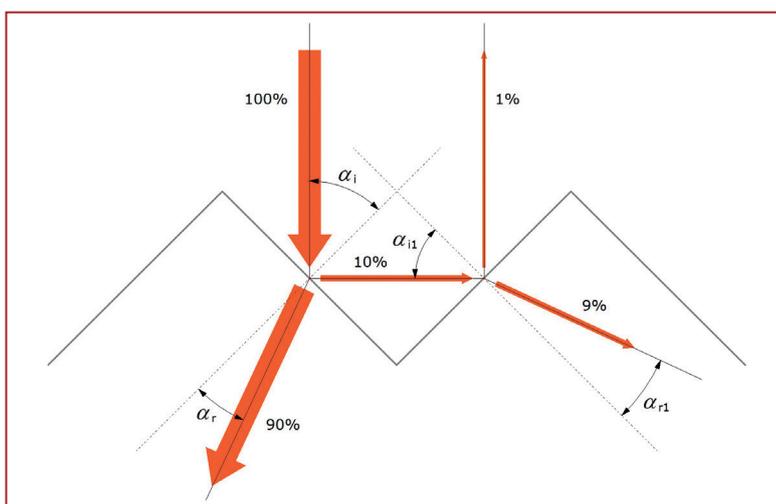


Figura 3.17 - Effetto della texturizzazione frontale di una cella fotovoltaica sulla radiazione incidente.

rio, mentre  $n_2$  è l'indice di rifrazione del silicio, La legge di Snell si applica al primo attraversamento, con  $a_1$  e  $a_2$  in figura a pari rispettivamente a  $a_i$  e  $a_r$  e al secondo attraversamento, con  $a_1$  e  $a_2$  in figura a pari rispettivamente a  $a_{i1}$  e  $a_{r1}$ .

In molti casi si ricorre anche a una texturizzazione della faccia posteriore della cella per migliorare ulteriormente l'assorbimento della radiazione solare.

Un ulteriore incremento della capacità di assorbire la radiazione solare si ottiene mediante il rivestimento di una patina di materiale antiriflettente. Per questa funzione un tempo si impiegava l'ossido di titanio  $TiO_2$  mentre oggi si preferisce normalmente utilizzare il nitruro di silicio  $Si_3N_4$ . Comunque, ciò che realmente determina l'efficienza del rivestimento antiriflettente è lo spessore associato all'indice di rifrazione del materiale impiegato. Questa coppia di valori determina la lunghezza d'onda sulla quale sono tarate le proprietà del rivestimento, il cui spessore è normalmente di qualche decina di nm. Il colore bluastrato di molte celle fotovoltaiche è caratteristico di un rivestimento antiriflettente studiato per assorbire maggiormente le lunghezze d'onda giallo-verdi a scapito di quelle blu che vengono invece in parte riflesse.

Tuttavia, prima di effettuare il rivestimento antiriflettente è necessario effettuare un passaggio importante, ossia creare la giunzione P-N mediante la diffusione di atomi di fosforo all'interno della stessa, esponendo la faccia superiore ad un vapore ad alta temperatura contenente l'elemento dopante. In questo modo, disponendo di un wafer dopato di tipo P, viene a formarsi un sottile strato di semiconduttore dopato di tipo N sulla parte superiore, ottenendo quindi la giunzione P-N. La profondità di diffusione nel wafer del fosforo deve essere valutata attentamente, in quanto uno strato sottile favorisce la risposta alle lunghezze d'onda inferiori (luce blu e violetta) ma aumenta il rischio di corto circuiti localizzati nella

successiva fase di deposizione dei contatti metallici. Viceversa, un'azione dopante più profonda tende ad inibire la risposta al blu-violetto ma riduce il rischio di corto circuiti accidentali. In corrispondenza dei Bus-bar frontali si effettua una diffusione più marcata del fosforo (regioni N+) al fine di ridurre la resistenza frontale di contatto. A questo punto, come si è visto, avviene la deposizione dello strato antiriflettente e successivamente la deposizione dei contatti frontali, in corrispondenza dei quali è necessaria una locale rimozione dello strato antiriflettente che altrimenti non permetterebbe il contatto. Il materiale più utilizzato è l'argento in polvere e mescolato ad un legante così da ottenere una pasta che viene depositata attraverso una maschera forata. Il deposito ottenuto è quindi sottoposto a essiccazione e a un processo fine e ad alta temperatura che permette il fissaggio dell'argento sulla cella.

