

Suppl. 1

vol. 53
2012

GIORNALE DI FISICA

della
Società Italiana di Fisica

Serie Speciale L'ENERGIA NELLA SCUOLA
numero 4

FOTOVOLTAICO

A cura di Alessandro Saccà
e Monica Murano



Copyright © 2012, Società Italiana di Fisica

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo, elettronico, meccanico, per fotocopia o con altri procedimenti senza previa autorizzazione scritta dell'editore.

DOI 10.1393/gdf/i2012-10153-1

Produzione a cura dello Staff Editoriale della SIF

In copertina: Diverse immagini di pannelli solari, elaborazione grafica di Simona Oleandri

Pubblicato da
Società Italiana di Fisica
Via Saragozza 12, 40123 Bologna-Italy
<http://www.sif.it>

Proprietà Letteraria Riservata
Printed in Italy

SOMMARIO

PREMESSA	5
1. IL SOLE COME FONTE DI ENERGIA	7
1.1 Il Sole	7
Approfondimento: Da dove vengono i fotoni: le reazioni nucleari e la catena p-p	9
Approfondimento: Il corpo nero e la distribuzione di Planck	10
1.2 Lo spettro solare	13
1.3 Strumenti di misura della radiazione solare	21
2. L'EFFETTO FOTOVOLTAICO	23
2.1 Passato: un po' di storia	23
2.2 Presente: dentro una cella fotovoltaica	26
2.2.1 L'effetto fotovoltaico	26
Approfondimento: L'effetto fotoelettrico: l'esperimento di Lenard	27
Approfondimento: Struttura atomica e molecolare della materia	31
2.2.2 Funzionamento di una cella fotovoltaica	36
Approfondimento: La legge di Ohm	37
Approfondimento: Bandgap diretta ed indiretta	45
Approfondimento: Efficienza Quantica di una cella fotovoltaica	48
2.3 Futuro: tecnologie emergenti	50
2.3.1 Celle a film sottile	50
Approfondimento: Efficienza limite di una cella fotovoltaica	52
2.3.2 Fotovoltaico a concentrazione	56
2.3.3 Celle organiche	57
Approfondimento: Introduzione ai dispositivi fotonici	58
3. DALLA GIUNZIONE <i>p-n</i> ALL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO	61
3.1 Tecniche di produzione dei pannelli fotovoltaici	62
3.1.1 Purificazione del silicio e crescita dei cristalli	62
3.1.2 Introduzione alle tecniche di drogaggio delle celle solari	67
3.1.3 Dalla giunzione <i>p-n</i> al modulo fotovoltaico	69
Approfondimento: Tecniche di drogaggio dei semiconduttori	70
3.1.4 Come leggere il datasheet di un modulo fotovoltaico	72

Approfondimento: Circuito elettrico equivalente di una cella fotovoltaica	74
3.2 Impianti fotovoltaici	76
4. L'ENERGIA FOTOVOLTAICA E L'AMBIENTE	81
4.1 Energy PayBack Time	81
4.2 Dimensionamento di un impianto fotovoltaico di medie dimensioni	82
Appendice A: Quanto consuma?	89
Appendice B: Fattori di conversione e costanti fisiche	90
Appendice C: Inclinazione ed orientamento dei pannelli	92
Glossario	95

PREMESSA

La quantità di energia riversata annualmente dal Sole sulla Terra sotto forma di radiazione elettromagnetica è decisamente impressionante se confrontata con l'energia consumata in un anno per soddisfare i fabbisogni dell'uomo. A partire da questa osservazione, in questo fascicolo vengono presentati i concetti fondamentali utili a comprendere i vantaggi, gli svantaggi e i limiti dello sfruttamento della radiazione elettromagnetica proveniente dal Sole per mezzo dell'effetto fotovoltaico.

Questo fascicolo si compone di quattro capitoli, disposti con una logica *bottom-up*, al fine di presentare la tecnologia fotovoltaica dopo un percorso didattico che ne spieghi i principi fisici alla base: a partire dalle leggi fisiche che regolano il comportamento di una cella fotovoltaica si vuole fornire un quadro delle sue applicazioni per mezzo della realizzazione di impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica. Il discorso puramente fisico verrà accompagnato da considerazioni di carattere tecnologico ed ambientale, in modo che il lettore possa essere in grado di inquadrare questo importante argomento nel mondo reale.

Il primo capitolo è dedicato al Sole come fonte energetica. Nel secondo capitolo sono presentati i principi fisici per mezzo dei quali è possibile sfruttare tale energia, tramite l'effetto fotovoltaico, per la produzione di energia elettrica. Il terzo capitolo prosegue il discorso concluso al capitolo precedente, descrivendo le tecniche di produzione delle celle fotovoltaiche e la loro integrazione in impianti di piccole o grandi dimensioni. La questione del dimensionamento di un impianto fotovoltaico solleva il problema della distribuzione dell'energia elettrica in funzione del fabbisogno energetico delle diverse località (per mezzo di reti intelligenti, o *smart grids*) e dello stoccaggio dell'energia (*energy storage*). Questi importanti problemi non riguardano solo il fotovoltaico, ma anche altre fonti rinnovabili di energia. Per questo motivo questi importanti argomenti saranno trattati con maggior dettaglio in altri fascicoli della serie L'ENERGIA NELLA SCUOLA. In conclusione, il quarto capitolo è dedicato alla convenienza, in termini energetici, di produrre l'energia elettrica per mezzo dell'effetto fotovoltaico. Le appendici A e B, oltre a riportare i valori delle costanti fisiche utilizzate nel testo, occorrono per acquisire dimestichezza con le unità di misura dell'energia comunemente usate, mentre l'appendice C può tornare utile a chiunque voglia cimentarsi nel dimensionamento di un impianto fotovoltaico. Nel Glossario sono riportate le definizioni di termini tecnici, unità di misura, sigle e acronimi usati nel testo e di frequente impiego nella trattazione di problemi energetici.

Il testo è organizzato su due livelli di lettura:

- La parte più estesa, in carattere nero, illustra in modo elementare e didattico la materia trattata.
- Nella parte in carattere azzurro sono riportati, a beneficio dei lettori più curiosi, approfondimenti di alcuni argomenti specifici.

Il fascicolo contiene inoltre Esercizi che permettono di approfondire in modo quantitativo alcuni aspetti particolarmente importanti. Per una comprensione sufficientemente approfondita degli argomenti trattati si consiglia di prestare attenzione, anche solo con una lettura, agli esercizi proposti.

Gli autori ringraziano Enzo De Sanctis, Sandro Centro e Martina Varalta per la lettura critica del documento e per gli utili suggerimenti.

Alessandro Saccà
Monica Murano

1. IL SOLE COME FONTE DI ENERGIA

1.1 Il Sole

Il Sole produce una grandissima quantità di fotoni, distribuiti su di un ampio spettro di energie, per mezzo di reazioni nucleari, aventi come combustibile principale i nuclei degli atomi di idrogeno⁽¹⁾.

La radiazione elettromagnetica (figura 1) è un'entità particolare, tanto che per molti secoli non si è riusciti a trovare una sua descrizione univoca: a seconda del fenomeno fisico osservato essa mostra talvolta caratteristiche ondulatorie (onde elettromagnetiche) e talvolta corpuscolari (fotoni). Proprio per questa dualità onda-corpuscolo, ai fotoni sono associate delle quantità fisiche come una lunghezza d'onda (λ) e una frequenza (ν). Queste due quantità sono legate dalla relazione

$$(1) \quad v = \lambda\nu ,$$

dove v è la velocità di propagazione dei fotoni in un certo mezzo. Ad esempio tale velocità è la ben nota "velocità della luce nel vuoto" $c = 299792 \text{ km/s}$ se i fotoni si propagano in assenza di materia. L'energia trasportata da ciascun fotone è

$$(2) \quad E_\gamma = h\nu ,$$

dove h è un valore costante ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$) detto costante di Planck. Maggiore è la frequenza (minore la lunghezza d'onda), maggiore è l'energia associata al fotone: ad esempio, i raggi ultravioletti (U.V.) trasportano molta più energia dei raggi infrarossi (I.R.) (Tabella I).

Nel caso del Sole, i fotoni prodotti tramite le reazioni nucleari possono possedere, con diversa probabilità, ogni possibile energia. Poiché la radiazione elettromagnetica proveniente dal Sole è data dalla somma di tutte le possibili frequenze, essa prende anche il nome di *luce bianca*. La distribuzione del numero di fotoni emessi dal Sole al variare della frequenza (o dell'energia) si chiama *distribuzione di Planck* e la radiazione emessa da una tale sorgente si chiama *radiazione di corpo nero*. Lo spettro emesso dal Sole va dai raggi gamma alle onde

⁽¹⁾ L'energia prodotta dal Sole ogni anno sotto forma di radiazione elettromagnetica è $1,207 \cdot 10^{35} \text{ J}$.

radio, ma il 98% della radiazione solare è costituito da radiazioni di lunghezza d'onda compresa tra 0,25 e 3 μm (micrometro, $1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$). La luce che l'occhio umano è in grado di percepire appartiene all'intervallo di frequenze del visibile, che va dai 380 ai 780 nm (nanometri, $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$).

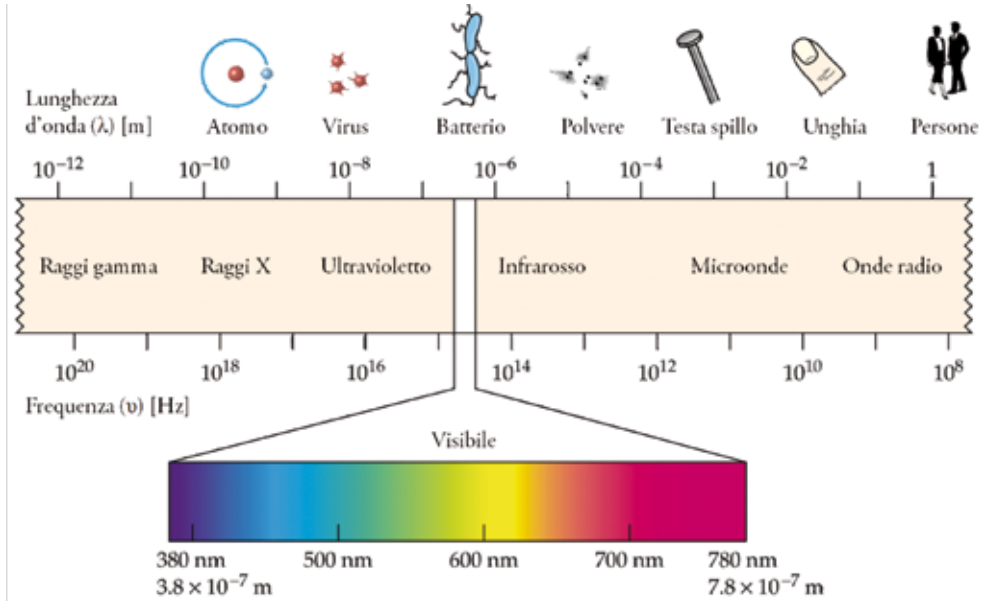


Fig. 1. – Schema della radiazione elettromagnetica, dalle onde più energetiche (raggi gamma) a quelle con lunghezza d'onda maggiore (onde radio). Come si può osservare la radiazione percepibile dall'occhio umano (visibile) consiste in una piccola parte dello spettro, precisamente da 380 a 780 nm.

