

Sistemi energetici

La cella fotovoltaica: dal silicio all'elemento del pannello



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Motivazioni per il suo sviluppo

Produce direttamente ed **istantaneamente energia elettrica senza organi in movimento.**

Inquinamento trascurabile (chimico-acustico-termico)

Il materiale costituente è il **Silicio**, secondo componente nella forma elementare della crosta terrestre.

Sviluppo nelle tecnologie di produzione delle celle e rendimento in crescita.

Il prodotto finito (modulo) presenta scarsi problemi di smaltimento.

Sistema modulare facilmente integrabile in strutture edilizie esistenti. Semplicità di installazione e di utilizzo.

Durata dell'impianto stimata in oltre 20 anni.

Scarsa manutenzione;
Assenza di residui o scorie.

Scoperta dell'effetto fotovoltaico: 1839.

Fine anni 50: programmi spaziali

Solo nella prima metà del nostro secolo sono state realizzate celle solari utilizzabili in applicazioni pratiche.



Il silicio

Il silicio è l'**elemento più diffuso in natura** dopo l'ossigeno, ma, per essere sfruttato, **deve presentare un'adeguata struttura molecolare** (monocristallina, policristallina o amorfa).

Struttura **monocristallina**: atomi orientati nello stesso verso e legati, gli uni agli altri, nello stesso modo.

Struttura **policristallina**: atomi aggregati in piccoli grani monocristallini orientati in modo casuale.

Struttura **amorfa**: atomi orientati in modo casuale come in un liquido, pur conservando le qualità dei solidi.

DIVERSI TIPI DI SILICIO IN DIPENDENZA DEL GRADO DI PUREZZA:

- **silicio di grado elettronico** (con concentrazione di impurezze di circa 1 parte su 100 milioni),
- **silicio di grado solare** (impurezze di 1 parte su 10.000),
- **silicio metallurgico** (impurezza di circa 1 parte su 100).

 **l'industria delle celle solari utilizza sostanzialmente lo scarto delle industrie elettroniche.**

Lavorazione del silicio: dalla sabbia alla cella

Il costituente principale di questo tipo di celle è il silicio che in natura si trova sotto forma diossido di silicio.

Per ottenere silicio in forma pura la sabbia deve essere fusa insieme a polverino di carbone. Mediante questo processo è possibile ottenere silicio con un grado di purezza del 98%.

Il silicio viene, quindi, ulteriormente raffinato mediante un processo chimico durante il quale viene dapprima ridotto, finemente macinato e, successivamente, trattato in un forno con acido idrocloridrico.

Il prodotto di questo trattamento è un liquido a base di idrogeno e tricloro-silano, avente una temperatura di ebollizione pari a 31° C.

Le impurità vengono separate dal silicio attraverso un processo di distillazione per fasi successive.

Quando il grado di purezza raggiunge quello desiderato, il triclorosilano viene ridotto a silicio in presenza di idrogeno ad una temperatura di 1000° C.

A questo punto il silicio può essere sottoposto a **diversi trattamenti per conseguire, ad esempio, celle in silicio monocristallino o policristallino.**

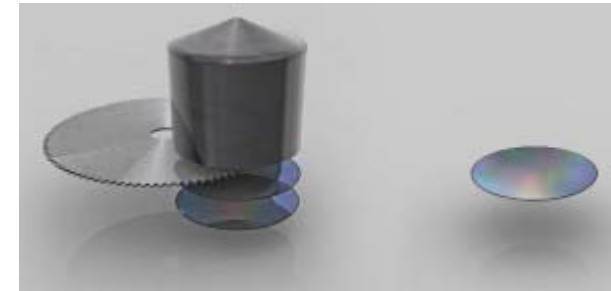
Processi di produzione delle celle

FORMAZIONE E TRATTAMENTO DEL LINGOTTO

- METODI DI PRODUZIONE
- SQUADRATURA
- TAGLIO CON SEGA A FILO
- DECAPPAGGIO

TRATTAMENTO DELLA CELLA

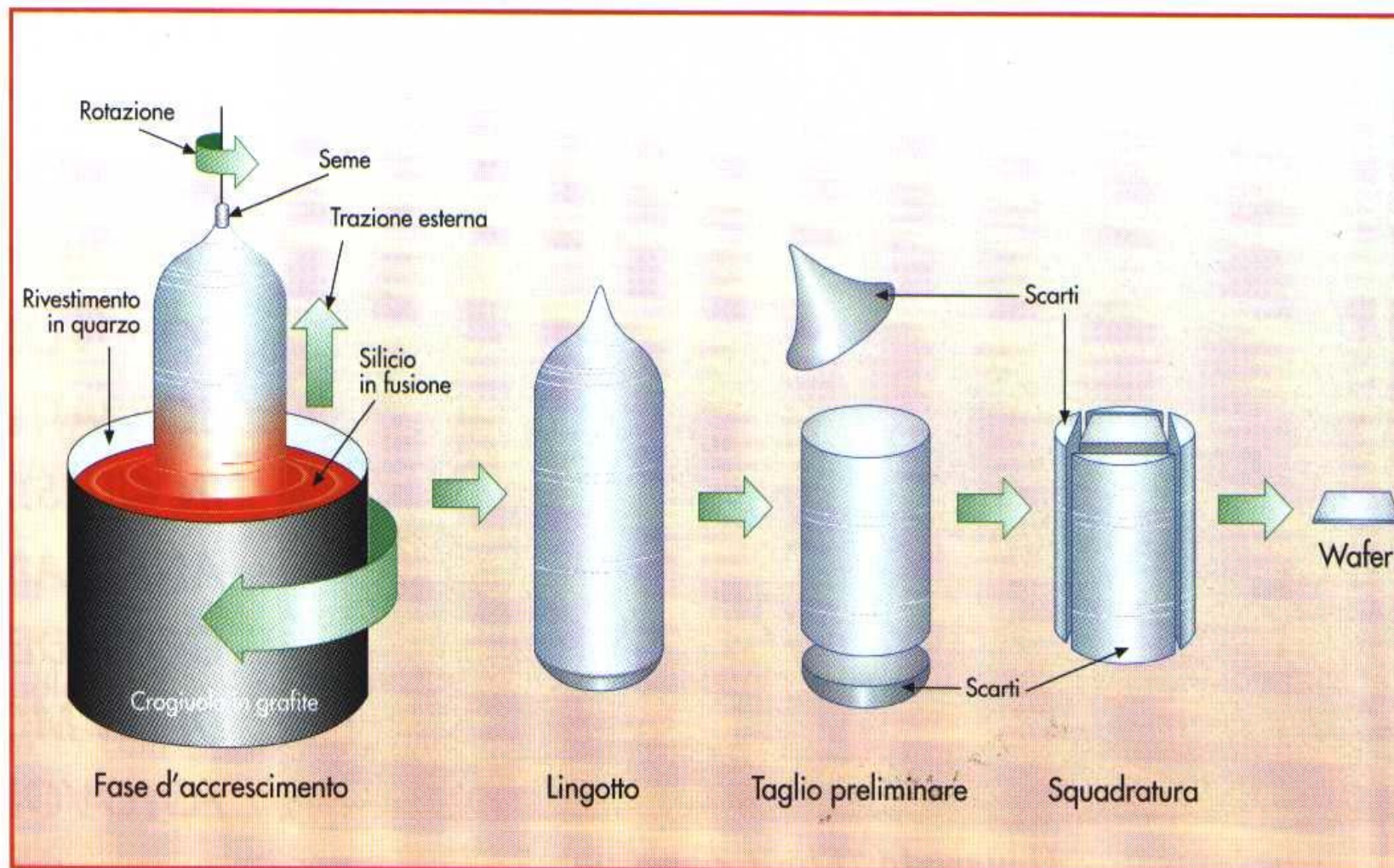
- DIFFUSIONE (in forni): drogaggio della cella con
 - boro (B) (giunzione "p")
crea una lacuna per ogni atomo di boro: accetta un elettrone
 - fosforo (P) (giunzione "n")
libera un elettrone per ogni atomo di fosforo
- DEPOSIZIONE CONTATTI (processo serigrafico)
- ANTI-REFLECTIVE COATING
- TEST AL SIMULATORE



Drogaggio di un semiconduttore: introduzione all'interno del semiconduttore, appartenente al IV gruppo della tavola periodica, di atomi del III o V gruppo. In questo modo si formano due strutture differenti: da un lato una con un eccesso di elettroni (donatrice) e dall'altro una struttura con un difetto di elettroni (accettrice). Ad esempio: il silicio, semiconduttore appartenente al IV gruppo, può essere drogato con sostanze del III gruppo, (trivalenti, accettrici), oppure con sostanze pentavalenti (donatrici).