Una importante variante è rappresentata dai *Buried contacts*, i quali sono disposti verticalmente in opportune scanalature ricavate all'interno della cella, nelle quali è stata diffusa una quantità maggiore di fosforo. In figura 3.18 è rappresentata una sezione di questo tipo di celle nelle quali la superficie occupata dai contatti frontali è decisamente inferiore (2-3%) rispetto alle celle tradizionali (10% e oltre).



**Ciò che realmente determina l'efficacia del rivestimento antiriflettente è lo spessore associato all'indice di rifrazione del materiale impiegato**

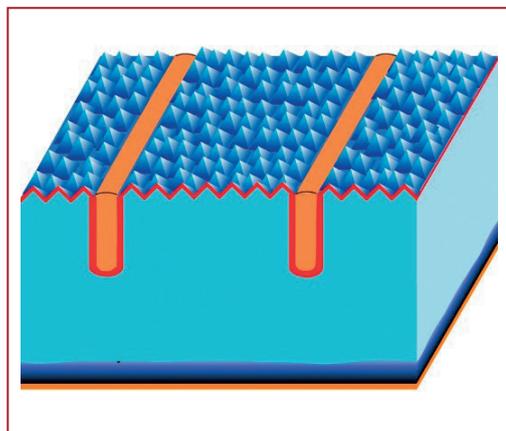


Figura 3.18 - Rappresentazione di una cella di tipo Buried contacts.

In questo caso, gli elettrodi sono costituiti da sottili barrette di rame.

L'elettrodo posteriore della cella è normalmente costituito da una deposizione di alluminio su tutta la superficie ad eccezione delle aree sulle quali saranno poi saldati i contatti, le quali sono invece realizzate in argento.

Infi e, un tipo di tecnologia mediante la quale sono stati raggiunti livelli di efficienza particolarmente elevati è rappresentata dalle celle *Back-contact*, nelle quali entrambi i contatti sono stati portati sul retro, liberando così del tutto la zona frontale che in tal modo non è soggetta ad alcuna schermatura. In queste celle si parte da un wafer di tipo N, nel quale la giunzione P-N è realizzata mediante strisce di tipo P sul retro, che si alternano ad altrettante strisce con una più intensa concentrazione N (tipo N+).

#### Le celle in film sottile

Le celle a film sottile, come si è visto, sono costituite da strati di materiale il cui spessore complessivo è dell'ordine del  $\mu\text{m}$  o poco più e di conseguenza devono sempre essere realizzate su un supporto che sia in grado di sostenerle adeguatamente. Un vetro delle dimensioni richieste costituisce sicuramente un supporto adeguato, ma nei casi in cui è richiesta leggerezza e flessibilità è possibile utilizzare supporti plastici trasparenti. Abbiamo visto che la composizione delle celle in film sottile può essere molto varia: telloruro di cadmio, diseleniuro di indio, rame e fosforo (con eventuale aggiunta di gallio), silicio amorfo o microcristallino. In più, possiamo frequentemente trovarci in presenza di celle *Tandem*, nelle quali ogni singolo strato converte una determinata porzione dello spettro solare. La realizzazione delle celle a film sottile avviene normalmente depositando dapprima uno strato conduttivo TCO su un substrato grande quanto il dispositivo fotovoltaico che si intende rea-

lizzare ed effettuare su di esso delle scanalature, con laser o altri sistemi, in modo da suddividere le celle. Successivamente, vengono depositati gli strati di materiale semiconduttore, anch'essi opportunamente sagomati secondo la struttura predisposta ed infine si deposita un altro strato TCO per chiudere i collegamenti.