Tabella I. – Tabella di conversione tra frequenza (ν), lunghezza d'onda (λ) ed energia (E_γ) di un fotone che si propaga nel vuoto. L'energia viene usualmente misurata in elettronVolt (eV), sapendo che $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$. I prefissi alle unità di misura utilizzati sono definiti in appendice B.

Tipo di radiazione e.m.	Frequenza ν	Lunghezza d'onda λ	Energia E_γ (eV)
Onde radio	≤ 3 GHz	≥ 10 cm	$\leq 1,2 \cdot 10^{-5}$
Microonde	3 GHz–300 GHz	10 cm–1 mm	$1,2 \cdot 10^{-5}$ – $1,2 \cdot 10^{-3}$
Infrarossi	300 GHz–428 THz	1 mm–700 nm	10^{-3} –1,7
Luce visibile	428 THz–749 THz	700 nm–400 nm	1,7–3
Ultravioletti	749 THz–30 PHz	400 nm–10 nm	3–120
Raggi X	30 PHz–300 EHz	10 nm–1 pm	120 – $1,2 \cdot 10^6$
Raggi gamma	≥ 300 EHz	≤ 1 pm	$\geq 1,2 \cdot 10^6$

APPROFONDIMENTO: Da dove vengono i fotoni – le reazioni nucleari e la catena p-p

Le condizioni fisiche interne al Sole (temperatura e pressione) sono tali da consentire ai nuclei degli atomi presenti di superare le loro forze coulombiane repulsive e di innescare dei fenomeni di fusione nucleare. Questi processi di produzione di energia sono in grado di sostenere il Sole dal collasso dovuto alla propria gravità. Il “carburante” grazie al quale queste reazioni di fusione nucleare avvengono sono i nuclei dell’atomo di idrogeno (${}^1_1\text{H}$)⁽²⁾ i quali possono innescare processi di fusione con differenti probabilità. Nelle stelle aventi una massa uguale o inferiore a quella del Sole esistono principalmente tre diverse *catene protone-protone*, aventi tutte il fine di produrre dei nuclei di atomi di elio (o particelle α – ${}^4_2\text{He}$). Quella mostrata in figura 2 è detta *catena protone-protone I* e, rispetto alle altre catene, ha l’86% di probabilità di avvenire, quindi è decisamente il processo di fusione nucleare più importante all’interno del Sole. Le *catene protone-protone II e III* hanno, rispettivamente, il 14% e lo 0,11% di probabilità di avvenire.

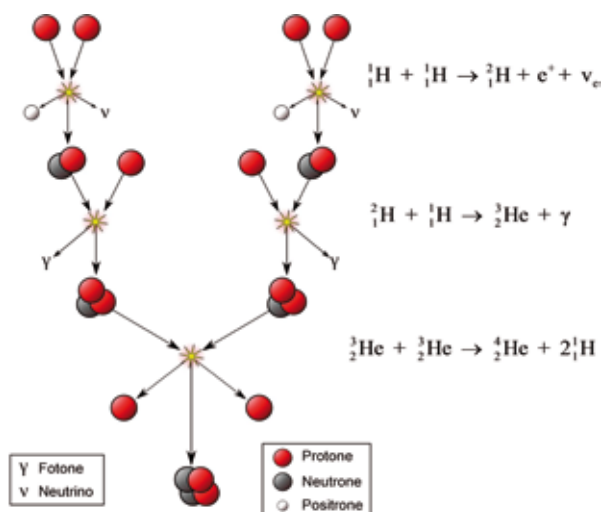


Fig. 2. – Schema della catena protone-protone I. In stelle aventi una massa comparabile con quella del Sole o inferiore, questa è la principale catena di reazioni nucleari che porta alla produzione di particelle α (fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Pp_chain).

Durante questi processi vengono prodotti fotoni (γ) i quali, vista l’alta densità del materiale nucleare, interagiscono quasi subito con la materia circostante (il cammino libero medio dei fotoni all’interno del Sole è di circa 1mm). Si innesca quindi una serie di urti che porterà i fotoni a lasciare il Sole e disperdersi nello spazio dopo circa 50 000 anni.

⁽²⁾ Ogni elemento presente in natura è univocamente individuato dal numero di protoni contenuti nel suo nucleo. Tale numero si indica con la lettera Z e prende il nome di *numero atomico*. La somma dei protoni e dei neutroni contenuti nel nucleo di un generico elemento si indica con la lettera A e prende il nome di *numero di massa*. È quindi possibile indicare il nuclide di un generico elemento X con il simbolo A_ZX .

APPROFONDIMENTO: Il corpo nero e la distribuzione di Planck

Un corpo nero è un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica su di esso incidente. Se tale corpo ha una temperatura diversa dallo zero assoluto è anche in grado di emettere fotoni con ogni possibile energia. Ogni corpo avente una certa temperatura $T \neq 0K$ è in grado di emettere fotoni e lo spettro di emissione può essere più o meno simile a quello di un corpo nero. Lo spettro cambia al variare della temperatura dell'oggetto. Ad esempio un metallo a temperatura ambiente non emette fotoni in modo evidente, ma se lo si scalda fino a farlo diventare incandescente, all'aumentare della temperatura lo si vede diventare inizialmente rosso, poi giallo, bianco e infine azzurro, blu e viola. Altri esempi di corpi neri sono le stelle e la *radiazione cosmica di fondo*; in particolare quest'ultima ha la distribuzione spettrale più simile a quella di un corpo nero ideale di ogni altro corpo presente in natura (figura 3).

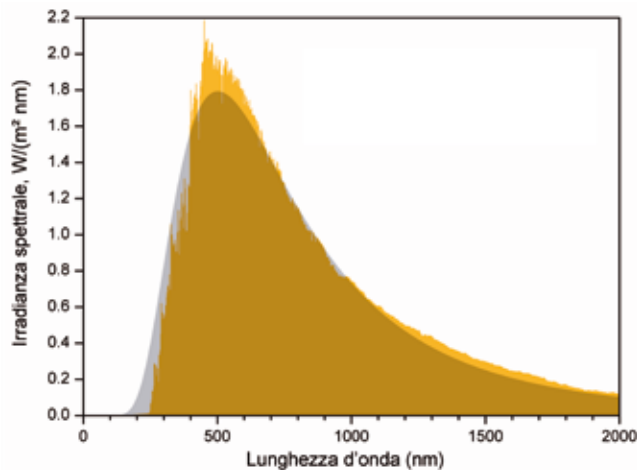


Fig. 3. – Confronto tra l'irradianza spettrale del Sole (giallo) e di un corpo nero (grigio) (fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>).

L'intensità della radiazione emessa da un corpo nero alla temperatura T è data dalla *distribuzione di Planck*

$$(3) \quad I(\nu, T)d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kt} - 1} d\nu ,$$

dove $I(\nu, T)d\nu$ è l'energia emessa per unità di tempo e di superficie nell'intervallo di frequenze compreso tra ν e $\nu + d\nu$. h è la costante di Planck, c la velocità della luce nel vuoto, ν la frequenza e T la temperatura assoluta del corpo nero.

Data l'equazione $I(\nu, T)$, l'integrale $\int_0^\infty I(\nu, T)d\nu$ fornisce la potenza totale emessa per unità di superficie del corpo nero, cioè l'intensità. La risoluzione di tale integrale dà l'equazione

$$(4) \quad I = \sigma T^4 ,$$

che è detta *legge di Stefan-Boltzmann*, con $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Esercizio 1: Costante solare

La potenza totale emessa dal Sole sotto forma di radiazione elettromagnetica è $P_{\text{Sole}} = 3,827 \cdot 10^{26}$ W. Sapendo che la distanza Sole-Terra è $d = 149,6 \cdot 10^6$ km, calcolare l'intensità (potenza per unità di superficie) della radiazione solare che incide ortogonalmente su una superficie unitaria posta appena al di fuori dell'atmosfera terrestre.

Svolgimento

Man mano che ci si allontana dal Sole, l'intensità della radiazione ricevuta diminuisce. Tale radiazione si distribuisce sulla superficie di una sfera avente, nel caso della Terra, un raggio d . L'intensità della radiazione che investe l'atmosfera terrestre è quindi:

$$I = \frac{P_{\text{Sole}}}{4\pi d^2} = \frac{3,827 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi (149,6 \cdot 10^9 \text{ m})^2} = 1361 \text{ W/m}^2.$$

Tale valore prende il nome di *costante solare*.

Esercizio 2: Temperatura effettiva del Sole

Sapendo che la superficie del Sole è $S = 6,09 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$ ricavare la sua temperatura effettiva.

Svolgimento

A partire dalla legge di Stefan-Boltzmann, la temperatura effettiva del Sole è

$$T = \left(\frac{I}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}},$$

dove I è l'intensità della radiazione emessa da un corpo nero alla temperatura T . Nel caso del Sole

$$I = \frac{P_{\text{Sole}}}{S} = \frac{3,827 \cdot 10^{26} \text{ W}}{6,09 \cdot 10^{18} \text{ m}^2} = 6,284 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2,$$

e quindi

$$T = \left(\frac{I}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{6,284 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2}{5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4} \right)^{\frac{1}{4}} = 5770 \text{ K}.$$

(Nota: in realtà la fotosfera solare ha delle temperature comprese tra 4400 K e 6600 K.)

Esercizio 3 (per i più bravi): Legge di Wien

Studiare la funzione (3) che descrive la distribuzione dello spettro elettromagnetico emesso da un corpo nero alla temperatura T usando come incognita la lunghezza d'onda λ . In particolare trovare la lunghezza d'onda (in funzione di T)

alla quale la funzione ha un massimo.

Svolgimento

Dall'equazione (1) $v = c/\lambda$, che lega la lunghezza d'onda λ alla frequenza v , segue:

$$dv = -\frac{c}{\lambda^2}d\lambda$$

e, sostituendo queste equazioni nella (3), si ottiene la funzione da studiare:

$$I(\lambda, T)d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda.$$

Si osserva che $\lim_{\lambda \rightarrow 0} I(\lambda, T) = 0 = \lim_{\lambda \rightarrow \pm\infty} I(\lambda, T)$ quindi la funzione è continua per ogni λ . La sua derivata prima è

$$\frac{dI}{d\lambda} = 2hc^2 \left(-\frac{5}{\lambda^6} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} + \frac{1}{\lambda^5} \frac{hc}{kT} \frac{\frac{1}{\lambda^2} e^{hc/\lambda kT}}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)^2} \right),$$

che posta uguale a zero richiede la risoluzione dell'equazione trascendente in λ

$$-5 + \frac{1}{\lambda} \frac{hc}{kT} \frac{e^{hc/\lambda kT}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = 0.$$

Dato che è richiesto di sapere il valore λ_{\max} che massimizza la distribuzione di Planck in funzione della temperatura, allora si pone $x = \lambda T$ e si risolve in funzione di x l'equazione trascendente

$$-5 + \frac{1}{x} \frac{hc}{k} \frac{e^{1hc/xk}}{e^{1hc/xk} - 1} = 0.$$

La soluzione di una tale equazione può essere ottenuta solo per via numerica; la soluzione approssimata è

$$(5) \quad \lambda_{\max} T = 0,0028978 \text{ m}\cdot\text{K}.$$

Questa equazione è detta *legge di Wien* e permette di conoscere a quale lunghezza d'onda un corpo nero a temperatura T emette il maggior numero di fotoni. Ad esempio un corpo nero avente una temperatura $T = 5770 \text{ K}$ come il Sole emette il maggior numero di fotoni a

$$\lambda_{\max} = \frac{0,0028978 \text{ m}\cdot\text{K}}{5770 \text{ K}} = 5,022 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 502,2 \text{ nm},$$

che sono fotoni corrispondenti al colore verde-azzurro. A causa di una serie di fattori, quali la forma dello spettro solare AM1 (vedi paragrafo seguente) e la sensibilità spettrale dell'occhio umano (particolarmente sensibile ai colori giallo-verde), il Sole ci appare di colore giallo.