Metodi di produzione

METODO CZOCHRALSKY PER LA PRODUZIONE DI SILICIO MONOCRISTALLINO

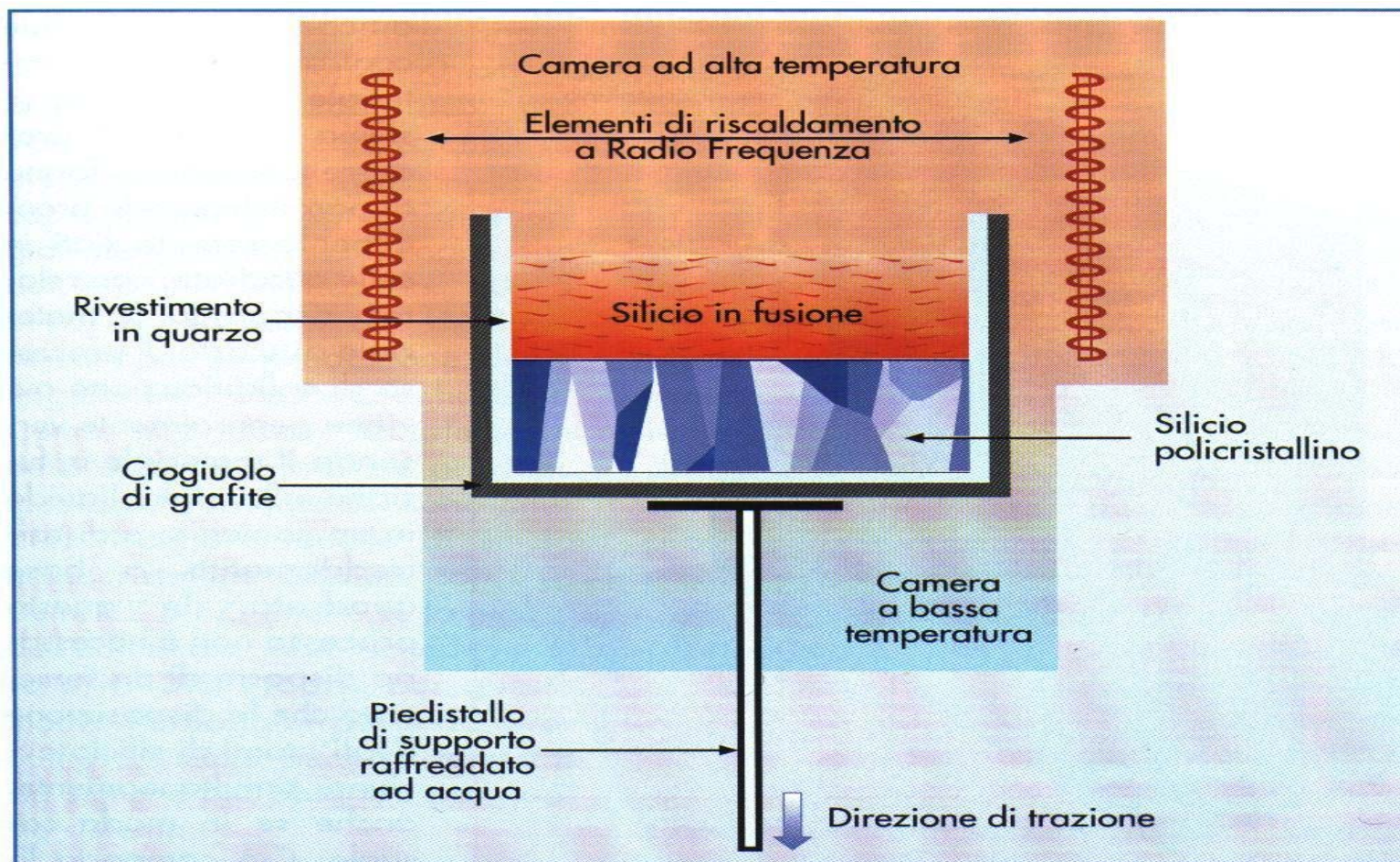


Lingotti dopo la squadratura



Metodi di produzione

METODO A SOLIDIFICAZIONE CONTROLLATA PER LA PRODUZIONE DI SILICIO POLICRISTALLINO

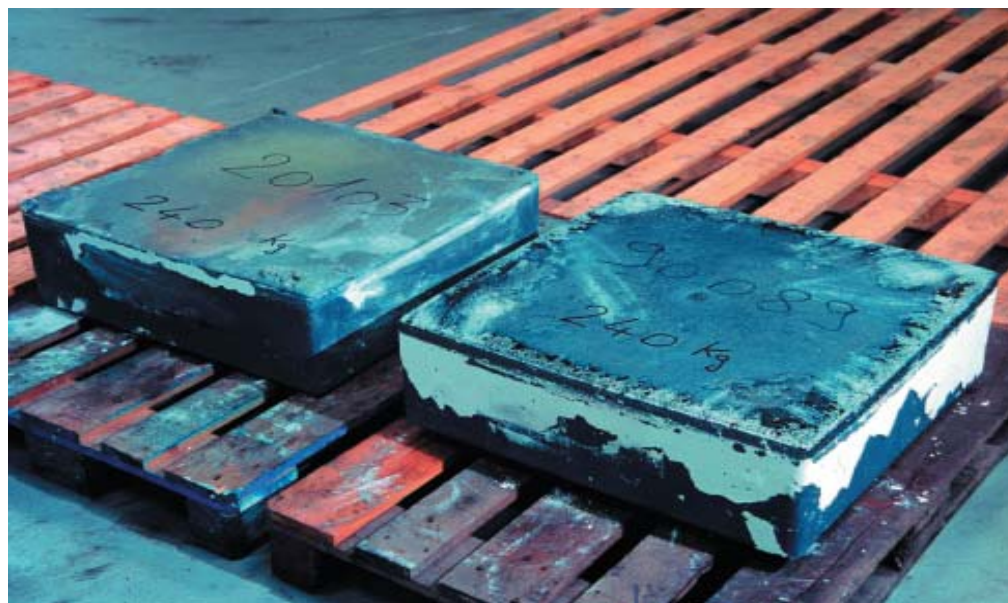


Metodi di produzione

METODO CASTING LINGOTTI PER SILICIO POLICRISTALLINO

Il casting è la tecnica maggiormente utilizzata.

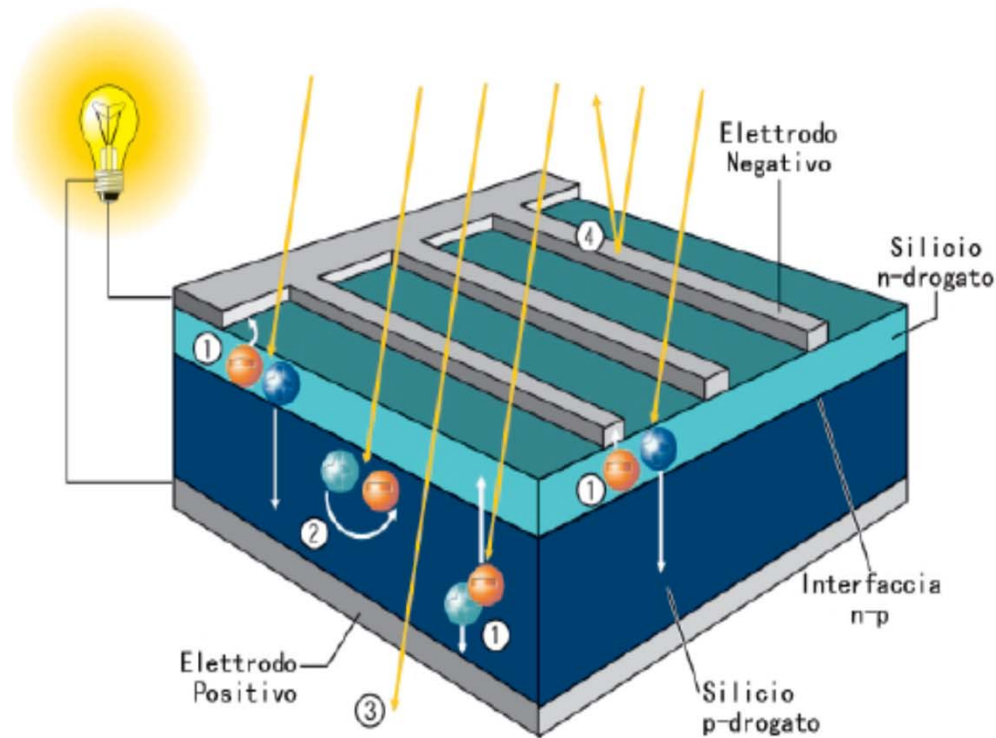
E' un processo produttivo di celle fotovoltaiche, a partire dal silicio scartato dalle industrie elettroniche.



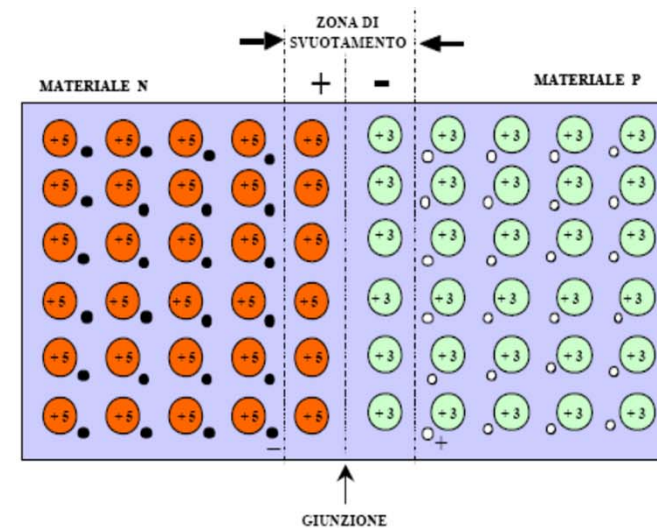
Il silicio impuro è riscaldato fino ad temperatura di 1500° C, quindi, viene raffreddato fino ad una temperatura di circa 800° C. In questo modo vengono creati dei blocchi di silicio con dimensioni di 40×40 cm e spessore di 30 cm. I blocchi vengono suddivisi in lingotti e, successivamente, in wafers aventi spessore 0.3 mm

EFFETTO FOTOVOLTAICO

→ L'effetto **fotovoltaico** si basa sulla capacità di alcuni materiali semiconduttori di trasformare la luce in energia elettrica.



- **Silicio**
- **Diseleniuro di rame e indio**
- **Tellururo di cadmio**
- **Arseniuro di gallio**



DROGAGGIO

Nei forni di diffusione viene dapprima realizzato lo strato P (drogaggio con boro), quindi lo strato N mediante la diffusione di atomi di fosforo ad una temperatura compresa tra 800 1000° C.

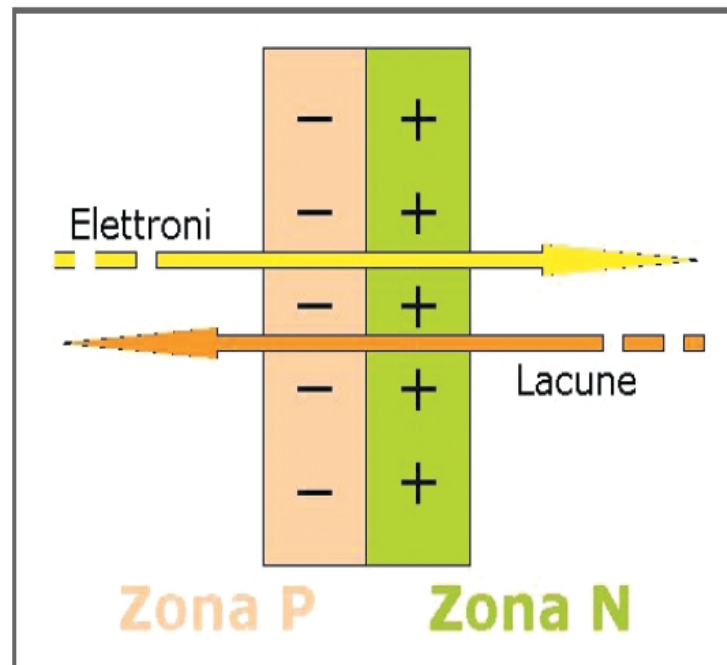
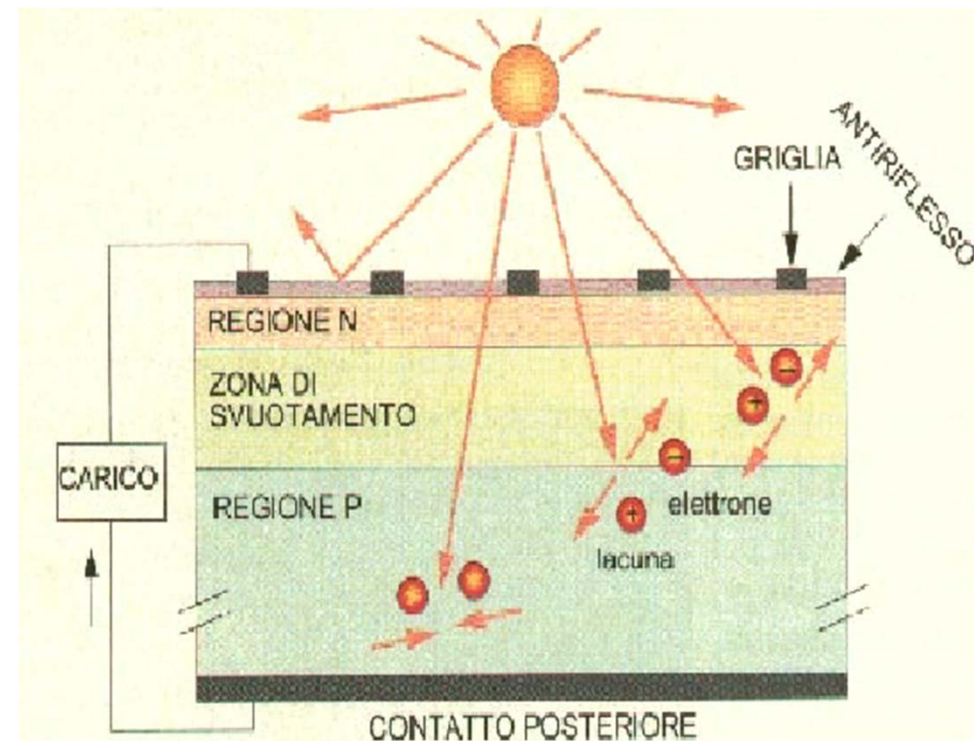


Fig. 1.33 - Processo di conduzione nel silicio drogato con atomi di boro e fosforo.