La deposizione degli strati può avvenire in vari modi, tra cui l'esposizione sottovuoto della superficie a una opportuna miscela gassosa o attraverso processi di *sputtering*. Le asportazioni di materiale avvengono mediante rimozione chimica o meccanica delle zone interessate. In *figura 3.19* è mostrata la tipica struttura di una sequenza di celle a film sottile tra loro elettricamente interconnesse.

Il principale problema delle celle in silicio amorfo è rappresentato dalla bassa efficienza che normalmente non va oltre il 7-8% e inoltre tende a scendere con l'esposizione alla luce. Al fine di rendere più efficienti queste tipologie di celle i costruttori ricorrono spesso alla configurazione tandem con 2 o 3 celle in serie. Il silicio amorfo si presta abbastanza bene alla realizzazione di strati con band-gap anche inferiori a quello normalmente riscontrato, pari a circa 1,7 eV mediante l'inclusione di atomi di germanio o anche agendo sulla densità e conformazione della struttura.

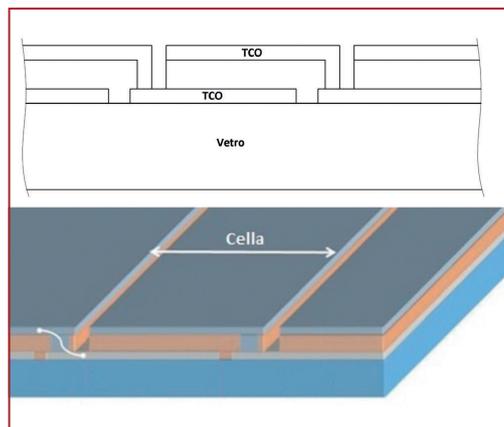


Figura 3.19 - Tipica struttura di una cella a film sottile.



**Il principale problema delle celle in silicio amorfo è rappresentato dalla bassa efficienza che normalmente non va oltre il 7-8% e inoltre tende a scendere con l'esposizione alla luce**

In questo modo è relativamente facile sviluppare strutture multistrato con giunzioni in grado di convertire porzioni differenti della radiazione luminosa.

Interessante è anche la combinazione di un wafer di silicio cristallino dopato N con una deposizione superficiale di silicio amorfo di tipo P da cui risulta una eterogiunzione, denominata commercialmente HIT, con caratteristiche di efficienza e coefficienti di temperatura particolarmente interessanti.



**I busbar si presentano quindi come fili che corrono sulla cella e possono essere realizzati in rame, permettendo quindi di risparmiare fino all'80% dell'argento impiegato**

### Celle fotovoltaiche commerciali

La tendenza a raggiungere prestazioni sempre più elevate ha dato un notevole impulso alla ricerca di soluzioni tecniche che siano in grado di migliorare le caratteristiche delle celle fotovoltaiche.

Pertanto, le celle fotovoltaiche commerciali sono quasi sempre frutto di un processo di innovazione che permette loro di competere in un mercato che conferma anno dopo anno la tendenza alla diminuzione del costo per kW dei componenti fotovoltaici.

Nel seguito sono brevemente illustrate le principali innovazioni tecniche che possiamo ritrovare nelle celle fotovoltaiche commerciali. Essendo il mercato dominato in larga misura dalle celle fotovoltaiche in silicio cristallino, l'elenco che segue si riferisce, per il momento, unicamente a questo tipo di dispositivi.

#### Celle Multi-busbar (MBB)

Negli ultimi anni si è affermata la tendenza ad aumentare il numero di busbar, ossia degli elettrodi frontali longitudinali, al fine di aumentare l'efficienza della cella rendendo più omogenea la raccolta delle cariche sulla parte frontale e riducendo la resistenza serie. Si è quindi passati in breve da 2-3 busbar a 4-5 e anche più.

Tuttavia, l'aumento dei busbar comporta anche la diminuzione della superficie irraggiata e quindi non può spingersi oltre certi limiti, almeno con le tecnologie tradizionali.