1.2 Lo spettro solare

Il Sole scarica costantemente sull'atmosfera terrestre radiazione elettromagnetica con una potenza di $173,5 \cdot 10^{15}$ W, cioè riversa ogni anno un'energia pari a $1,52 \cdot 10^{18}$ kWh. Per comprendere l'enormità di questi numeri si pensi che nel 2008 l'energia elettrica prodotta nel mondo è stata⁽³⁾ $21,3 \cdot 10^{12}$ kWh. Una volta compreso che il Sole ci fornisce una grande quantità di energia, è fondamentale capire quanta di questa siamo in grado di raccogliere e in che forma di energia a noi utile siamo in grado di convertirla (figura 4).

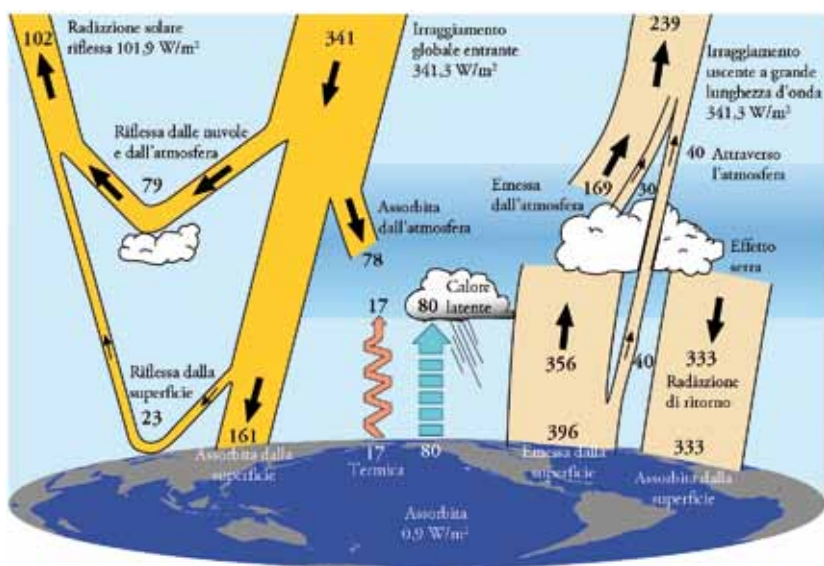


Fig. 4. – Schema dei flussi di energia elettromagnetica tra la Terra e lo spazio. L'irraggiamento solare medio della Terra, appena al di fuori dell'atmosfera, è di 341 W/m^2 . A causa dell'atmosfera, delle nubi e della riflessione da parte della superficie terrestre, l'irraggiamento medio del suolo è di 161 W/m^2 . Poiché la Terra possiede una certa temperatura media, precisamente $287,2 \text{ K}$, essa stessa emette della radiazione elettromagnetica. La radiazione emessa dalla Terra ha una grande lunghezza d'onda (quindi bassa energia) ma l'irraggiamento complessivo è molto consistente, precisamente 396 W/m^2 (fonte: J. T. Kiehl, K. E. Trenberth, J. T. Fasullo, *Earth's Annual Global mean Energy Budget*, American Metrological Society, 2009).

Una prima attenuazione della radiazione solare è dovuta all'atmosfera terrestre: maggiore è lo strato di atmosfera da attraversare e minore sarà la radiazione disponibile al suolo (vedi figura 5). A questo proposito viene definito il concetto di Air Mass (AM):

- AM0: spettro solare misurato appena al di fuori dell'atmosfera terrestre;
- AM1: spettro solare misurato con il Sole allo zenith, in una giornata con cielo limpido;
- AM1.5: spettro solare misurato con il Sole inclinato di $48,2^\circ$ rispetto alla direzione dello zenith, in una giornata con cielo limpido;
- AM2.0: come nel caso precedente ma con inclinazione di $60,1^\circ$.

⁽³⁾ Fonte: www.bp.com

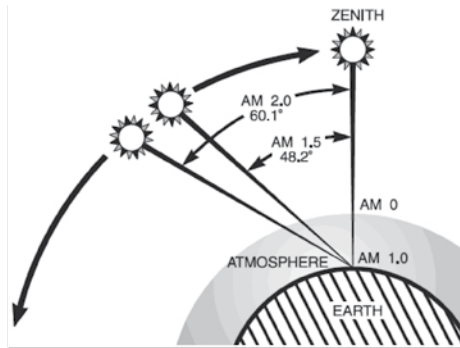


Fig. 5. – Definizione degli spettri solari Air Mass (AM) (fonte: <http://www.newport.com>).

La figura 6 mostra gli spettri solari AM0 e AM1.5. Da tale figura si osserva che le molecole presenti nell'atmosfera evidenziano la loro presenza assorbendo i fotoni aventi delle specifiche frequenze. A causa dell'atmosfera l'intensità della radiazione al suolo è minore della costante solare (1361 kW/m^2) e, sulla base dello spettro AM1, è circa⁽⁴⁾ 1100 kW/m^2 . In un giorno sereno circa il 44% dell'energia solare che raggiunge la superficie terrestre è dato dalle radiazioni luminose visibili, un altro 52% dall'infrarosso e il restante 4% dall'ultravioletto.

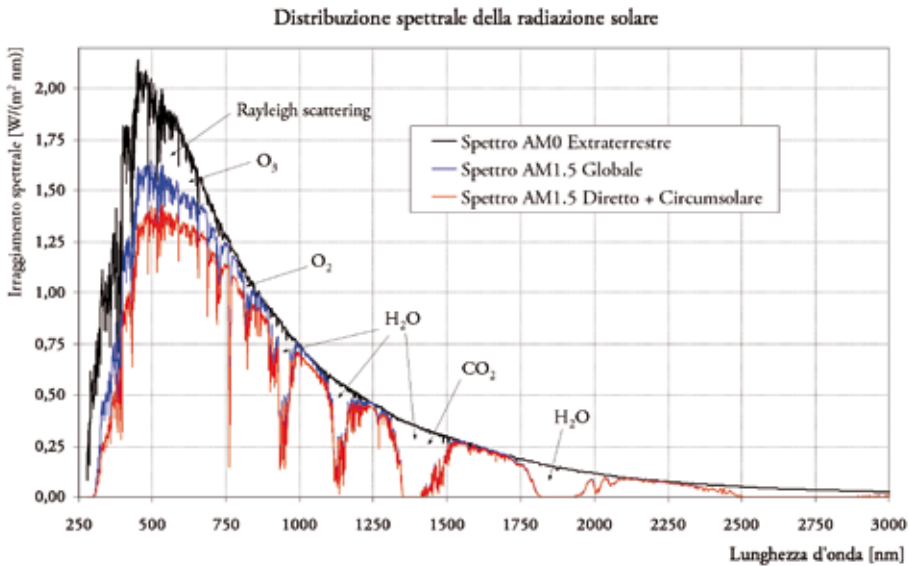


Fig. 6. – Spettri solari AM0, AM1.5 Globale e AM1.5 Diretto. Si può osservare che lo spettro AM0 ricalca abbastanza fedelmente lo spettro di un corpo nero. Una differenza evidente tra gli spettri AM0 e AM1.5 la si nota nell'intorno dei 500 nm (blu) ed è indicata in figura con la scritta *Rayleigh Scattering*, il fenomeno fisico che conferisce al cielo il suo caratteristico colore azzurro. Altre differenze apprezzabili le si osserva nella banda del vicino ultravioletto (250–400 nm), grazie alla fascia di ozono che ci preserva dai fotoni eccessivamente intensi e quindi nocivi per la nostra salute, e in alcune altre zone della banda del vicino infrarosso (750–2500 nm) (fonte: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/>).

⁽⁴⁾ Fonte: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/>

Oltre all'assorbimento dovuto all'atmosfera terrestre, un'ulteriore diminuzione della radiazione solare utile è dovuta all'inclinazione dei raggi solari rispetto alla superficie del dispositivo che li raccoglie. A questo proposito si osservi la figura 7. Immaginando la radiazione solare come un fluido che si riversa sulla superficie terrestre, un dispositivo fotovoltaico raccoglie il massimo della radiazione quando la normale alla sua superficie è parallela alla direzione di provenienza dei raggi solari, cioè quando l'angolo θ è nullo. Se il dispositivo ha una qualsiasi altra inclinazione, il "numero di raggi raccolti" sarà minore; precisamente il flusso della radiazione solare (cioè il numero di raggi raccolti) varia con il coseno dell'angolo θ .

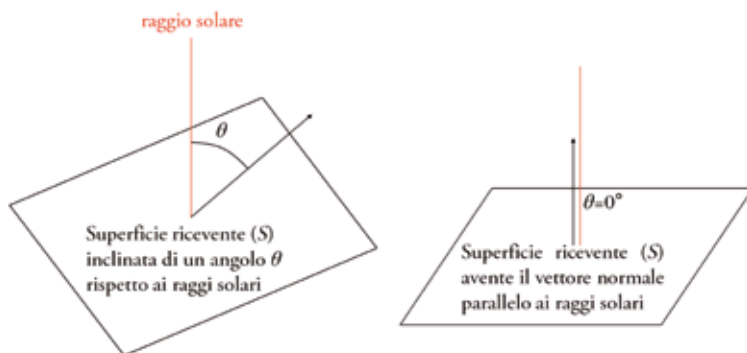


Fig. 7. – La quantità di radiazione solare incidente su di una superficie S dipende dal coseno dell'angolo θ di inclinazione tra la normale alla superficie (indicata in figura con un vettore) e la direzione di provenienza dei raggi solari. Indicando con I l'irraggiamento solare, la potenza raccolta dalla superficie è $I \cdot S \cdot \cos \theta$. Per maggiori approfondimenti si veda l'appendice C.

Un altro fattore importante consiste nel numero di ore di disponibilità della radiazione solare. Questo fattore dipende sia dalla latitudine che dalla "qualità" del cielo, cioè il numero di giornate con un cielo limpido nell'arco di un anno. Le zone più favorevoli dal punto di vista della latitudine sono quelle equatoriali, mentre quelle aventi un gran numero di giornate limpide sono i deserti e i luoghi di alta montagna.