DEPOSIZIONE DEI CONTATTI

CONTATTI ANTERIORI

La cella necessita di contatti metallici disposti su entrambe le superfici (anteriore e posteriore), allo scopo di “raccolgere” e rendere disponibile per il circuito elettrico la corrente elettrica che si genera in virtù dell’effetto fotovoltaico.

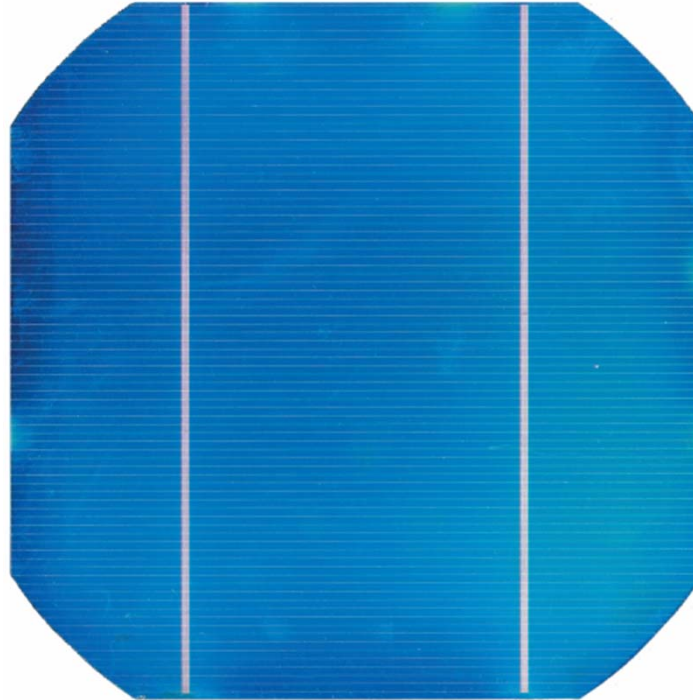
I contatti posizionati sulla superficie esposta al sole, ovviamente, devono essere molto sottili, ossia devono occupare la minore superficie possibile. In generale, i contatti vengono posizionati sulla cella attraverso processi di stampaggio o serigrafia.

Ciascun contatto ha un diametro variabile tra 0,1 mm e 0,2 mm: inoltre, due linee di contatto (*bus lines*), caratterizzate da uno spessore maggiore, vengono saldate ai contatti posteriori della cella adiacente.



DEPOSIZIONE DEI CONTATTI

CONTATTI ANTERIORI



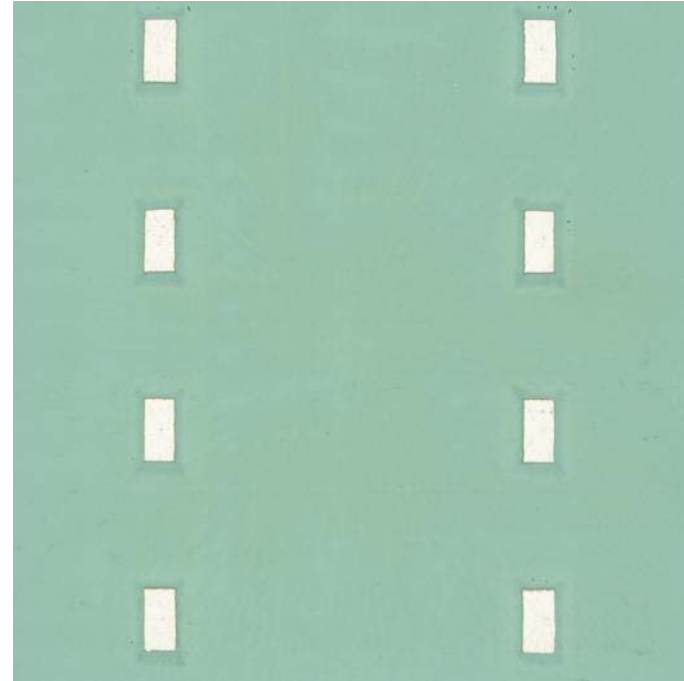
Un processo chiamato ***Saturn Procedure*** consente di ridurre lo **spessore dei contatti** fino a **0,02 mm** mediante l'impiego del laser che in questo caso viene utilizzato per tracciare sulla superficie della cella i canali per la deposizione dei contatti stessi. **Questa procedura consente di aumentare la superficie utile, di predisporre un reticolo di contatti più fitto e di ridurre la resistenza elettrica.**

DEPOSIZIONE DEI CONTATTI

CONTATTI POSTERIORI



DEPOSIZIONE RETICOLARE

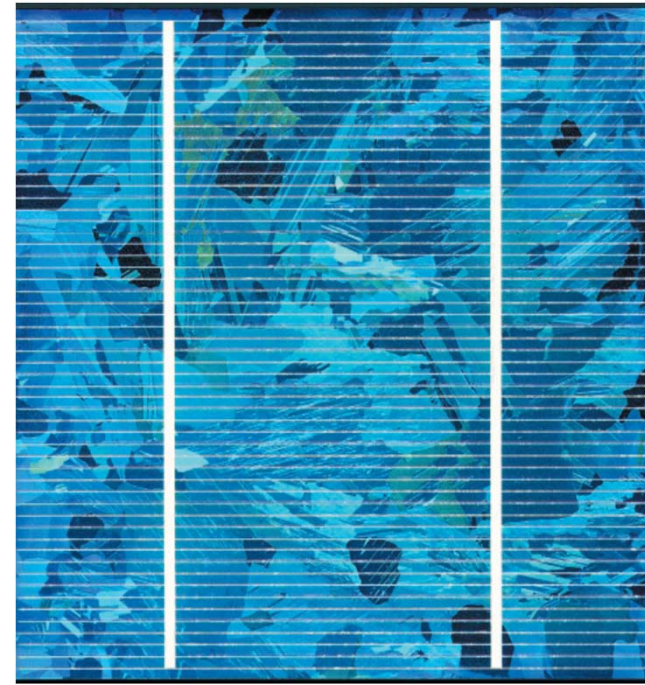
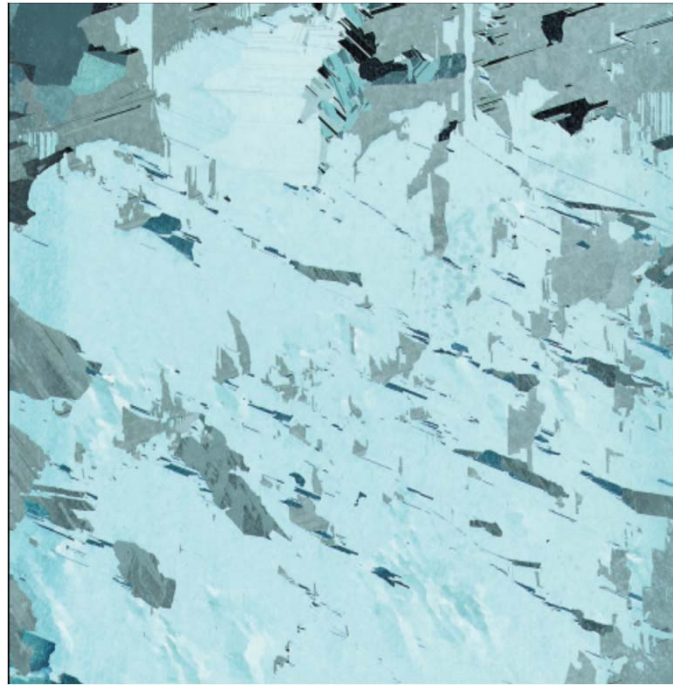


DEPOSIZIONE UNIFORME

Diversamente dai contatti depositi sulla superficie anteriore, **non esistono vincoli spaziali per i contatti che interessano la superficie posteriore della cella.**

Ad esclusione del caso in cui i moduli fotovoltaici non siano utilizzati come **elementi strutturali semi-trasparenti**, la disposizione dei contatti non è visibile.

DEPOSIZIONE DELL'ANTIRIFLESSO



Realizzati i contatti metallici, il fronte della cella viene ricoperto da uno strato di materiale antiriflettente, in genere ossido di titanio (TiO_2).

Tale strato è necessario per ottenere che tutta la luce incidente venga raccolta dalla giunzione.

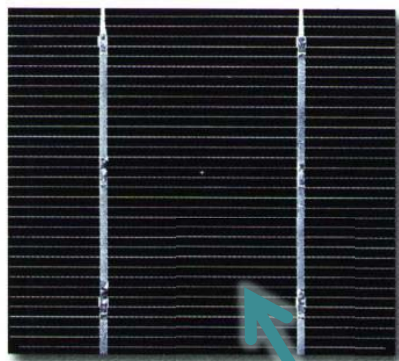
Senza trattamento ARC, per perdite per riflessione possono raggiungere anche il 30% della radiazione incidente.