Figura 3.20 - Esempio di celle multi-busbar disposte in un modulo fotovoltaico (Meyer Burger's SmartWire technology).

Le celle multi-busbar utilizzano invece dei busbar sagomati in modo differenziale, in genere con sezione cilindrica di piccolo diametro, i quali intercettano una frazione inferiore della radiazione solare e sono anche in grado di sfruttarne la riflessione sia verso il vetro che verso la cella stessa. Attualmente, con questa tecnica si raggiunge il numero di 18 busbar per cella.

I busbar si presentano quindi come fili che corrono sulla cella (Figura 3.20) e possono essere realizzati in rame, permettendo quindi di risparmiare fino all'80% dell'argento impiegato. Il contatto elettrico con la cella può avvenire mediante una tecnologia tradizionale, che prevede delle saldature in punti prestabiliti, oppure mediante la cosiddetta *Smart Wire Connection Technology* (SWCT) che prevede invece una saldatura a bassa temperatura lungo tutta la lunghezza del busbar.

#### Celle PERC

Le celle PERC (*Passivated Emitter and Rear Contact*) introducono una modifica nel disegno del retro della cella con l'intento di aumentare la conversione della luce solare che attraversa la cella stessa.

A questo fine si depone uno strato passivato dielettrico di ossido di alluminio sul retro della cella e successivamente si praticano delle sottili scanalature nelle quali

vengono formati altrettanti strati fortemente dopati, connessi direttamente all'elettrodo posteriore di alluminio.

In queste celle si è osservata una minore ricombinazione degli elettroni e una maggiore conversione della luce solare, anche grazie all'aumentata riflessione interna.

In commercio è possibile trovare celle con caratteristiche simili, quali le PERL (*Passivated Emitter Rear Locally-diffused*) e le PERT (*Passivated Emitter Rear Totally diffused*) che trovano applicazione soprattutto nelle celle bifacciali.

### Celle con contatti posteriori

Le celle con contatti posteriori o *back-contact cells* sono anche dette IBC (*Interdigitated Back Contacted*) e permettono di annullare del tutto i contatti frontali riportando entrambe le polarità sul retro.

La tecnologia IBC permette di raggiungere e superare il 25% di efficienza di conversione principalmente per i seguenti motivi:

- l'eliminazione dell'elettrodo frontale che permette lo sfruttamento totale della superficie anteriore;
- la conseguente mancanza dello strato superficiale dopato in modo opposto al rimanente cristallo e quindi la possibilità di effettuare una texturizzazione frontale molto spinta.

A fronte di questi vantaggi vi è comunque una maggiore complessità nella produzione, benché i processi di fabbricazione si evolvano di continuo e facciano largo uso tecniche avanzate quali ad esempio l'*etching* selettivo e il processamento a laser. La *figura 3.21* mostra il principio di funzionamento di una cella IBC, mentre la *figura 3.22* mostra come si presentano il fronte e il retro della cella finita.

### Celle HIT

Le celle solari HIT (*Heterojunction with Intrinsic Thin layer*) sono composte da un

wafer cristallino dopato n sulle cui facce sono depositati dei sottili strati di silicio amorfo: intrinseco e P+ sulla faccia anteriore; intrinseco e N+ su quella posteriore. Il sottile strato di silicio amorfo intrinseco agisce come una efficiente superficie passivante per il wafer cristallino, riducendo la velocità di ricombinazione delle cariche. In questo modo è possibile ottenere dei rendimenti di conversione elevati e altre specifiche caratteristiche quali:

- elevata tensione a vuoto, superiore a 0,7 V per cella;
- coefficienti di temperatura inferiori a quelli tipici delle celle cristalline.

Parte del processo di fabbricazione avviene a temperatura più bassa rispetto alle celle cristalline tradizionali, in quanto la giunzione P-N è realizzata mediante il deposito degli strati di silicio amorfo anziché la diffusione del dopante all'interno del cristallo.