Un ultimo fattore, d'importanza secondaria, è la distanza della Terra dal Sole. Nell'arco di un anno questi due corpi variano la loro distanza, e di conseguenza varia anche l'irraggiamento. Questo fenomeno provoca anche delle oscillazioni al valore della costante solare, la quale nell'arco di un anno può variare tra 1413 e 1321 W/m^2 .

In conclusione, con riferimento alla figura 4, l'irraggiamento medio dell'atmosfera terrestre è 341 W/m^2 mentre l'irraggiamento medio della superficie terrestre è 161 W/m^2 . Ciò significa che il 52% della radiazione incidente sull'atmosfera terrestre viene riflesso o assorbito dalle nubi.

Poiché l'atmosfera sovrastante una certa località, l'inclinazione dei dispositivi fotovoltaici e le ore di disponibilità della radiazione solare sono fattori che cambiano in base al luogo, è importante comprendere quali sono le zone più favorevoli allo sfruttamento della radiazione solare. La figura 8 rappresenta la quantità di energia raccolta da una superficie unitaria posta parallelamente al terreno nell'arco di un anno in diverse località, cioè l'energia dovuta all'irraggiamento globale orizzontale (GHI, Global Horizontal Irradiation) (vedi anche Tabelle II e III).

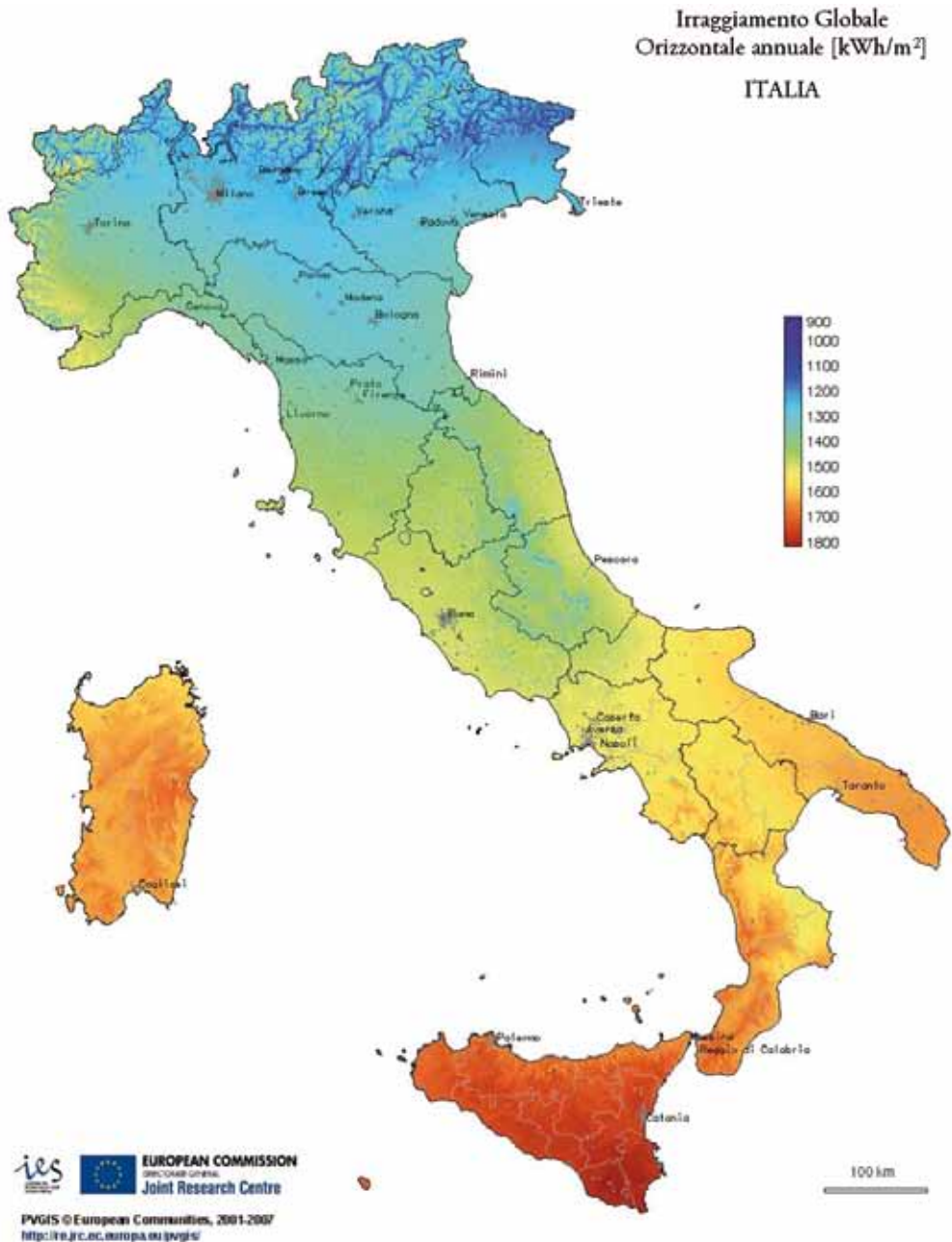


Fig. 8. – Energia (espressa in kWh) raccolta nell’arco di un anno da una superficie unitaria posta parallelamente al terreno.

Tabella II. – Radiazione solare annuale sul piano orizzontale (GHI) nelle Provincie Italiane
(in kWh/anno) (fonte: <http://www05.abb.com>).

Località	Radiazione solare media annuale (kWh/m ²)	Località	Radiazione solare media annuale (kWh/m ²)	Località	Radiazione solare media annuale (kWh/m ²)	Località	Radiazione solare media annuale (kWh/m ²)	Località	Radiazione solare media annuale (kWh/m ²)
Agrigento	1923	Catania	1829	Lecco	1271	Pesaro-Urbino	1411	La Spezia	1452
Alessandria	1275	Catanzaro	1663	Livorno	1511	Piacenza	1400	Taranto	1681
Ancona	1471	Chieti	1561	Lodi	1311	Pisa	1499	Teramo	1487
Aosta	1274	Como	1252	Lucca	1415	Pistoia	1308	Terni	1406
L'Aquila	1381	Cosenza	1852	Macerata	1499	Pordenone	1291	Torino	1339
Arezzo	1329	Cremona	1347	Mantova	1316	Potenza	1545	Trapani	1867
Ascoli Piceno	1471	Crotone	1679	Massa Carrara	1436	Prato	1350	Trento	1423
Asti	1300	Cuneo	1210	Matera	1584	Ragusa	1833	Treviso	1385
Avellino	1559	Enna	1850	Messina	1730	Ravenna	1411	Trieste	1325
Bari	1734	Ferrara	1368	Milano	1307	Reggio Calabria	1751	Udine	1272
Belluno	1282	Firenze	1475	Modena	1405	Reggio Emilia	1427	Varese	1287
Benevento	1510	Foggia	1630	Napoli	1645	Rieti	1366	Venezia	1473
Bergamo	1285	Forlì	1489	Novara	1327	Rimini	1455	Verbania	1326
Bologna	1420	Frosinone	1545	Nuoro	1655	Roma	1612	Vercelli	1327
Brescia	1371	Genova	1425	Oristano	1654	Rovigo	1415	Verona	1267
Brindisi	1558	Gorizia	1326	Padova	1266	Salerno	1419	Vicenza	1315
Bolzano	1329	Grosseto	1570	Palermo	1784	Sassari	1669	Viterbo	1468
Cagliari	1635	Imperia	1544	Pavia	1316	Savona	1384		
Caltanissetta	1831	Isernia	1464	Parma	1470	Siena	1400		
Campobasso	1597	Latina	1673	Pescara	1535	Siracusa	1870		
Caserta	1678	Lecce	1639	Perugia	1463	Sondrio	1442		

Tabella. III – Radiazione solare giornaliera sul piano orizzontale (GHI) in alcune città Italiane nei diversi mesi dell'anno (in kWh/anno) (fonte: <http://www05.abb.com>).

Località	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
Milano	1,44	2,25	3,78	4,81	5,67	6,28	6,31	5,36	3,97	2,67	1,64	1,19
Venezia	1,42	2,25	3,67	4,72	5,75	6,31	6,36	5,39	4,08	2,72	1,64	1,14
Bologna	1,50	2,28	3,81	4,81	5,86	6,42	6,47	5,47	4,19	2,81	1,72	1,25
Firenze	1,58	2,33	3,75	4,72	5,86	6,39	6,44	5,50	4,17	2,86	1,83	1,39
Roma	1,92	2,61	3,94	4,92	6,08	6,56	6,58	5,72	4,39	3,17	2,11	1,58
Napoli	1,92	2,67	3,92	5,03	6,08	6,64	6,58	5,81	4,50	3,28	2,17	1,69
Bari	1,86	2,58	3,97	5,08	6,08	6,69	6,64	5,81	4,53	3,25	2,08	1,69
Messina	2,11	2,94	4,19	5,19	6,22	6,69	6,67	5,89	4,64	3,53	2,36	1,94
Siracusa	2,36	3,22	4,33	5,39	6,36	6,78	6,75	6,00	4,81	3,69	2,58	2,17

Come si vedrà nel capitolo dedicato alle diverse tecnologie fotovoltaiche, esistono attualmente dispositivi in grado di raccogliere l'intera radiazione globale e dispositivi che sfruttano invece solo la radiazione diretta.

- Radiazione Globale Orizzontale (GHI, Global Horizontal Irradiation): è la radiazione ricevuta da una superficie parallela al terreno, in grado quindi di “vedere” l'intera semi-sfera celeste sopra di essa.
- Radiazione Diretta (DNI, Direct Normal Irradiation): è la radiazione ricevuta da un dispositivo capace di “vedere” solo il Sole e una porzione di cielo ad esso adiacente. Come sarà più chiaro nel paragrafo dedicato al fotovoltaico a concentrazione, tali dispositivi funzionano come dei telescopi e sono in grado di concentrare anche centinaia di volte la radiazione solare.
- Radiazione diffusa: è la differenza tra la radiazione globale e quella diretta, quindi è la radiazione diffusa dall'atmosfera e non proveniente direttamente dal Sole (figura 9).

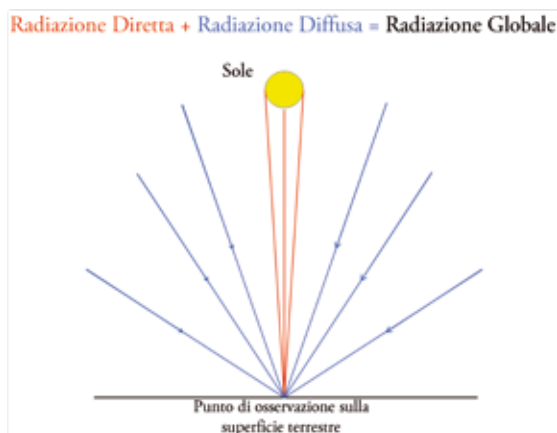


Fig. 9. – Rappresentazione dei raggi solari provenienti direttamente dal Sole (rossi) e diffusi dall'atmosfera (blu). La loro somma costituisce la Radiazione Globale.