EFFICIENZA DI UNA CELLA

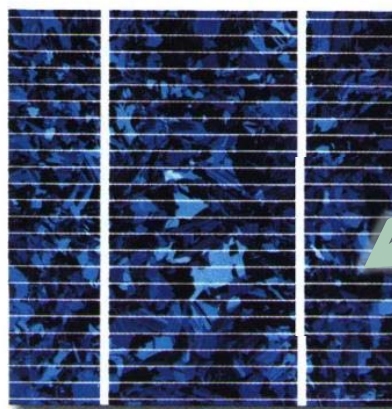
100% irraggiamento solare

- 3% fenomeni di riflessione e presenza dei contatti metallici
 - 23% fotoni troppo poco energetici
 - 32% fotoni troppo energetici
 - 8,5% fenomeni di ricombinazione
 - 20% gradiente elettrico all'interno della cella
 - 0,5% perdite termiche dovute alla resistenza nei contatti
- = 13% energia elettrica utilizzabile**

La cella è in genere di forma quadrata, di superficie pari a 100 cm^2 (ma si può arrivare a 225), si comporta come una minuscola batteria, producendo, nelle condizioni di soleggiamento dell'Italia (1 KW/m^2 e 25° C di T), **una corrente di 3A, con una tensione di 0,5V, quindi una potenza di 1,5 watt di picco (Wp)**



Silicio
monocristallino
14% - 17%



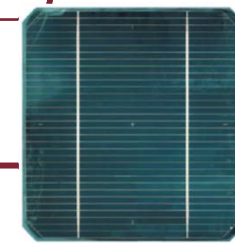
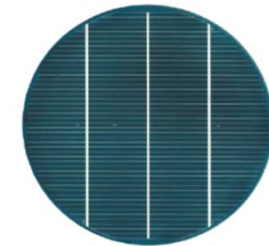
Silicio
policristallino
12% - 16%

Silicio amorfo
6% - 8%



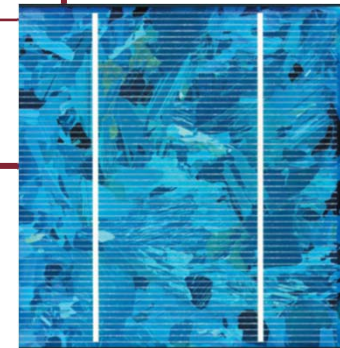
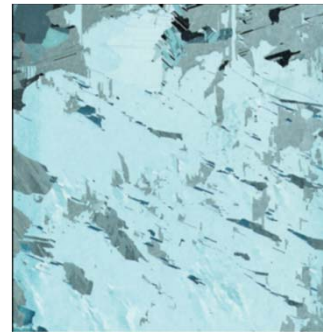
LA CELLA FOTOVOLTAICA MONOCRISTALLINA

<i>Efficienza</i>	14 / 17 %
<i>Forma</i>	Tonda quadra pseudoquadra
<i>Dimensione e diametri</i>	10x10 cm 12.5x12.5 cm Ø 10 -12,5 – 15 cm
<i>Spessore</i>	0,3 mm
<i>Struttura dei cristalli</i>	Omogena
<i>Colore</i>	Blu scuro / nero (con AR) Grigio (senza AR)



LA CELLA FOTOVOLTAICA POLICRISTALLINA

<i>Efficienza</i>	12 / 16 %
<i>Forma</i>	Quadra
<i>Dimensione e diametri</i>	10x10 cm 12.5x12.5 cm 15x15 cm
<i>Spessore</i>	0,3 mm
<i>Struttura dei cristalli</i>	Disomogena
<i>Colore</i>	Blu (con AR) Grigio-argento (senza AR)



LA CELLA FOTOVOLTAICA IN SILICIO AMORFO (film sottile)

<i>Efficienza</i>	5/ 8 %
<i>Forma</i>	A scelta
<i>Dimensione</i>	Moduli std max 0.77x2,44 m Moduli speciali max 2x3 m
<i>Spessore</i>	Substrato 1,3 mm (vetro, plastica, metallo) Si amorfo 0,001 mm
<i>Struttura dei cristalli</i>	Uniforme
<i>Colore</i>	Dal marrone al nero

Celle a film sottile (silicio amorfo); si possono ottenere film di spessore totale pari a 1-2 mm, su supporti anche flessibili e leggerissimi. Dal punto di vista economico sono molto promettenti perché usano substrati a basso costo e processi di manifattura adatti a produzioni di massa. I valori di efficienza sono attualmente soltanto del 5-8% e rimangono da risolvere problemi legati all'instabilità delle prestazioni nel tempo. Per contro, il processo produttivo offre la possibilità di una automazione molto spinta con conseguente risparmio ed aumento della velocità di produzione. L'aspetto estetico gradevole e la possibilità di realizzare moduli flessibile, li rendono particolarmente idonei per applicazioni ad alta valenza architettonica. Recentemente si è riusciti ad aumentare considerevolmente l'efficienza delle celle di α Si con il processo "multigiunzione", con tale sistema diversi strati di silicio, drogati in modo da risultare sensibili a lunghezze d'onda differenti della luce, vengono sovrapposti, per creare celle a due o tre giunzioni, ognuna sensibile ad una porzione differente dello spettro luminoso.



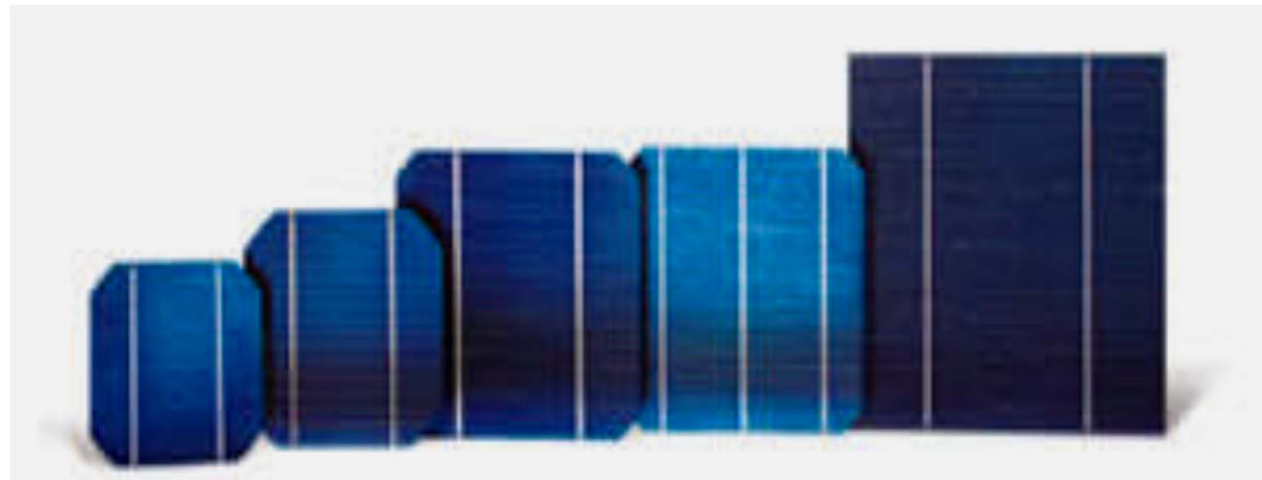
LA CELLA

Caratteristiche elettriche

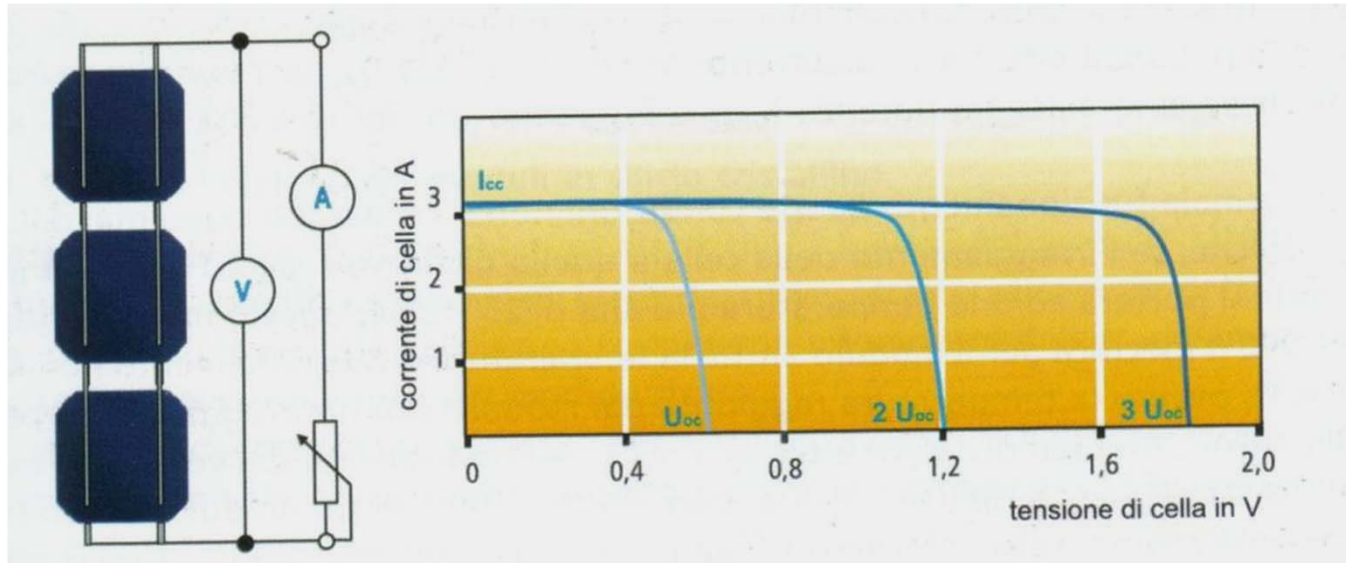
Le celle commerciali

la tipica cella fotovoltaica è costituita da un sottile wafer, **di spessore di 0,25 ÷ 0,35 mm** circa, di silicio mono o policristallino

Essa è **generalmente di forma quadrata, 10 x 10 cm** (sino a 225 cm²) e si comporta come una minuscola batteria, **producendo** - nelle condizioni di **soleggiamento standard** (1 kW/m² e 25° C), **una corrente di 3 A**, con **una tensione di 0,5 V**, quindi una **potenza di 1,5 Watt**.