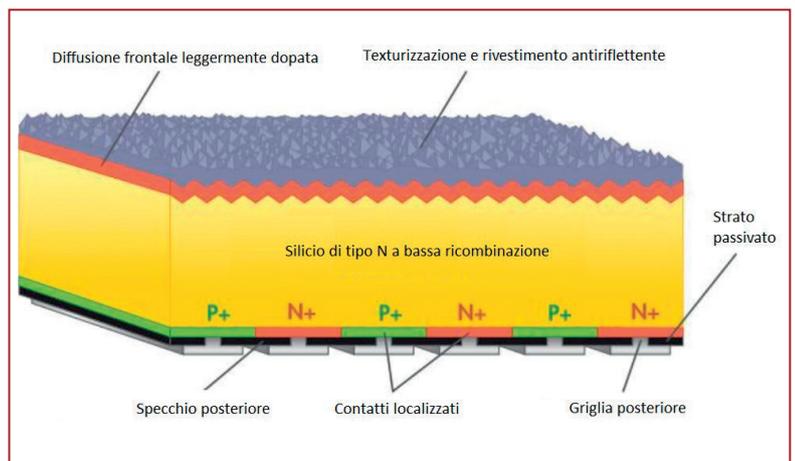


Figura 3.21 - Principio di funzionamento di una cella IBC (SunPower).

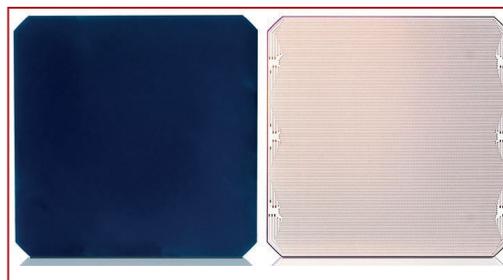


Figura 3.22 - Esempio di cella IBC commerciale.



**La tecnologia Shingled consiste nel suddividere le celle in un certo numero di strisce, le quali sono poi collegate tra loro mediante una parziale sovrapposizione del lato più lungo di ciascuna striscia**

### Celle Shingled

La tecnologia Shingled consiste nel suddividere le celle in un certo numero di strisce, le quali sono poi collegate tra loro mediante una parziale sovrapposizione del lato più lungo di ciascuna striscia come in *figura 3.23*. La serigrafia su ciascuna striscia è realizzata in modo tale che le porzioni di celle con questa configurazione risultano collegate tra loro in serie. Nel modulo fotovoltaico queste parti sono poi collegate tra loro in serie/parallelo per ottenere le caratteristiche desiderate.

Il principale vantaggio di questa tecnologia consiste nell'eliminazione dei busbar e quindi dell'ombreggiamento causato da questi ultimi. Inoltre, la parziale configurazione parallelo dei moduli fotovoltaici, rende questi ultimi meno sensibili agli ombreggiamenti parziali.

### Celle Half-cut

Le celle *half-cut* sembrano contrastare la tendenza prevalente negli ultimi anni, in cui si tendeva a incrementare le dimensioni delle celle per aumentare conseguentemente la potenza dei moduli fotovoltaici, guadagnare spazio e ridurre le connessioni interne. In questo caso invece si tagliano intenzionalmente le celle in due parti uguali per poi collegarle in serie.

Tuttavia, mediante questa operazione la corrente prodotta da ciascuna cella risulta dimezzata e con essa anche le perdite resistive.

Il numero di celle in serie inoltre non cambia, perché se ad esempio da 72 celle mediante il dimezzamento si ottengono 144 celle, il modulo fotovoltaico risulta ora composto da due sezioni di 72 celle in serie ciascuna, collegate tra loro in parallelo. Un ulteriore vantaggio sembra essere legato ai minori stress meccanici a cui sono sottoposte queste celle dimezzate nel corso della loro vita utile.