Esercizio 4: Disponibilità energetica dal Sole

Sapendo che il valore della costante solare è 1361 W/m^2 , calcolare i valori di potenza ($P_T = 173,5 \cdot 10^{12} \text{ kW}$) ed energia ($E_T = 1,52 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$) menzionati all'inizio del paragrafo 1.2. Calcolare inoltre l'irraggiamento solare medio di 341 W/m^2 presentato in figura 4.

Svolgimento

Per calcolare il valore della potenza della radiazione solare incidente sull'atmosfera terrestre basta moltiplicare la costante solare per la sezione terrestre πR_T^2 , con $R_T = 6371,0 \text{ km}$ raggio terrestre medio:

$$P_T = 1361 \text{ W/m}^2 \cdot \pi \cdot (6371,0 \text{ km})^2 = 173,5 \cdot 10^{12} \text{ kW}.$$

L'energia annuale espressa in chilowattora non è altro che la potenza moltiplicata per il numero di ore in un anno

$$E_T = 173,5 \cdot 10^{12} \text{ kW} \cdot 24 \text{ h/giorno} \cdot 365 \text{ giorni} = 1,52 \cdot 10^{18} \text{ kWh}.$$

Riguardo all'irraggiamento solare medio della superficie terrestre, occorre tenere in conto che la potenza P_T incidente si ripartisce su una semisfera di raggio R_T e che ogni punto sulla superficie terrestre viene illuminato mediamente 12 ore al giorno nell'arco di un anno (ossia ha un numero di "ore luce" che è la metà del numero totale di ore in un anno). Pertanto si ottiene

$$\frac{173,5 \cdot 10^{15} \text{ W}}{2\pi(6371,0 \text{ km})^2} \frac{1}{2} = 340,3 \text{ W/m}^2.$$

Esercizio 5: Quanti pannelli fotovoltaici per l'Italia?

Sapendo che il consumo di energia elettrica dell'Italia è stato di 337601 GWh nel 2009⁽⁵⁾ e supponendo di avere a disposizione un dispositivo in grado di convertire in energia elettrica il 10% della radiazione incidente, valutare la superficie da ricoprire (pannelli posti orizzontalmente al terreno) con questi dispositivi nei pressi di Brescia o di Ragusa per soddisfare l'intero fabbisogno energetico italiano.

Svolgimento

Nel caso di Brescia: l'energia per unità di superficie raccolta in un anno da un pannello posto parallelamente al terreno è circa 1371 kWh/anno . La superficie

⁽⁵⁾ Fonte: www.terna.it

necessaria è quindi

$$S_{BS} = \frac{3,376 \cdot 10^{11} \text{ kWh/anno}}{10\% \cdot 1371 \text{ kWh/m}^2/\text{anno}} = 2,462 \cdot 10^9 \text{ m}^2 = 2462 \text{ km}^2 = (49,6 \times 49,6) \text{ km}^2.$$

Nel caso di Ragusa: l'energia per unità di superficie raccolta in un anno da un pannello posto parallelamente al terreno è circa 1833 kWh/anno. La superficie necessaria è quindi

$$S_{RG} = \frac{3,376 \cdot 10^{11} \text{ kWh/anno}}{10\% \cdot 1833 \text{ kWh/m}^2/\text{anno}} = 1,842 \cdot 10^9 \text{ m}^2 = 1842 \text{ km}^2 = (42,9 \times 42,9) \text{ km}^2,$$

ossia circa il 75% della superficie necessaria alla latitudine di Brescia.

Esercizio 6: Quanti pannelli fotovoltaici per una famiglia?

In Italia l'energia solare al suolo (stimata per superfici orizzontali) ha un valore medio di 1450 kWh/m² annuali. Considerando che una famiglia italiana di 4 persone consuma in media 4400 kWh l'anno, se un pannello fotovoltaico di un metro quadro di superficie riuscisse a convertire il 20% dell'energia solare in energia elettrica⁽⁶⁾, quanti pannelli solari occorrerebbero per soddisfare il fabbisogno energetico di tale famiglia?

Svolgimento

Il calcolo è immediato e si ottiene la superficie di pannelli fotovoltaici

$$S = \frac{4400 \text{ kWh}}{1450 \text{ kWh/m}^2 \cdot 0,20} = 15,2 \text{ m}^2.$$

Quindi, per una famiglia di 4 persone, sarebbero necessari circa 15 metri quadri di pannelli solari per soddisfare il proprio fabbisogno energetico (dal punto di vista elettrico). Chiaramente questa superficie raddoppia se i pannelli usati hanno un'efficienza del 10%.

È evidente che l'energia non viene prodotta con continuità, a causa dell'alternanza giorno/notte e della variabilità del tempo atmosferico.

⁽⁶⁾ Questo è un valore che si spera di ottenere per un pannello solare, posto in condizioni di lavoro, nel giro di pochi anni. Un valore verosimile di efficienza per un pannello commerciale di silicio multi cristallino in condizioni di lavoro è attualmente circa il 12–15%. Per maggiori dettagli si rimanda ai capitoli terzo e quarto.

1.3 Strumenti di misura della radiazione solare

Misurare la radiazione solare, per quel che riguarda gli interessi del fotovoltaico, significa stimare la quantità di energia, per unità di tempo e di superficie, che una certa località sulla superficie terrestre riceve. Una misura del genere può essere eseguita sfruttando l'effetto Seebeck (detto anche effetto termoelettrico): collegando due fili conduttori di materiali diversi, si genera una differenza di potenziale (d.d.p.) se tra la giunzione e le estremità libere dei fili esiste una differenza di temperatura ΔT . Se questa differenza di temperatura non è troppo elevata allora vale l'equazione

$$(6) \quad \Delta V = (S_2 - S_1)(T_2 - T_1),$$

con S_2 ed S_1 coefficienti di Seebeck dei due conduttori e con T_2 e T_1 temperature delle due estremità (figura 10). Nel caso in cui la differenza tra le temperature fosse elevata, inizierebbe a pesare anche la dipendenza dei coefficienti di Seebeck dalla temperatura. Essendo questo un discorso abbastanza tecnico e in questo contesto un po' marginale, si lascia al lettore curioso l'approfondimento di questo argomento.

Lo strumento che utilizza questo effetto termoelettrico per misurare la temperatura di un campione è noto come *termocoppia*. Essendo questo uno strumento poco sensibile, al posto di una singola termocoppia si utilizza una *termopila*, che non è altro che un collegamento in serie di n termocoppie. Il segnale che si ottiene, una volta diviso per n , possiede una sensibilità migliore rispetto a quella di una singola termocoppia.

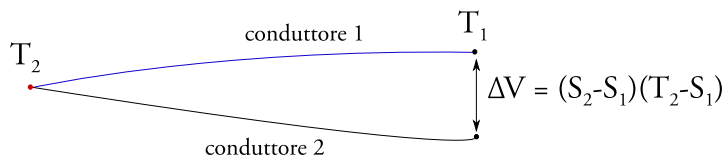


Fig. 10. – Schema di principio dell'effetto termoelettrico: due conduttori sono tra loro connessi ad una estremità, la quale è posta alla temperatura T_2 , mentre le altre due estremità, aventi temperatura T_1 , sono libere e non connesse. In questa situazione si genera una differenza di potenziale tra le estremità libere data dall'equazione in figura.

Gli strumenti in grado di misurare l'irraggiamento solare sono detti *solarimetri*. Il loro funzionamento si basa sull'utilizzo di una termopila, la quale ha lo scopo di raccogliere la radiazione solare entro uno spettro che sia il più ampio possibile. Scaldandosi, la termopila produce un segnale in tensione che viene convertito in un valore di irraggiamento.

A seconda che il solarimetro raccolga tutta la radiazione globale o solo quella diretta, si parla rispettivamente di *piranometro* o di *piroeliometro*. Una misura della radiazione riflessa (o radiazione d'albedo) può essere fatta usando un piranometro diretto verso il terreno. Tale strumento prende il nome di *albedometro* (figura 11).



Fig. 11. – Sulla sinistra: immagini di alcuni solarimetri. Trattansi in particolare di un piranometro (A), un piroeliometro (B) un albedometro accoppiato ad un piranometro (C). Sulla destra (D): immagine di una stazione per la misura delle diverse componenti (globale, diretta, diffusa e riflessa) della radiazione solare. La trave di colore nero ha la funzione di ombreggiare uno dei due piranometri, il quale ha quindi la funzione di misurare la radiazione diffusa (fonte: www.kippzonen.com).

Per effettuare una misura comprensiva di tutte le componenti della radiazione solare (globale, diretta, diffusa, riflessa) vengono utilizzate delle vere e proprie stazioni meteo dotate un certo numero di solarimetri. In figura 11, sulla destra, è riportata la foto di una di queste stazioni di monitoraggio e si può osservare che la misura della radiazione diffusa viene eseguita per mezzo di un solarimetro e di una sbarra atta a schermare la radiazione diretta, mentre sia il piranometro che il piroeliometro sono montati su di un sistema di inseguimento del Sole.

Un'altra utile misura riguarda la conoscenza dello spettro solare, quindi la misura dell'irraggiamento solare per unità di lunghezza d'onda. Questa misura può essere eseguita per mezzo di uno *spettro radiometro* e la risposta di questo strumento permette di ottenere dei grafici come quelli di figura 6. Questi grafici sono molto utili ai fini della conoscenza della variazione dello spettro solare in funzione della località; effettuando delle misure sistematiche in un certo luogo è possibile studiare la variazione giornaliera e stagionale della forma dello spettro solare. Come sarà evidente dopo aver affrontato il capitolo riguardante la fisica alla base del funzionamento di una cella solare, la forma dello spettro solare è un'informazione molto importante ai fini della calibrazione del tipo di cella solare da utilizzare in una certa località.

2. L'EFFETTO FOTOVOLTAICO

2.1 Passato: un po' di storia

Come ogni fenomeno fisico, l'effetto fotovoltaico fu scoperto, non inventato. Al contrario, con le celle fotovoltaiche, fu inventato un modo per sfruttarlo.

Ma procediamo con ordine, perché la storia dell'effetto fotovoltaico è strettamente collegata a quella dell'effetto fotoelettrico, ed entrambe dipendono dagli sviluppi sulla comprensione della natura della luce.

Nel 1600 gli scienziati dibattevano sulla natura della luce: ondulatoria o corpuscolare? Del "partito" ondulatorio era l'olandese Christiaan Huygens (1629-1695) che espose la sua teoria nel *Traité de la lumière* del 1690; del "partito" corpuscolare era invece l'inglese Isaac Newton (1642-1727) che nel suo *Opticks* del 1704 suggeriva che la luce fosse composta di minuscole particelle.

Passarono più di cent'anni e la disputa era ancora aperta. Vi furono alcuni riscontri sperimentali per la teoria ondulatoria, di cui ricordiamo ad esempio, le esperienze sull'interferenza luminosa compiute dall'inglese Thomas Young (1773-1829) nel 1803 e quelle sulla diffrazione della luce del fisico francese Augustin Fresnel (1788-1827) nel 1818: per interpretare teoricamente i due fenomeni era necessario che la luce avesse natura ondulatoria. Lo stesso valeva per molti studi nel campo dell'ottica degli stessi anni. Ciononostante, vi erano ancora molti scienziati a sostenere la "causa" della luce come fenomeno corpuscolare. E, tutto sommato, non si sbagliavano!