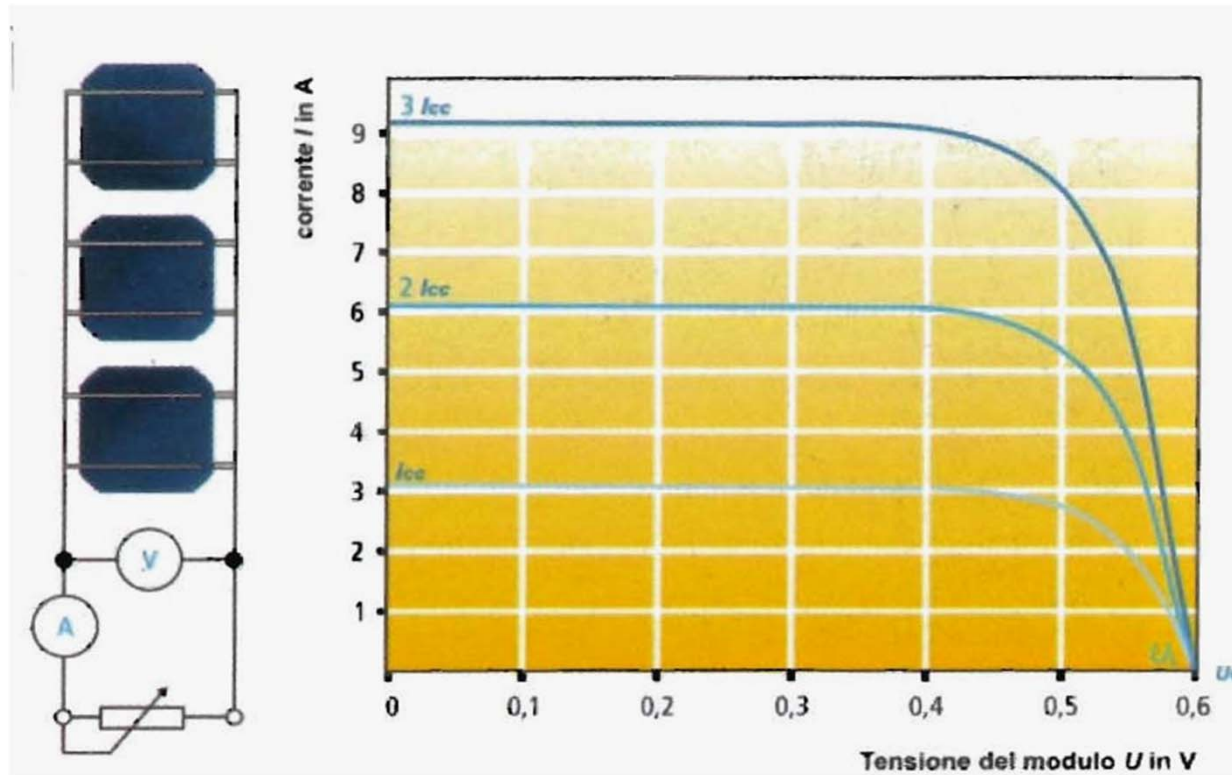
CELLE IN SERIE



Lo schema mostra i parametri elettrici e le curve caratteristiche di più celle collegate in serie.

Si nota che la **V totale è la somma delle V delle singole celle**, mentre **la I rimane sostanzialmente immutata**.

CELLE IN PARALLELO



Lo schema mostra i parametri elettrici e le curve caratteristiche di più celle collegate in parallelo, e di come cambia la curva I-V.

Si nota che la **V** rimane costante, mentre la **I** è la somma delle correnti delle singole celle.

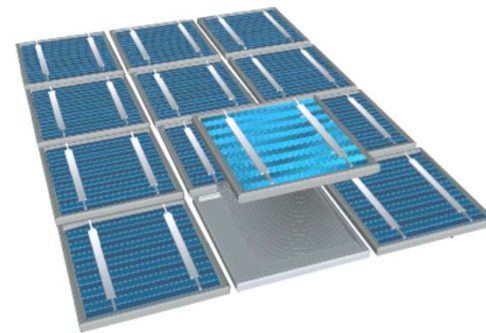
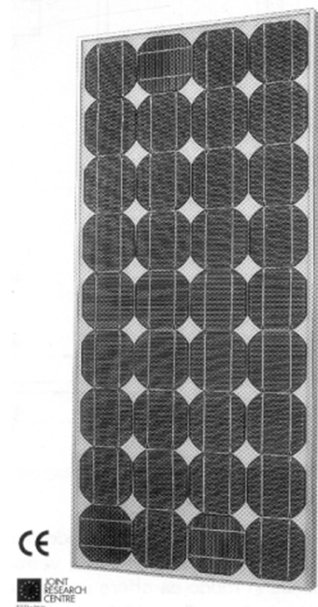
IL MODULO FOTOVOLTAICO

Componente base dei sistemi fotovoltaici.

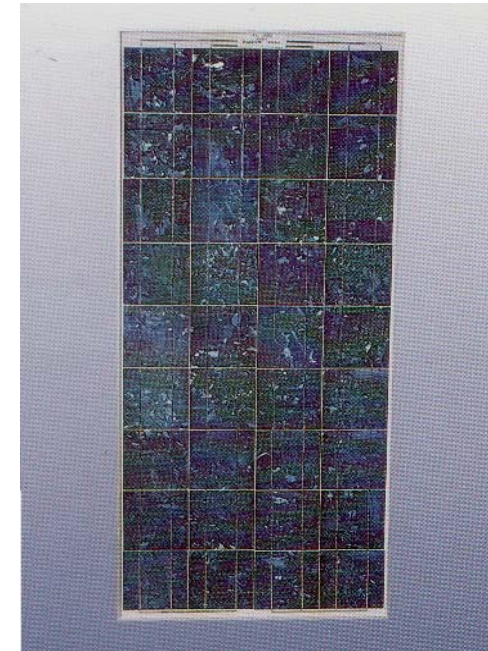
Ottenuto dalla connessione elettrica delle celle fotovoltaiche connesse in serie o in parallelo.

Le celle vengono assemblate fra uno strato superiore di vetro ed uno inferiore di materiale plastico (tedlar), il tutto racchiuso in una cornice di alluminio.

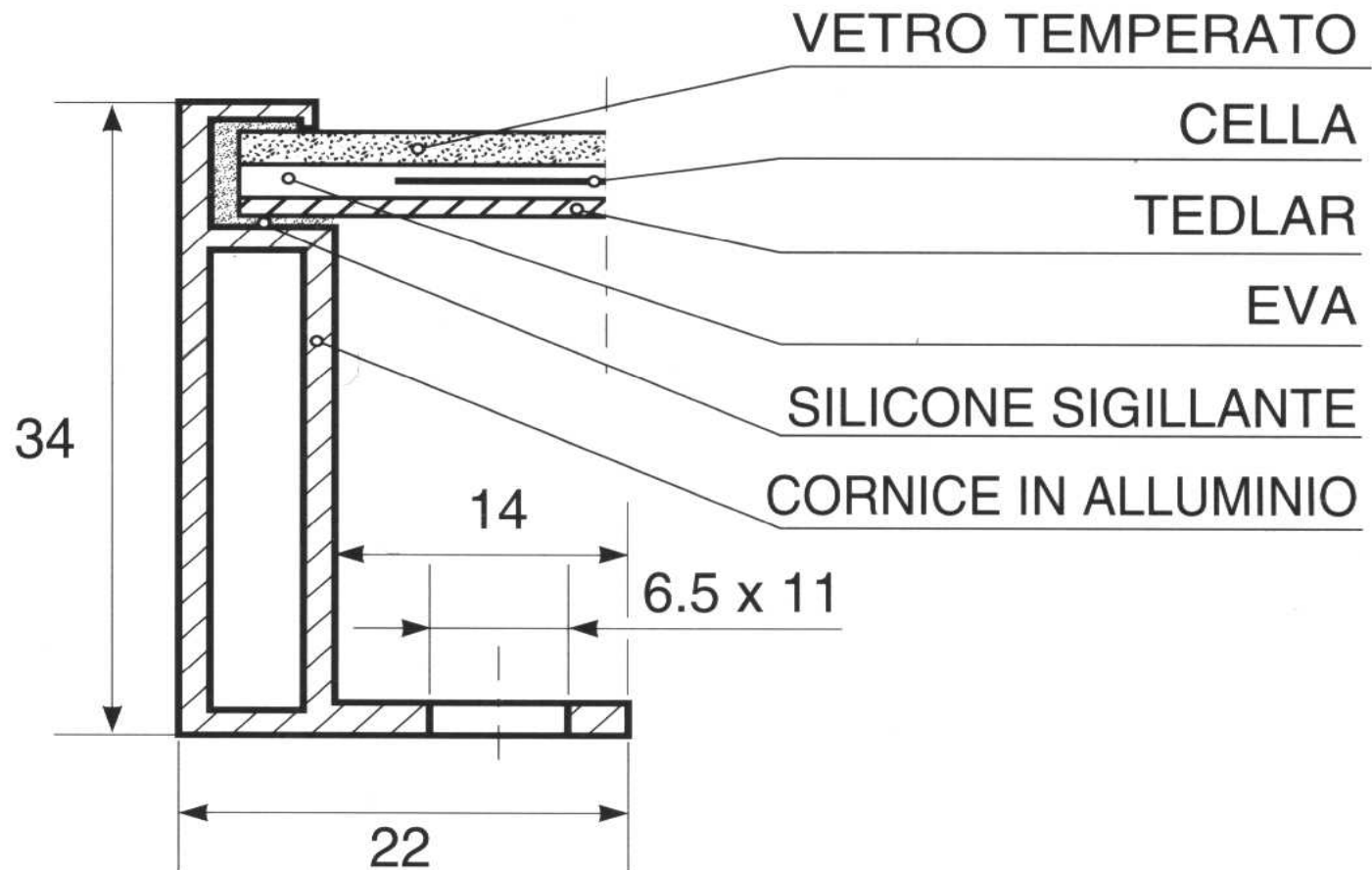
I moduli più comuni sono formati da 36 o 72 celle



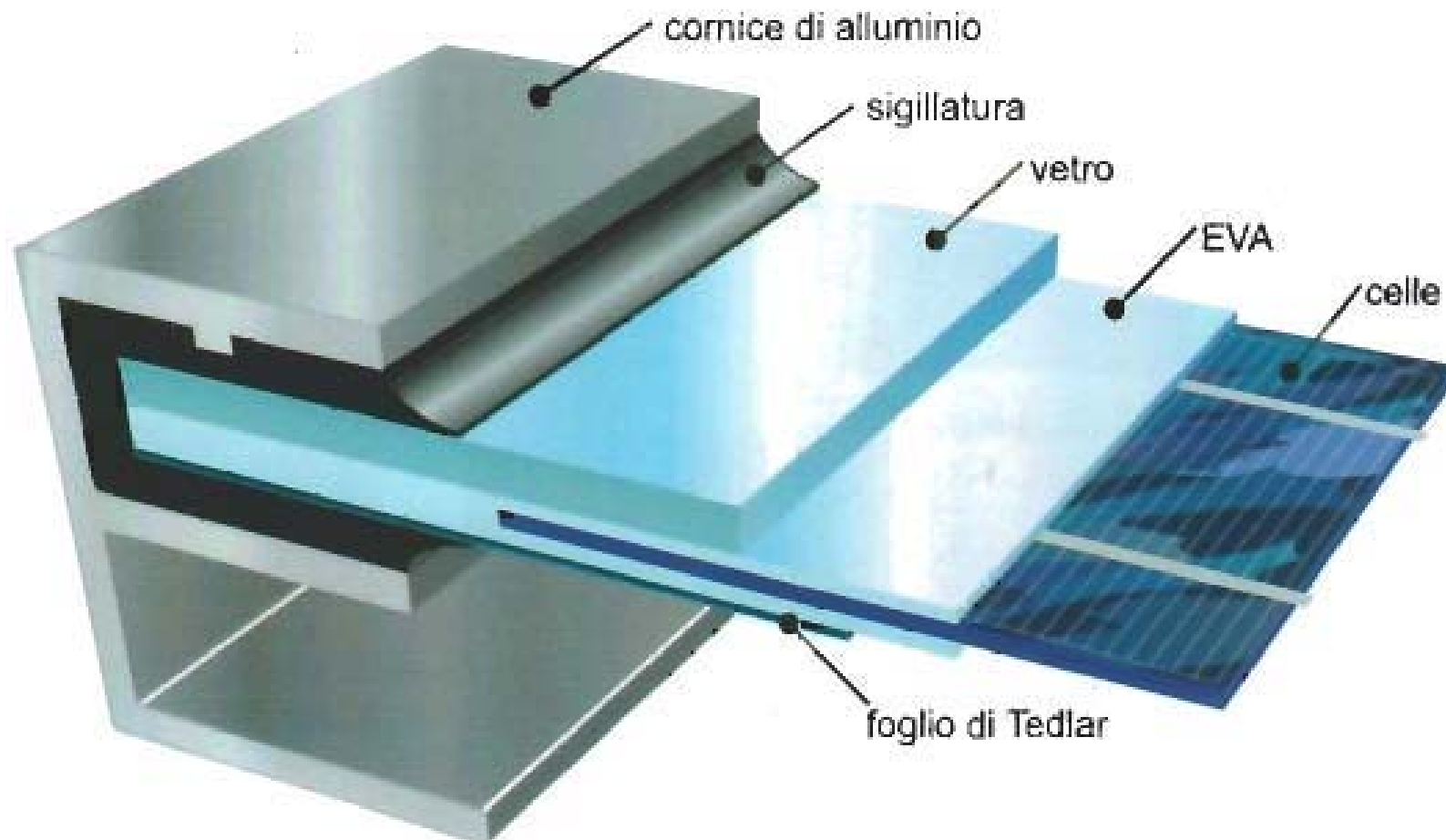
MODULO
Raccoglie l'energia radiante del sole per trasformarla in corrente continua che viene raccolta ai due morsetti d'uscita.