### Celle bifacciali

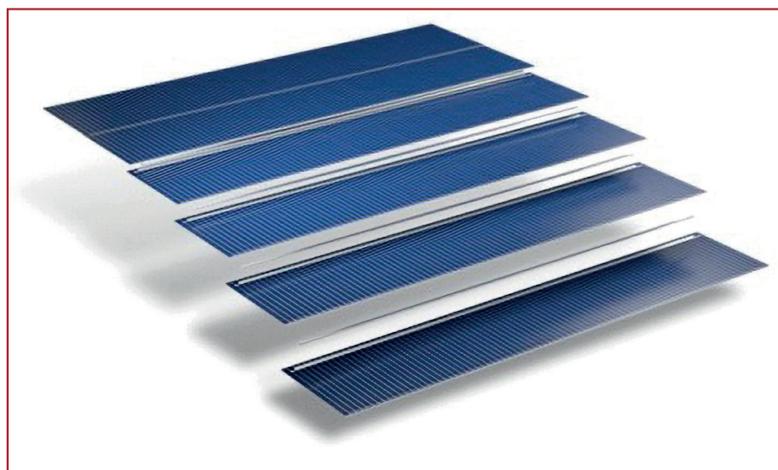
Le celle bifacciali, in grado di convertire la radiazione solare su entrambe le facce, non sono una novità nel mondo del fotovoltaico. Le loro proprietà erano note da tempo, tuttavia negli anni passati questi dispositivi erano relegati ad applicazioni di nicchia, del tipo moduli fotovoltaici necessariamente disposti verticalmente e non orientati a Sud.

In tempi più recenti si è visto però che la radiazione incidente sulla faccia posteriore, pur esigua, poteva contribuire ad aumentare significativamente la resa dell'impianto anche in configurazioni più tradizionali.

Questo fenomeno risulta particolarmente apprezzabile per i moduli fotovoltaici in-

clinati su superfici piane e, ancora di più, nel caso degli impianti a inseguimento.

Da un punto di vista costruttivo le celle solari bifacciali non pongono particolari problemi in quanto si tratta di realizzare la serigrafia anteriore anche sulla faccia posteriore.



*Figura 3.23 - Celle Shingled e loro disposizione in un modulo fotovoltaico (BlueSun).*

Tuttavia l'efficienza di conversione non è generalmente la stessa per entrambe le facce, in quanto la cella stessa non è completamente simmetrica e, inoltre, nella costruzione dei moduli fotovoltaici si tende generalmente a privilegiare l'esposizione della faccia anteriore.

### Tecnologie emergenti

Il solare fotovoltaico, muovendo una grande quantità di capitali ed essendo attualmente la fonte di energia elettrica più competitiva, almeno nella maggioranza dei casi, dà vita ad un'intensa attività di ricerca e sviluppo legata a nuovi prodotti e al miglioramento di quelli esistenti.

Si parla quindi di celle di 1° generazione, rappresentate principalmente dai dispositivi in silicio mono e poli-cristallino. Le celle di 2° generazione comprendono invece le eterogiunzioni, rappresentate da quasi tutti i film sottili commerciali

(CdTe, CIS, CIGS), dalle multigiunzioni (tandem) e dalle celle HIT. La 3° generazione comprende infine le celle organiche (Graetzel, matrici polimeriche, ecc.) e altre tecnologie emergenti (*dye-sensitized, quantum-dot, Perovskite, ecc.*).

Periodicamente, il NREL pubblica il *Best Research-Cell Efficiency Chart* (Figura 3.24) che riassume, anche dal punto di vista evolutivo, l'efficienza massima raggiunta dalle celle di diversa tecnologia.

Si tratta di risultati di laboratorio che quindi devono essere opportunamente ridimensionati nelle applicazioni commerciali. Inoltre, il grafico prescinde dalla durata e affidabilità dei componenti, per cui alcune tecnologie apparentemente promettenti, non è detto che siano in grado di mantenere nel tempo le caratteristiche iniziali ed avere la necessaria affidabilità che permetterebbe loro di evolversi in un prodotto commercialmente maturo.