Andando avanti negli anni, anche ad alcuni scienziati che non si occupavano di studiare la luce capitò di imbattersi per caso in fenomeni ad essa collegati.

Nel 1839, il fisico francese Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891), appena diciannovenne, notò che il passaggio di corrente tra due elettrodi di platino all'interno di una cella elettrolitica aumentava se uno dei due elettrodi era esposto alla luce del Sole. Il giovane scienziato espose la sua scoperta all'Accademia delle Scienze di Parigi nella sua *Memoria sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari*. Becquerel fu anche il primo a rendersi conto che il fenomeno dipendeva dal colore (ossia dalla frequenza) della luce incidente.

Dopo di lui, fu la volta dell'italiano Antonio Pacinotti (1841-1912) che, sempre giovanissimo, illustrò ne *Il Nuovo Cimento* del 1863 i suoi studi sulle *Correnti elettriche generate*

dall'azione del calorico e della luce⁽⁷⁾, ponendosi molte domande chiave su quelle che lui chiamava “le proprietà chimiche della luce”. Erano passati 24 anni dalla scoperta di Becquerel ed il mistero non era ancora stato svelato.

A quel tempo, infatti, le conoscenze scientifiche non erano ancora sufficienti a spiegare il fenomeno, e la natura della luce non era ancora stata chiarita. Un contributo fondamentale in questo senso arrivò dallo scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879) che, nel 1865, introdusse le leggi fisiche secondo cui è possibile spiegare i fenomeni elettrici, quelli magnetici e quelli luminosi interpretandoli come un unico fenomeno: le onde elettromagnetiche. La correlazione esistente tra i fenomeni elettrici e quelli magnetici era già stata evidenziata da Hans Christian Ørsted (1777-1851) e da André-Marie Ampère (1775-1836) nel 1820 e poi da Michael Faraday (1791-1867) nel 1831, ma Maxwell, con il suo calcolo sulla velocità delle onde elettromagnetiche, che sostanzialmente coincideva con la velocità della luce, includeva quest'ultima tra i fenomeni elettromagnetici. Questo apparato teorico risultava sostanzialmente adatto a risolvere la più che centenaria disputa sulla natura della luce, ma non chiariva ancora tutti gli aspetti del problema. E comunque occorreva verificarlo!

Ma torniamo alle osservazioni sperimentali. Ci vollero ancora 10 anni dagli studi di Pacinotti per assistere ad un'altra scoperta interessante: nel 1873 l'ingegnere elettrico inglese Willoughby Smith (1828-1891), durante la posa in opera di un cavo nell'Oceano Atlantico si accorse che le barre di selenio (materiale semiconduttore) che utilizzava come dispositivi di controllo funzionavano bene di notte, ma fallivano di giorno. Egli verificò che il comportamento dipendeva esclusivamente dall'esposizione alla luce solare ed espose le sue teorie in un articolo⁽⁸⁾ pubblicato nello stesso anno.

Dopo la scoperta dell'ingegnere inglese, due scienziati suoi connazionali, il professor William Grylls Adams (1836-1915) e il suo allievo Richard Evans Day, si appassionarono alla questione e nel 1876 dimostrarono che illuminando una giunzione tra platino e selenio allo stato solido si generava un passaggio di corrente per effetto fotovoltaico, proprio come avviene oggi nelle celle solari, anche se con materiali differenti. Ricordiamo che Adams fu assistente di Maxwell prima di prendere il suo posto come professore al King's College di Londra, quindi non era estraneo alle nuove teorie sull'elettromagnetismo introdotte dal suo predecessore.

Pochi anni più tardi, nel 1883, l'inventore americano Charles Edgar Fritts (1850-1903) costruì quello che potremmo definire il primo pannello solare fotovoltaico: pose un sottile strato di selenio su una lastra metallica e coprì il tutto con una pellicola d'oro semitrasparente. La conversione della luce in elettricità avveniva con un'efficienza (rapporto tra elettricità prodotta e radiazione luminosa incidente) pari a circa l'1%, ma erano state gettate le basi per le future applicazioni tecnologiche.

Il problema continuava ad essere l'interpretazione teorica dell'effetto fotovoltaico: come sfruttare al meglio un fenomeno ancora misterioso?

Nel 1887 il fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), nel tentativo – peraltro riuscito – di verificare le teorie di Maxwell, osservò un fenomeno analogo a quello fotovol-

⁽⁷⁾ A. Pacinotti, *Correnti elettriche generate dall'azione del calorico e della luce*, Nuovo Cimento, 18, n. 1, 373-384 (1863).

⁽⁸⁾ W. Smith, *Effect of Light on Selenium during the passage of an Electric Current*, Nature, 7, 303 (1873).

taico: fu il primo ad osservare delle scintille in aria quando l'apparato sperimentale metallico era investito da radiazione ultravioletta. Di fatto, quella di Hertz fu la prima osservazione dell'effetto fotoelettrico. Come verrà spiegato a breve, nell'effetto fotoelettrico gli elettroni liberi lasciano la superficie del metallo, creando una scintilla, mentre nell'effetto fotovoltaico rimangono all'interno del materiale.

L'anno successivo, nel 1888, il fisico italiano Augusto Righi (1850-1920) studiava lo stesso fenomeno e per primo gli diede il nome di *effetto fotoelettrico*. Ciononostante, mancava ancora la giusta interpretazione teorica.

Un grande aiuto in questo senso giunse dal fisico inglese Joseph John Thomson (1856-1940), che nel 1897, studiando i raggi catodici, scoprì che questi erano formati da elettroni, particelle subatomiche di cui, fino a quel momento, si ignorava l'esistenza, il che impediva di comprendere a fondo i fenomeni elettromagnetici. La sua scoperta gli valse il Premio Nobel nel 1906 e permise di fare un altro passo verso la comprensione della vera natura della materia.

Un nuovo importante contributo giunse da un fisico tedesco, allievo di Hertz: Phillip von Lenard (1862-1947). Lenard nel 1900 si occupò di studiare approfonditamente i tubi catodici, che sfruttano proprio l'effetto fotoelettrico per il loro funzionamento. I suoi studi gli valsero il Premio Nobel nel 1905 e contribuirono a chiarire la natura del fenomeno: l'energia degli elettroni emessi dipende dalla frequenza dell'onda luminosa, il loro numero dall'intensità. Ma non era chiaro il motivo di queste relazioni.

Alla fine dello stesso anno, sempre nel 1900, il fisico tedesco Max Planck (1859-1947) asserì che l'energia elettromagnetica, e quindi quella luminosa, poteva avere solo valori discreti, detti *quanti* di energia, che corrispondono al prodotto di una costante universale h (definita appunto costante di Planck) per la frequenza dell'onda ν . Senza rendersene conto, egli gettò le basi per la futura meccanica quantistica, e questo gli valse il premio Nobel nel 1918.

Grazie agli esperimenti di Lenard e all'intuizione di Planck, Albert Einstein (1879-1955) poté finalmente svelare il mistero dell'effetto fotoelettrico interpretandolo correttamente nel 1905. Einstein sostenne che le onde elettromagnetiche fossero composte da quanti di luce, detti *fotoni*, e che ognuno di essi fosse portatore di un quanto di energia. Il che sostanzialmente dava ragione sia della teoria ondulatoria della luce, sia di quella corpuscolare, ponendo fine alla lunga disputa tra scienziati. Anche in questo caso, il brillante studioso meritò il Premio Nobel, che gli fu consegnato nel 1921.

In quegli anni si assisteva ad un enorme progresso scientifico e l'ultimo tassello per la piena comprensione dell'effetto fotovoltaico stava per essere inserito. Infatti, dopo una prima ipotesi sulla struttura atomica da parte di Thomson, nel 1913 il danese Niels Bohr (1885-1962) e il neozelandese Ernest Rutherford (1871-1937) elaborarono il modello atomico "planetario" in cui gli elettroni erano come pianeti in orbita attorno al nucleo, fisso nel centro. Questo modello poteva così spiegare perché il fenomeno della fotoelettricità era presente solo in alcuni materiali: gli elettroni con i legami più deboli, perché appartenenti alle orbite più esterne, venivano espulsi più facilmente e questo avveniva solo nei materiali con le caratteristiche atomiche dei conduttori o dei semiconduttori.

Ora che il fenomeno era stato chiarito, non restava che studiarne le applicazioni migliori.

Il primo a realizzare una vera e propria cella solare simile a quelle odierne fu l'inventore

americano Russel Ohl (1898-1987), che brevettò la prima cella basata sul contatto tra due semiconduttori di germanio nel 1946. Questo “contatto” prende il nome di *giunzione p-n*, e fu scoperto e studiato dallo stesso Ohl nel 1939. Lo osserveremo meglio quando affronteremo il funzionamento di una cella.

Dopo Ohl, altri americani proseguirono il suo lavoro: nel 1954 gli scienziati statunitensi Daryl Chapin (1906-1995), Calvin Fuller (1902-1994) e Gerald Pearson (1905-1987), dopo una fortuita scoperta di Pearson avvenuta l'anno precedente, realizzarono la prima cella solare al silicio in grado di raggiungere un'efficienza pari al 4%, sufficiente ad alimentare una piccola strumentazione elettrica. La cella fu chiamata “Batteria solare Bell” e la sua presentazione ai giornali ebbe un grande impatto sull'opinione pubblica. Tuttavia, i costi di produzione erano troppo elevati e l'unica richiesta commerciale arrivò dall'industria delle radio portatili e dei giocattoli, per i modellini delle navi.

Quattro anni più tardi, nel 1958, la prima cella fotovoltaica fu utilizzata per alimentare i dispositivi di comunicazione via radio a bordo del satellite americano Vanguard1 e da quel momento la tecnologia solare fu sempre utilizzata nei programmi spaziali delle diverse nazioni, prima per alimentare i sistemi di comunicazione, poi, a partire dal 1964, per alimentare tutte le apparecchiature elettroniche presenti a bordo dei satelliti. La tecnologia fotovoltaica, infatti, si dimostrava la più affidabile e la più duratura, con una necessità di manutenzione quasi inesistente e dimensioni ridotte.

Al contrario, per le applicazioni terrestri, il principale criterio commerciale era il costo, quindi la produzione del fotovoltaico su vasta scala restava ancora un miraggio fino a quando, nel 1970, l'americano Elliot Berman, finanziato dalla Exxon Corporation, progettò una cella solare dal costo di produzione notevolmente più basso delle precedenti celle aprendo di fatto il mercato energetico anche all'industria del fotovoltaico. Fatto che si rivelò vantaggioso in vista dell'imminente crisi petrolifera del 1973.