SEZIONE DEL MODULO FOTOVOLTAICO



SEZIONE DEL MODULO FOTOVOLTAICO



IL MODULO FOTOVOLTAICO

Saldatura dei terminali

Occorrono adeguati terminali di collegamento sui contatti anteriori e posteriori della cella.

Questi terminali sono in forma di nastro (Ribbon) in rame.

La saldatura (Tabbing) può essere manuale o automatica.



IL MODULO FOTOVOLTAICO

Formazione della stringa

Le celle vengono collegate assieme a formare lunghe stringhe, utilizzando appositi tracciati di saldatura (**Stringing**)

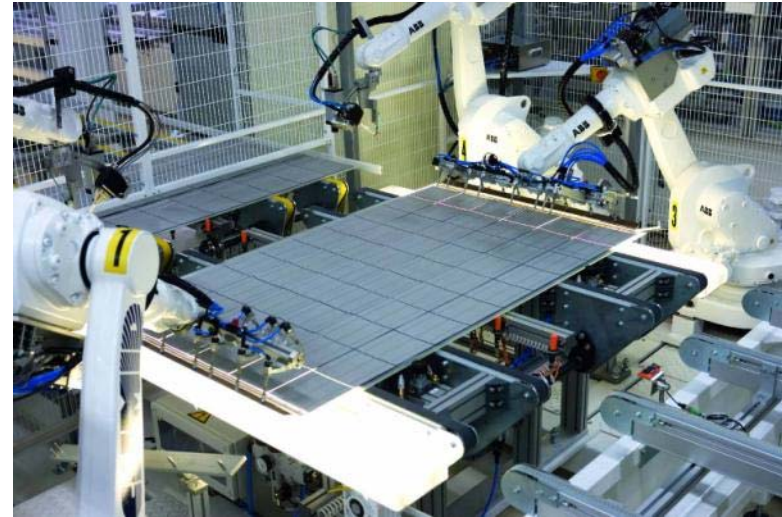


IL MODULO FOTOVOLTAICO

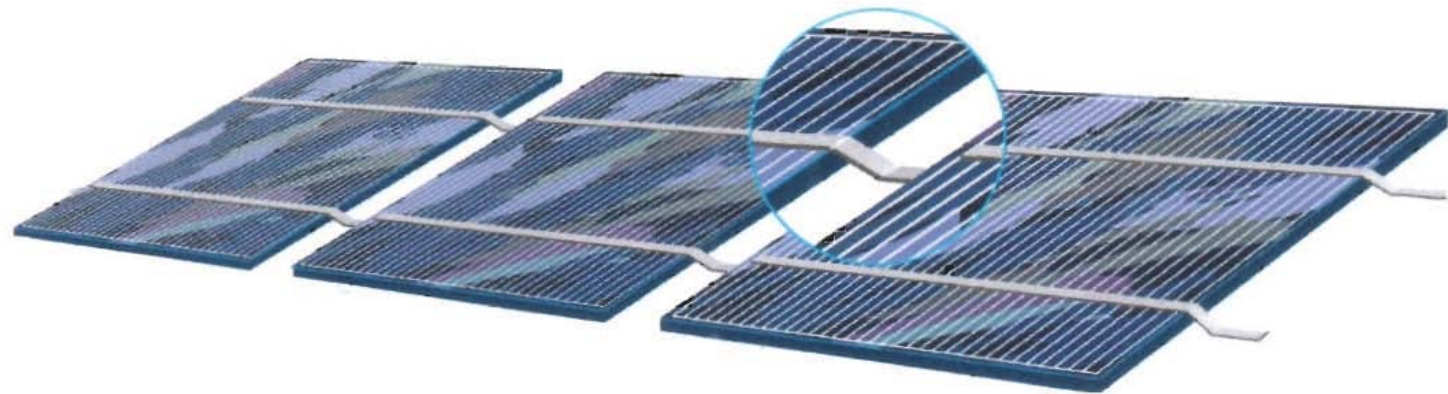
Saldatura delle celle



MANUALE



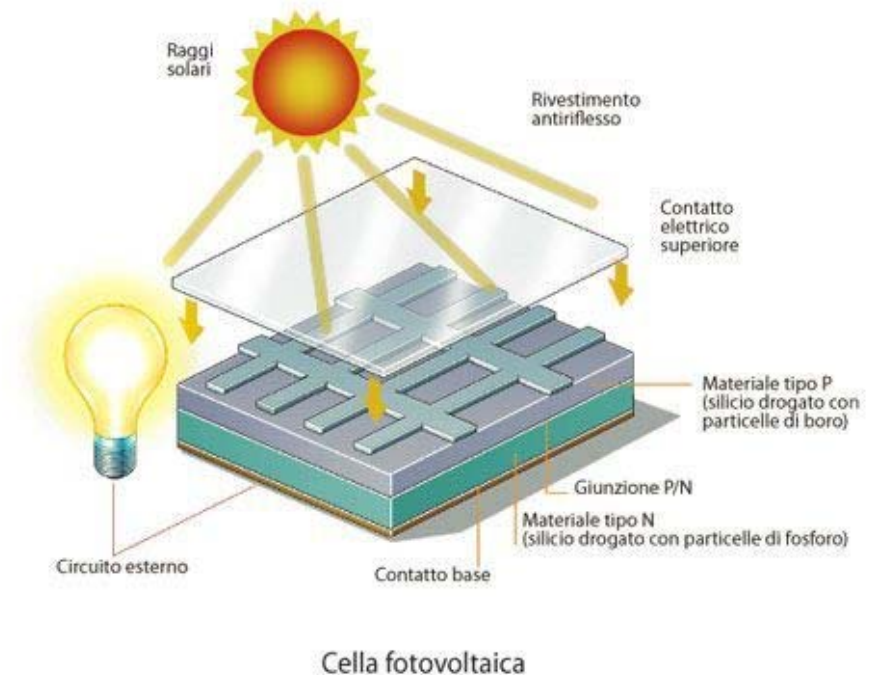
AUTOMATICA



IL MODULO FOTOVOLTAICO

Preparazione del sandwich

Il piano della cella costituisce la parte centrale del "sandwich" che vede, andando dall'esterno all'interno, prima una **lastra di vetro** a basso tenore di ossido di ferro ($< 0.04\%$) che assicuri un *ottima trasmittanza (90%) e una buona resistenza meccanica* (vetro temprato meccanicamente o chimicamente); quindi un **foglio sigillante** che assicura anche un buon isolamento dielettrico (ad esempio acetato vinil-etilenico EVA), quindi il **piano della cella**, un **nuovo foglio di EVA** ed infine, **posteriormente, un'altra lastra di vetro o comunque un materiale isolante termico**.



IL MODULO FOTOVOLTAICO LAMINAZIONE

Il sandwich, viene posto in un forno di laminazione che assicura la sigillatura dei componenti, rende l'EVA trasparente con il riscaldamento (a temperatura ambiente è traslucido) ed elimina all'interno del sandwich l'aria residua che, con il contenuto di vapore d'acqua, potrebbe causare effetti di corrosione.



IL MODULO FOTOVOLTAICO INCORNICIATURA

Si procede quindi a fissare il sandwich in una cornice, per lo più di alluminio estruso anodizzato, per meglio resistere alla corrosione conservando caratteristiche di leggerezza, e si aggiunge la cassetta di giunzione.