**Il solare fotovoltaico, muovendo una grande quantità di capitali ed essendo attualmente la fonte di energia elettrica più competitiva**



Periodicamente, il NREL pubblica il Best Research-Cell Efficiency Chart (Figura 3.24) che riassume, anche dal punto di vista evolutivo, l'efficienza massima raggiunta dalle celle di diversa tecnologia

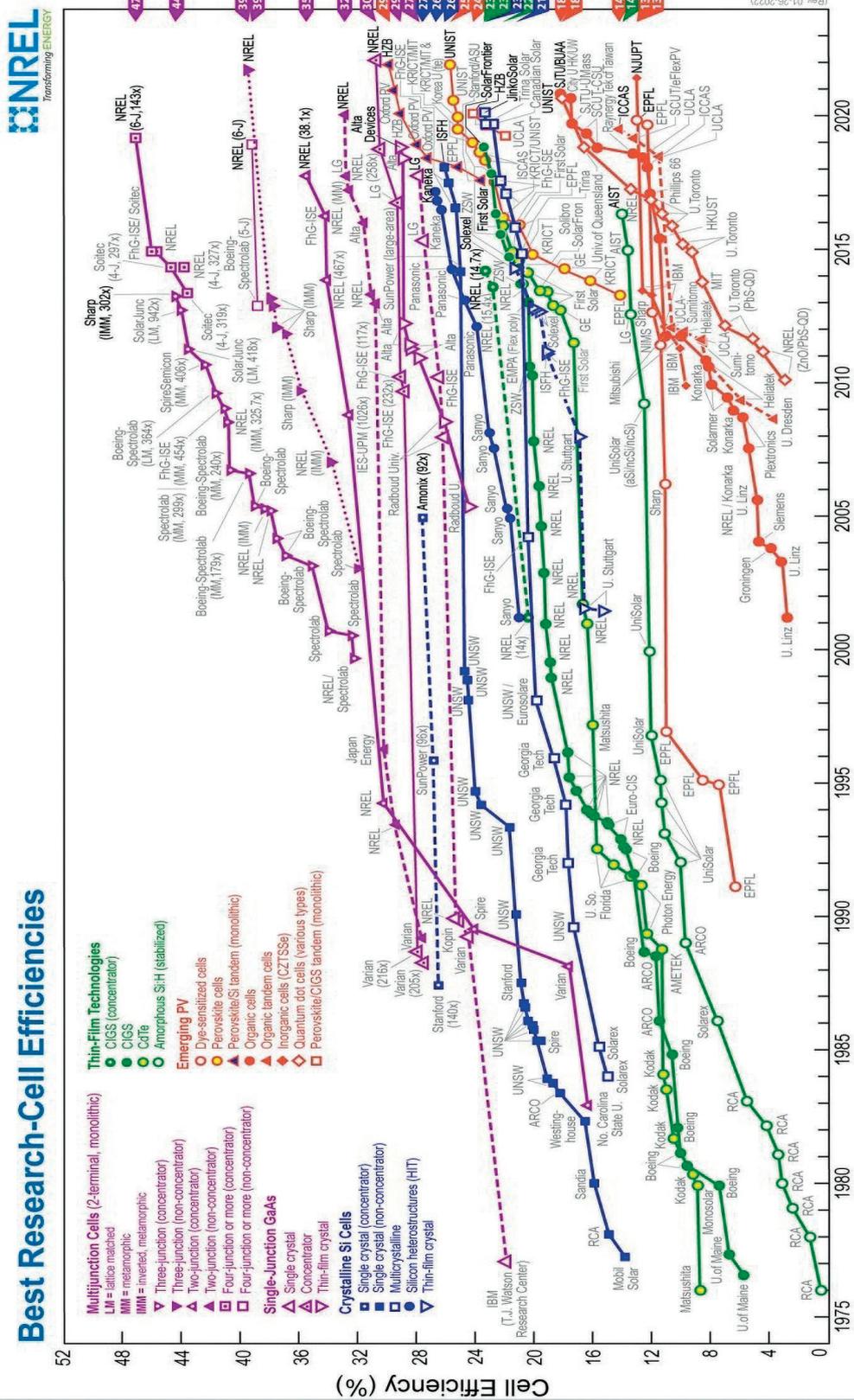


Figura 3.24 - Diagramma delle prestazioni delle celle solari pubblicato da NREL.