Dapprima, i pannelli solari furono impiegati come alimentatori per luci di emergenza, fari, illuminazione di passaggi al livello, poi, come ripetitori per segnali radio. Tutto questo in zone isolate e difficilmente raggiungibili, come in Australia, dove la densità di popolazione è così bassa da rendere necessari impianti di ripetizione anche in luoghi molto isolati. Ma già dalla metà degli anni '80 le celle solari erano diventate la fonte energetica maggiormente utilizzata per le reti remote di telecomunicazioni in tutto il mondo.

2.2 Presente: dentro una cella fotovoltaica

2.2.1 L'effetto fotovoltaico

Come è ormai chiaro dal paragrafo precedente, l'effetto fotoelettrico e l'effetto fotovoltaico hanno avuto una storia molto intrecciata. E non potrebbe essere altrimenti vista la natura dei due fenomeni.

L'effetto fotoelettrico consiste nell'emissione di elettroni da parte di un materiale sottoposto a radiazione elettromagnetica avente una certa frequenza. La figura 12 mostra un apparato sperimentale adatto all'osservazione dell'effetto. Due elettrodi, chiamati catodo e

anodo, sono posti in un contenitore sotto vuoto. Il catodo è irraggiato con delle onde elettromagnetiche aventi una certa frequenza (ν) e una certa intensità (I). Dalla sua superficie vengono emessi degli elettroni che possono essere raccolti dall'anodo per creare una corrente i all'interno del circuito. Il potenziale elettrico esterno V_{ext} occorre per controllare la tensione tra anodo e catodo e quindi il numero di elettroni che, dopo essere stati emessi dal catodo, raggiungono effettivamente l'anodo. Anche nel caso dell'effetto fotovoltaico un fotone avente una sufficiente energia riesce ad interagire con un elettrone rendendolo "libero". La più evidente differenza tra i due fenomeni è che nel caso dell'effetto fotoelettrico l'elettrone viene estratto dal materiale, mentre nel caso dell'effetto fotovoltaico l'elettrone vi rimane confinato, anche se non più soggetto all'interazione coulombiana con il nucleo dal quale è stato estratto. In questo secondo caso l'elettrone libero può facilmente fluire all'interno del materiale e se si orienta il flusso di questi elettroni è possibile generare una corrente elettrica.

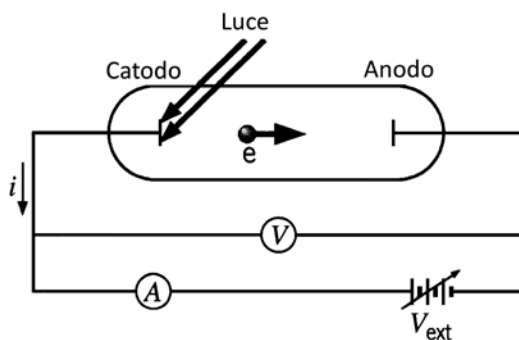


Fig. 12. – Apparato sperimentale adatto all'osservazione dell'effetto fotoelettrico. La radiazione elettromagnetica incidente su di un catodo può essere in grado di strappare degli elettroni che, raccolti da un anodo, generano una corrente i nel circuito, misurabile per mezzo dell'amperometro A. La tensione ai capi dei due elettrodi è invece misurata tramite il voltmetro V. Il potenziale elettrico V_{ext} occorre per controllare il numero di elettroni che fluiscono tra il catodo e l'anodo (figura ripresa da K. S. Krane, *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley & Sons, 1987).

APPROFONDIMENTO: L'effetto fotoelettrico: l'esperimento di Lenard

Nel 1900 il fisico tedesco Phillip von Lenard eseguì l'esperimento schematizzato in figura 12. Egli si accorse che irraggiando una superficie metallizzata, il catodo in figura, con delle onde elettromagnetiche, nel circuito iniziava a circolare una corrente i .

Detta V_{AC} la differenza di potenziale tra catodo e anodo, Lenard osservò che solo da un certo potenziale in poi (detto *potenziale d'arresto*), indipendente dall'intensità della radiazione, la corrente iniziava a circolare, aumentando fino a raggiungere un valore massimo. Lenard osservò inoltre che tale valore massimo della corrente fotogenerata è direttamente proporzionale all'intensità della luce incidente (vedi figura 13). La spiegazione di queste osservazioni fu fornita qualche anno più tardi da Einstein. L'idea chiave della spiegazione consiste nell'attribuire a ciascun fotone un'energia proporzionale alla sua frequenza e sup-

porre che gli elettroni possano essere estratti solo per valori discreti dell'energia. Analizzando il sistema da un punto di vista energetico si può riassumere il fenomeno come segue. Un fotone avente l'energia ν interagisce con un elettrone del catodo; affinché quest'ultimo venga liberato dal suo legame con il nucleo, al fotone è richiesta una certa energia, detta *lavoro di estrazione*. L'energia in eccesso del fotone incidente viene ceduta all'elettrone estratto sotto forma di energia cinetica, quindi

$$(7) \quad E_{\text{cin}} = E_{\text{fotone}} - \text{Lavoro}_{\text{estrazione}} = h\nu - h\nu_0 ,$$

dove $E_{\text{cin}} = 1/2 m v^2$ è l'energia cinetica dell'elettrone nel momento in cui viene estratto e $h\nu_0$ è il lavoro di estrazione. Affinché un elettrone possa essere estratto occorre che la sua energia cinetica sia maggiore di zero, e quindi che l'energia del fotone sia maggiore del lavoro di estrazione. Poiché gli elettroni estratti dal catodo vengono emessi in tutte le direzioni, un potenziale esterno V_{ext} orientato correttamente dirige gli elettroni verso l'anodo, aumentando la corrente i fino ad un valore massimo. Se il potenziale esterno si oppone al moto degli elettroni verso l'anodo, la corrente i diminuisce. Si definisce *potenziale di arresto* il potenziale esterno al quale, fissata una certa frequenza della radiazione incidente sul catodo, la corrente i è sempre nulla, indipendentemente dall'intensità della radiazione. Classicamente ci si aspetterebbe che il potenziale di arresto sia proporzionale all'intensità della radiazione invece che al tipo di materiale o dalla frequenza della radiazione incidente; ciò che sperimentalmente si trova è quanto illustrato in figura 13: la curva rossa si riferisce ad un materiale irraggiato con radiazione avente una certa frequenza, mentre la curva blu si riferisce allo stesso materiale irraggiato con radiazione di pari intensità ma minore frequenza. Anche questa osservazione trova una spiegazione grazie alla quantizzazione dell'energia. L'estrazione di un elettrone dipende dall'energia che il fotone incidente possiede, quindi dalla sua frequenza: maggiore sarà l'energia di un fotone, maggiore sarà la probabilità che l'elettrone estratto generi una corrente. Aumentando l'intensità della radiazione si aumenta il numero di fotoni incidenti e non la loro energia. Se un fotone avente una certa energia non è in grado di estrarre un elettrone e di fornirgli sufficiente energia per generare una corrente elettrica non riuscirà in questo intento nemmeno un numero a piacere di fotoni dotati della stessa energia del primo.

Tornando a ragionare in termini di bilancio energetico, una volta estratto dal catodo, un elettrone possiede inizialmente un'energia cinetica E_C . Tale energia cinetica può essere aumentata o diminuita (fino ad essere eventualmente azzerata) da un potenziale esterno V_{ext} , che non è altro che la differenza di potenziale V_{AC} tra anodo e catodo, che compie lavoro sull'elettrone facendogli raggiungere l'anodo con un'energia cinetica E_A . Il bilancio energetico complessivo è

$$(8) \quad E_C = E_A - qV_{AC} ,$$

con q carica elementare ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C). Si osserva che il potenziale esterno V_{AC} può essere regolato in modo che l'elettrone arrivi ad incidere sulla superficie dell'anodo con energia cinetica nulla, cioè $E_A = 0$ J. Tale condizione si verifica quando

$$(9) \quad E_C = -qV_{AC} ,$$

quindi quando il potenziale elettrico $V_{AC} < 0$ (poiché E_C è sempre maggiore di zero) e compie un lavoro negativo sull'elettrone estratto, rallentandolo fino a fargli perdere tutta la sua energia cinetica. Tale potenziale è detto potenziale d'arresto.

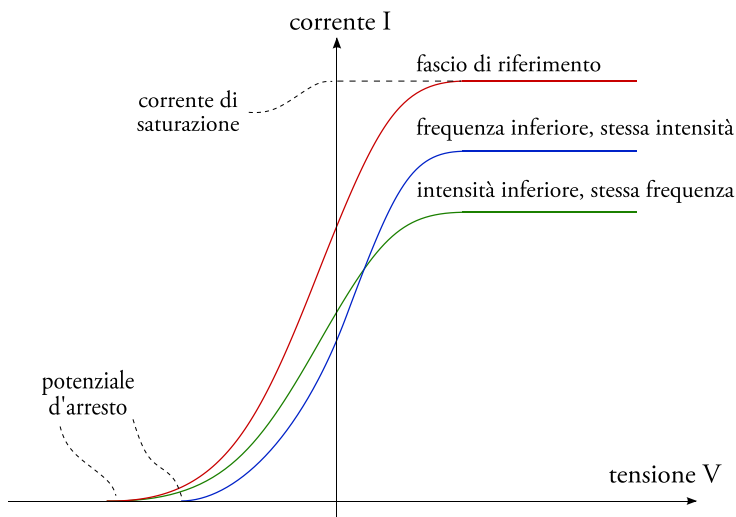


Fig. 13. – Uno degli imprevedibili fenomeni della meccanica quantistica: il valore del potenziale d'arresto dipende dal tipo di materiale testato e dalla frequenza della radiazione incidente (cioè dalla sua energia) e non dalla sua intensità (cioè dal numero di fotoni incidenti).

Esercizio 7: L'effetto fotoelettrico (problema proposto alle Olimpiadi della fisica 1988, fase regionale)

Un fascio di radiazione ultravioletta colpisce il catodo di una cella fotoelettrica; la lunghezza d'onda del fascio è $\lambda = 3,00 \cdot 10^{-7}$ m. La tensione V_{AC} , tra anodo e catodo, può essere variata, e si osserva che il potenziale di arresto vale $V_0 = -0,40$ V.

1. Determinare il lavoro di estrazione del metallo e calcolare la lunghezza d'onda della soglia fotoelettrica.
2. Stabilendo una tensione $V_{AC} = 80$ V si rivela una corrente anodica di saturazione $i = 5,0 \cdot 10^{-8}$ A. Si calcoli, in queste condizioni, la massima velocità di elettrone che raggiunge l'anodo.
3. Sapendo che solo 8 fotoni su 10^4 danno luogo all'estrazione di un elettrone dal metallo, si determini l'energia della radiazione che giunge in un secondo sulla superficie del metallo.