IL MODULO FOTOVOLTAICO

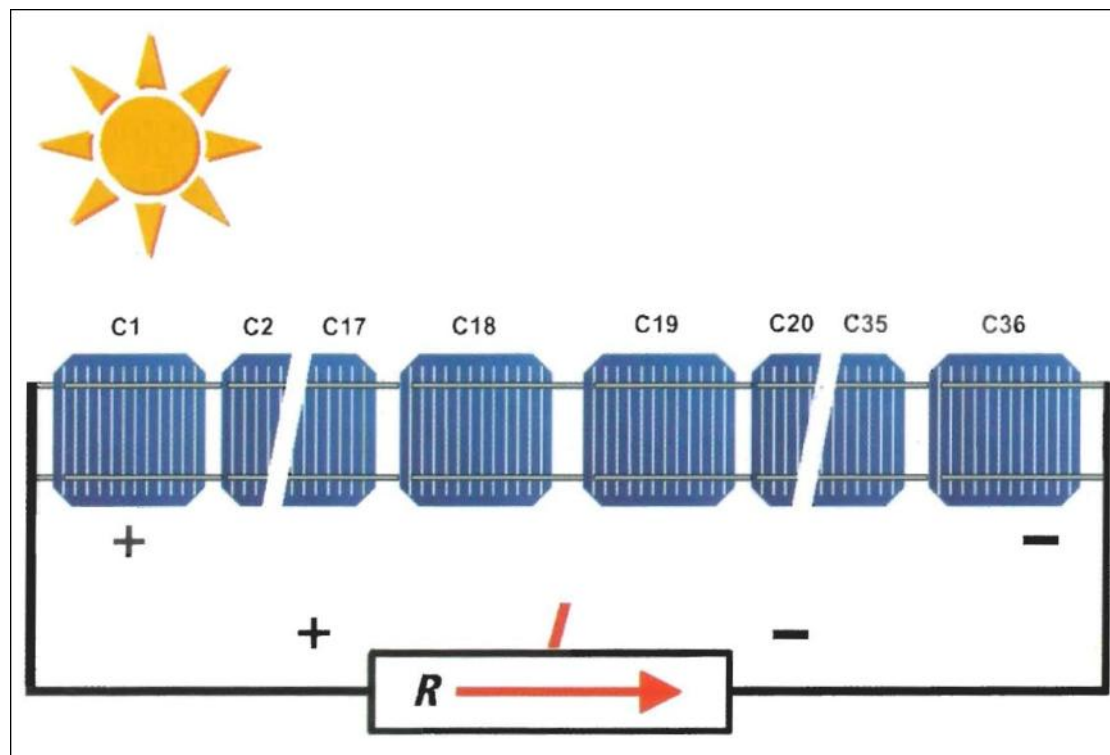
SCATOLA DI GIUNZIONE



IL MODULO FOTOVOLTAICO

DIODO DI BY PASS

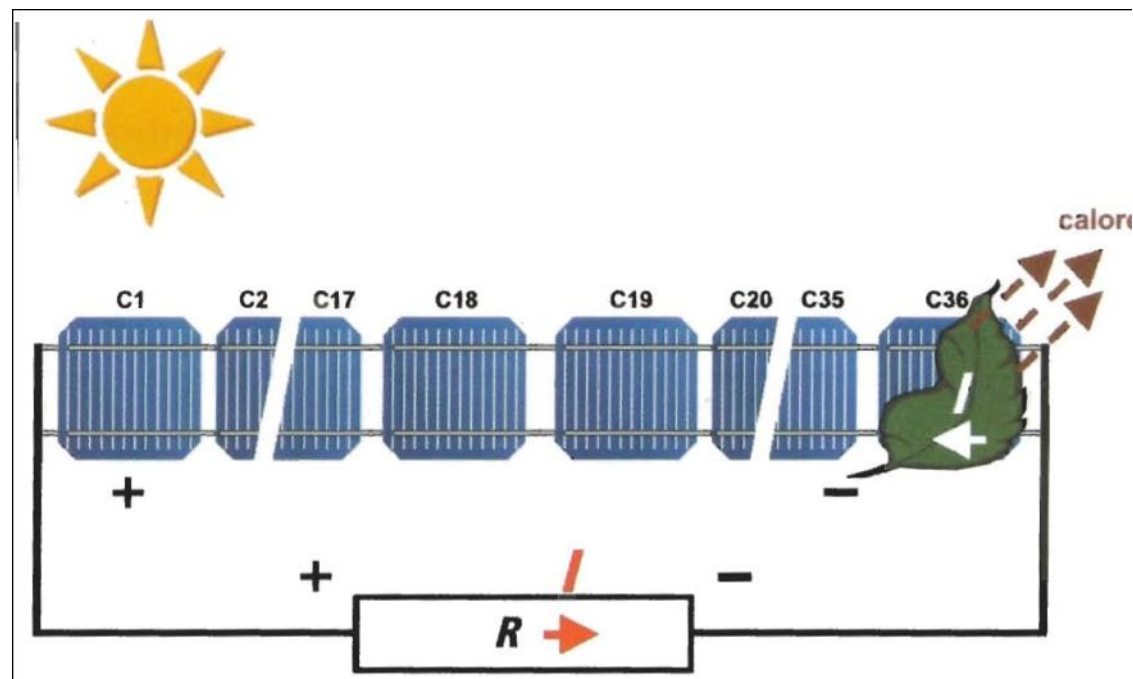
Nelle normali condizioni di funzionamento la corrente generata è assorbita dal carico.



IL MODULO FOTOVOLTAICO

DIODO DI BY PASS

Se una cella viene ombreggiata questa smette di generare corrente e diviene a sua volta un carico assorbendo la corrente generata dalle altre celle e riscaldandosi di conseguenza.

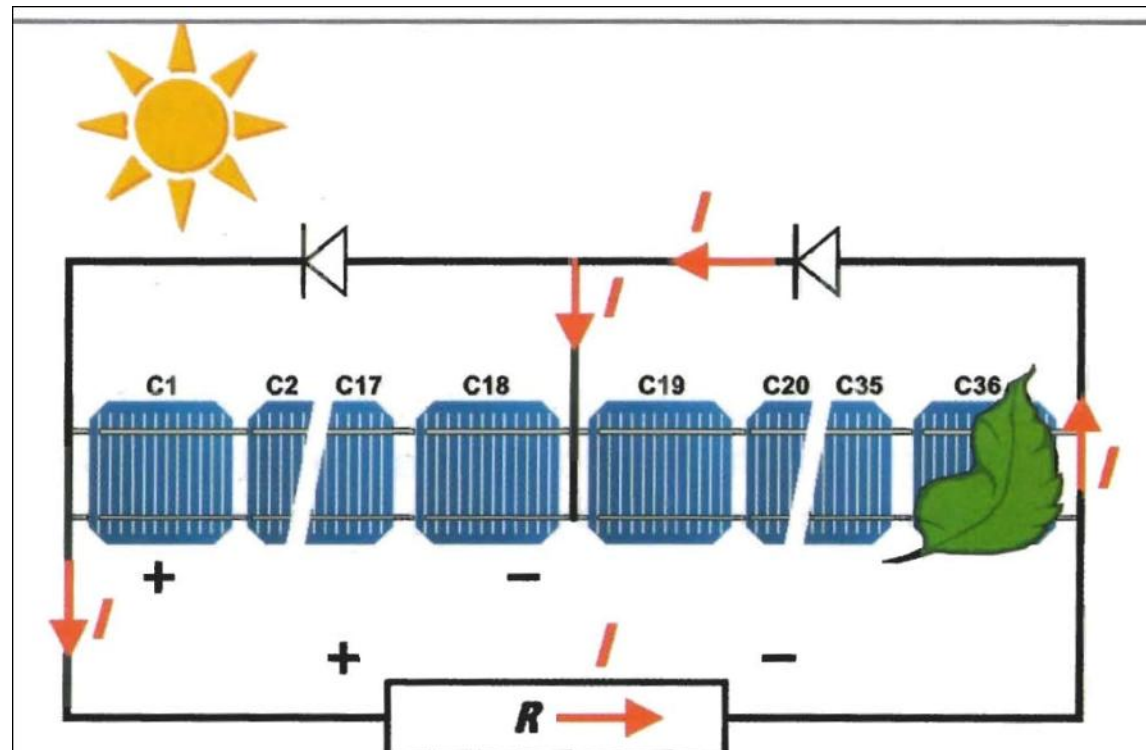


IL MODULO FOTOVOLTAICO

DIODO DI BY PASS

Per ostacolare il passaggio di corrente inversa attraverso la cella (**hot spot**) si collega un diodo di **by-pass** in parallelo alla cella stessa.

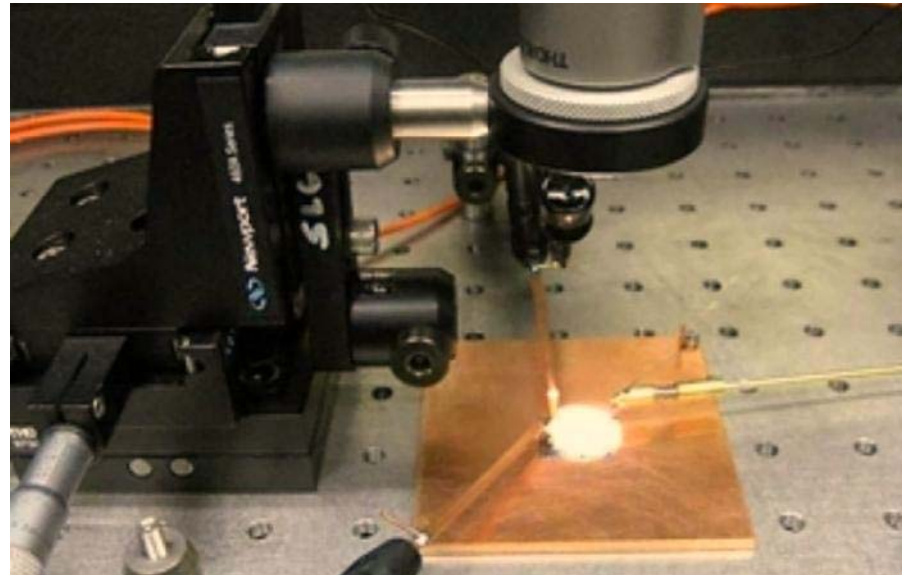
In teoria andrebbe previsto l'impiego di un diodo per ogni cella, tuttavia per semplificare il processo produttivo si è soliti usarne uno ogni 18 o 20 celle.



IL MODULO FOTOVOLTAICO

Test al simulatore solare

Il test si riferisce all'irraggiamento solare di riferimento (1000 W/m² e AM 1,5 con una particolare distribuzione spettrale) e alla temperatura di cella di 25° C. La cella deve essere elettricamente a circuito aperto e il modulo installato su un telaio in modo tale che in corrispondenza del mezzogiorno solare i raggi incidano normalmente sulla sua superficie esposta.

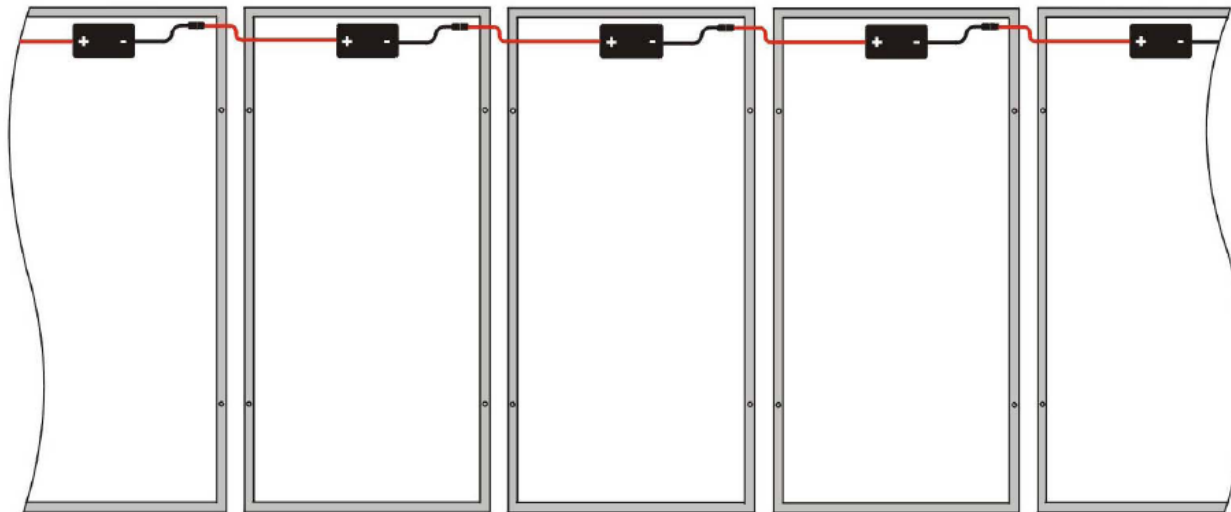


CABLAGGIO DI UNA STRINGA SISTEMA MULTICONTACT

MODULI AFFIANCATI AL LATO LUNGO

N.1 CAVO POSITIVO ROSSO DI LUNGHEZZA 60cm

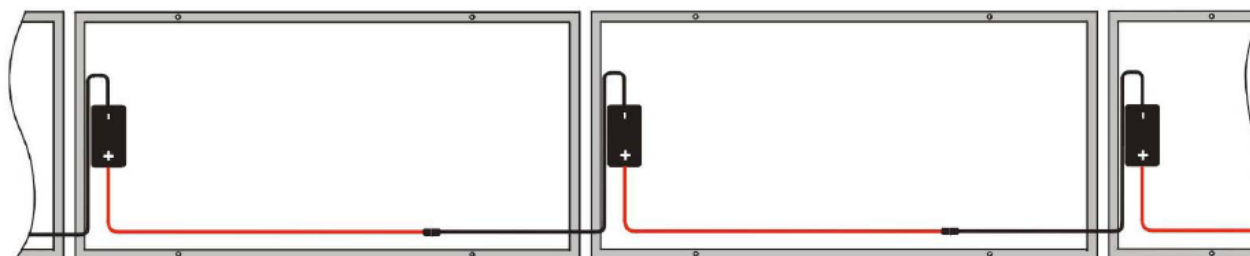
N.1 CAVO NEGATIVO NERO DI LUNGHEZZA 50cm



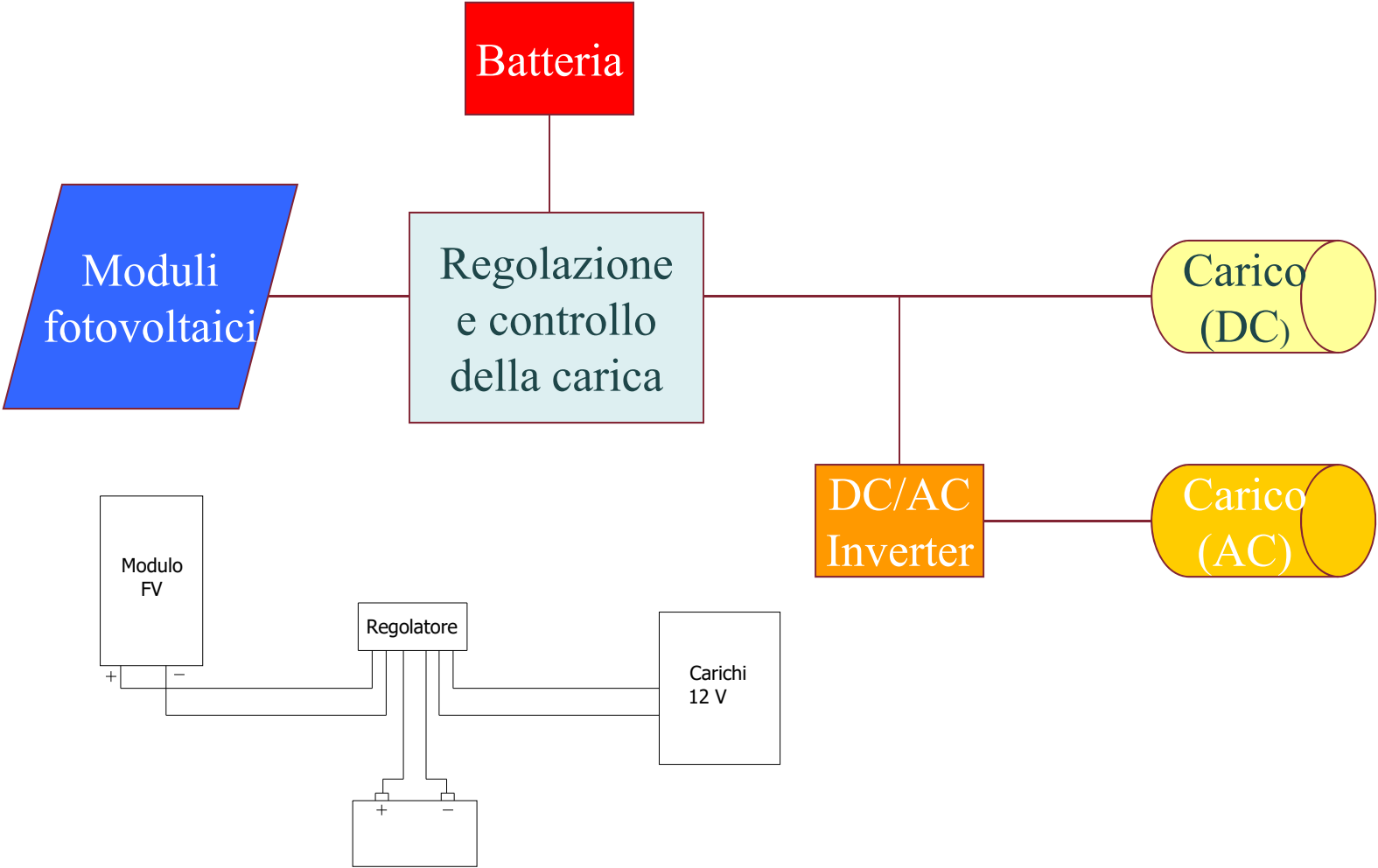
CABLAGGIO DI UNA STRINGA SISTEMA MULTICONTACT

MODULI AFFIANCATI AL LATO CORTO

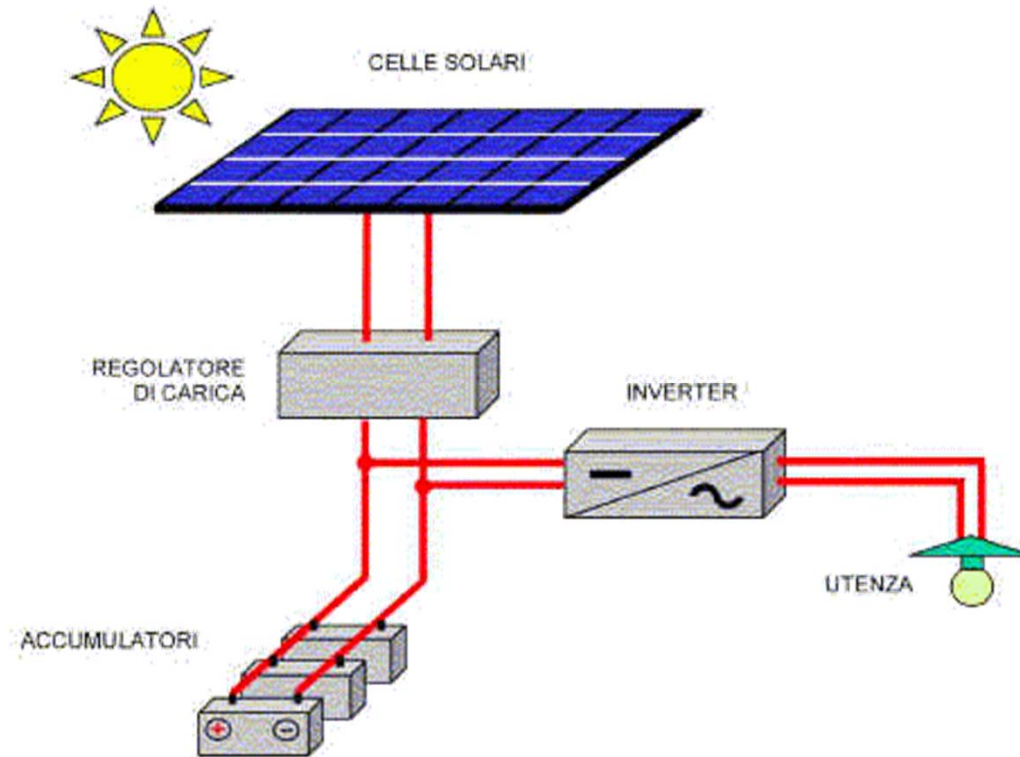
N.1 CAVO POSITIVO ROSSO DI LUNGHEZZA 155cm
N.1 CAVO NEGATIVO NERO DI LUNGHEZZA 145cm



TIPI DI IMPIANTO ISOLATI



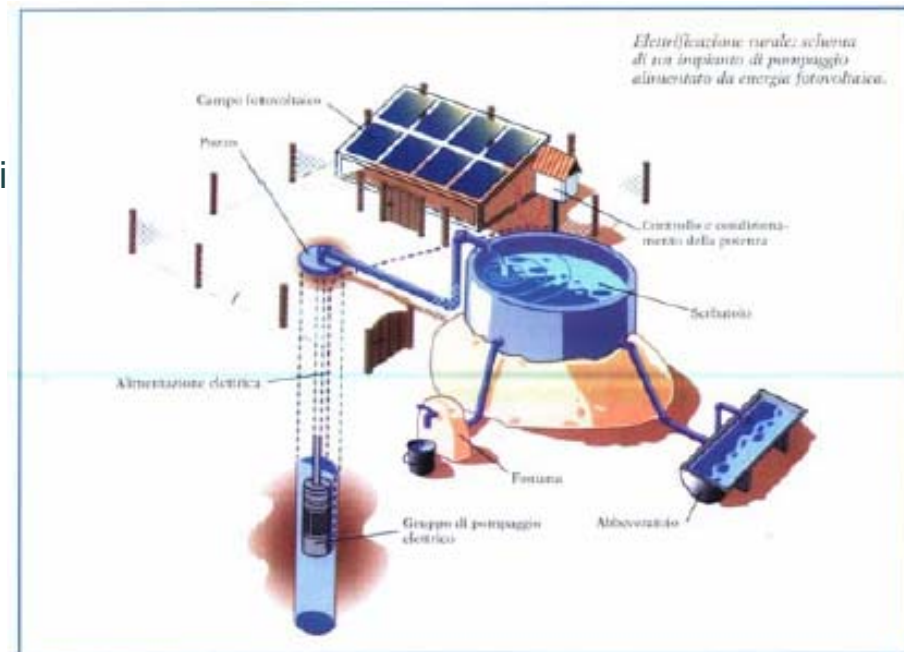
TIPI DI IMPIANTO ISOLATI



l'energia prodotta in eccedenza viene accumulata in batterie per essere utilizzata in caso di bassa insolazione o di buio.

TIPI DI IMPIANTO ISOLATI

- Telecomunicazioni e Monitoraggio ambientale
- Pompaggio acqua
- Case isolate, rifugi montani, piccoli villaggi
- Refrigerazione di alimenti e medicinali
- Illuminazione e sicurezza stradale
- Fari e segnalazioni marittime e aeroportuali
- Nautica, caravanning e tempo libero



TIPI DI IMPIANTO CONNESSI ALLA RETE