Svolgimento

1. Sapendo il potenziale d'arresto, l'equazione (9) permette di calcolare l'energia cinetica dell'elettrone al momento dell'estrazione. Ricordando poi l'equazione (7) è possibile scrivere

$$E_C = -qV_0 = h\nu - h\nu_0 .$$

Il lavoro di estrazione vale quindi

$$\begin{aligned} h\nu_0 = h\nu + qV_0 &= 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^{-7} \text{ m}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} \cdot 0,4 \text{ V} = \\ &= 5,99 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,74 \text{ eV} . \end{aligned}$$

2. Noto a questo punto che l'energia cinetica degli elettroni appena estratti dal catodo è $E_C = h\nu - h\nu_0 = 0,4 \text{ eV}$, l'energia cinetica di un elettrone che raggiunge l'anodo è data dall'equazione (8):

$$E_A = E_C + qV_{AC} = (0,4 + 80) \text{ eV} = 80,4 \text{ eV} = 1,29 \cdot 10^{-17} \text{ J} .$$

La velocità dell'elettrone nel momento in cui raggiunge l'anodo è

$$v_A = \sqrt{\frac{2E_A}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,29 \cdot 10^{-17} \text{ J}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 5,32 \cdot 10^6 \text{ m/s} .$$

3. La corrente elettrica esprime il numero di cariche elementari che passano da un certo punto del circuito nell'unità di tempo, quindi $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Nq}{\Delta t}$. Sapendo il valore della corrente, il numero di cariche elettriche che in un secondo passano da un certo punto del circuito è

$$N = \frac{i}{q} \Delta t = \frac{5 \cdot 10^{-8} \text{ A}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \cdot 1 \text{ s} = 3,13 \cdot 10^{11} .$$

Poiché solo 8 fotoni su 10^4 danno luogo all'estrazione di un elettrone dal metallo, il numero di fotoni incidenti è $N \frac{10^4}{8}$. Moltiplicando questo valore per l'energia di un fotone risulta un'energia totale di $E_{\text{tot}} = N \frac{10^4}{8} \cdot h\nu = 2,59 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ ogni secondo, quindi la radiazione agisce sul metallo con una potenza $P = 2,59 \cdot 10^{-4} \text{ W}$.

In base al loro comportamento elettrico i materiali si dividono in tre categorie: gli isolanti, i conduttori e i semiconduttori (figura 14).

I materiali isolanti sono quelli nei quali gli elettroni non sono liberi di muoversi, il che impedisce il passaggio di corrente elettrica. Sono isolanti, ad esempio, il vetro e la plastica.

I conduttori sono i materiali nei quali, al contrario, la libertà di movimento degli elettroni consente il passaggio della corrente. I metalli sono in genere dei buoni conduttori elettrici.

I materiali semiconduttori, infine, hanno caratteristiche intermedie tra isolanti e conduttori: si comportano da isolanti a temperature prossime allo zero assoluto (0 K, ossia $-273 \text{ }^\circ\text{C}$), mentre a temperatura ambiente il loro comportamento elettrico è simile a quello dei conduttori. Con una differenza: nei conduttori l'aumento di temperatura limita il pas-

saggio della corrente elettrica; viceversa, nei semiconduttori lo favorisce. Sono semiconduttori, ad esempio, il silicio (Si), il germanio (Ge) e l'arseniuro di gallio (GaAs).

Ma andiamo un po' più a fondo. L'effetto fotovoltaico avviene quando un elettrone, detto *elettrone di valenza*, interagisce con un fotone la cui energia gli permette di liberarsi, diventando così un elettrone in grado di condurre la corrente elettrica, quindi un *elettrone di conduzione*. Si dice che gli elettroni di valenza appartengono alla *banda di valenza* e quelli di conduzione alla *banda di conduzione*. Le bande sono gli intervalli di energia che caratterizzano gli elettroni.

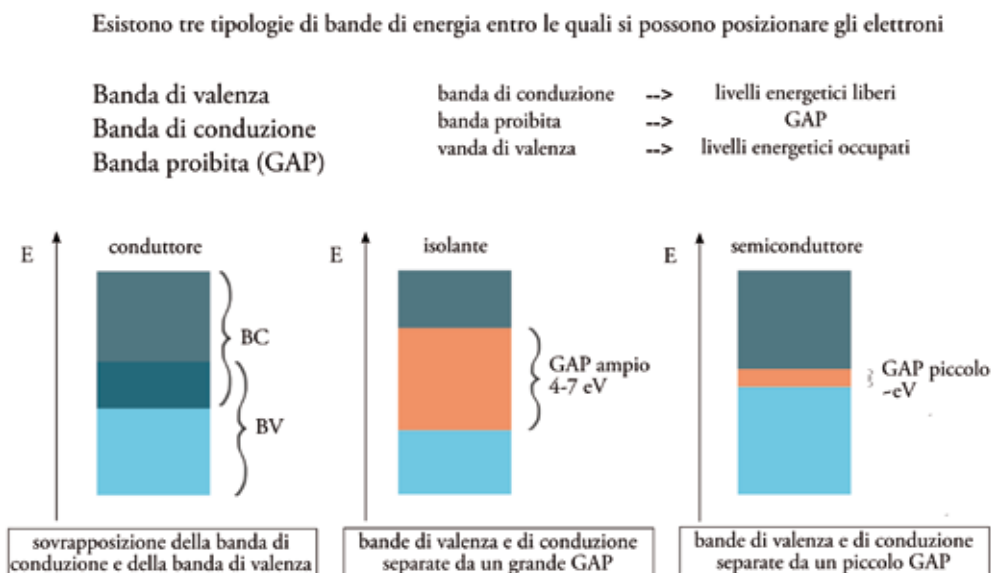


Fig. 14. – Distinzione dei materiali in tre classi a seconda delle loro proprietà elettriche. A seconda della distanza tra la banda di valenza e quella di conduzione i materiali possono essere isolanti (GAP > 4 eV), semiconduttori (GAP ~ 1 eV) o conduttori (le bande di valenza e di conduzione sono sovrapposte).

APPROFONDIMENTO: Struttura atomica e molecolare della materia⁽⁹⁾

Per poter comprendere meglio i fenomeni elettrici è opportuno richiamare, sebbene in maniera schematica e elementare, alcune nozioni sulla struttura atomica e molecolare della materia. Come abbiamo detto nel primo fascicolo di questa serie, tutti gli atomi sono formati da un nucleo centrale circondato da elettroni. Questi sono particelle di massa $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg e carica elettrica negativa: e .

⁽⁹⁾ Ripreso dal testo G. P. Capitani e E. De Sanctis, *Lezioni ed esercizi di fisica*, La Sapienza Editrice, Roma, 2011.

Nel nucleo, le cui dimensioni sono circa 10^5 volte più piccole di quella dell'atomo (10^{-15} m contro 10^{-10} m, rispettivamente), è praticamente concentrata tutta la massa dell'atomo. Il nucleo, a sua volta, è formato da particelle più semplici: i nucleoni. Questi possono essere di due tipi: i protoni, aventi massa $M_p = 1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg e carica elettrica di intensità uguale a quella dell'elettrone, ma positiva, $+e$, e i neutroni, aventi massa $M_n = 1,6747 \cdot 10^{-27}$ kg e carica elettrica nulla. I protoni e i neutroni interagiscono tra di loro con una forza molto intensa, la cosiddetta interazione forte, che vince la repulsione elettrica esistente tra i protoni. Tutti i nuclei possiedono all'incirca un ugual numero di protoni e neutroni con un eccesso di neutroni in specie per i nuclei più pesanti. Per questi infatti la forza di repulsione elettrica è più intensa e quindi occorrono più neutroni per tenere unito il nucleo grazie alla forza forte che essi esercitano sui protoni. Il nucleo più semplice è quello di idrogeno, costituito da un solo protone; il più complesso dei nuclei naturali è quello di uranio che ha 238 nucleoni (92 protoni e 146 neutroni).

Come abbiamo detto, attorno al nucleo vi è la nube elettronica legata a esso da forze di natura elettrica. Il numero di elettroni è normalmente uguale a quello dei protoni nel nucleo: l'atomo perciò in condizioni normali è elettricamente neutro. Tuttavia esso può venire facilmente privato di uno o più elettroni o al contrario può acquistare uno o più elettroni: in tal caso si dice che l'atomo è ionizzato rispettivamente positivamente una o più volte e negativamente una o più volte.

Gli atomi a loro volta si legano insieme, con forze ancora di natura elettrica, per formare le molecole, le quali sono la parte più piccola della materia che conserva le caratteristiche macroscopiche proprie di ogni sostanza. Esistono molecole costituite da atomi della stessa specie (per esempio la molecola di idrogeno è formata da due atomi di idrogeno, o quella, pure biatomica, di ossigeno, ecc.) e quelle, molto più numerose, formate da atomi diversi (dalla semplice molecola di cloruro di sodio, NaCl, formata da un atomo di sodio e uno di cloro, alle molecole complesse delle proteine, degli acidi nucleici e dei polimeri organici).

Le molecole a loro volta si raggruppano insieme per formare i corpi solidi, liquidi e gassosi. In alcune sostanze solide le molecole mettono in comune alcuni degli elettroni atomici, nel senso che questi elettroni non sono più legati a un determinato atomo, ma sono piuttosto liberi di muoversi in tutta la regione di spazio occupata dal solido in esame. Presentano questa caratteristica quei materiali che abbiamo chiamato conduttori.

In un solido cristallino gli stati possibili di energia per gli elettroni formano bande. All'interno di ciascuna banda i livelli energetici sono molto ravvicinati, ma tra le bande possono esistere intervalli di energia proibiti (*energy gap*). I buoni conduttori sono caratterizzati dall'aver la banda più elevata, fra quelle dotate di elettroni, solo parzialmente occupata (banda di conduzione), di modo che esistono molti stati disponibili in cui gli elettroni si possono muovere e quindi essere accelerati da una tensione applicata esternamente.

In un buon isolante la banda energetica più alta, tra quelle normalmente occupate (banda di valenza) è completamente piena e un ampio intervallo proibito (da 5 a 10 eV) la separa dalla banda successiva, la banda di conduzione. A temperatura ambiente l'energia cinetica molecolare (energia termica) disponibile per effetto delle collisioni è di soli 0,04 eV, rendendo così impossibile alla grande maggioranza degli elettroni il salto dalla banda di valenza a quella di conduzione.

In un semiconduttore l'intervallo proibito tra la banda di valenza e la banda di condu-

zione è molto più piccolo, dell'ordine di 1 eV, cosicché un certo numero di elettroni può effettuare la transizione dalla banda di valenza praticamente piena alla banda di conduzione quasi vuota.

In un semiconduttore drogato una piccola percentuale di atomi spuri, caratterizzati dall'aver tre o cinque elettroni di valenza, sostituisce alcuni dei normali atomi di silicio, che hanno quattro elettroni di valenza. L'impurezza con cinque elettroni genera un semiconduttore di *tipo n*, nel quale i portatori di carica sono gli elettroni negativi. L'impurezza con tre elettroni dà luogo al semiconduttore di *tipo p*, nel quale sono le lacune positive a trasportare le cariche di corrente. Il livello di energia di impurezza giace appena al di sotto della banda di conduzione nei semiconduttori di tipo *n*, agendo così da *donore*, capace cioè di far passare con facilità gli elettroni nella banda di conduzione. Nei semiconduttori di tipo *p* il livello di energia degli atomi spuri giace appena al di sopra della banda di valenza, agendo così da *accettore*, poiché accoglie elettroni che facilmente vi giungono dalla banda di valenza, ove lasciano lacune utili al movimento delle cariche.

Tra la banda di valenza (ad energia inferiore) e quella di conduzione (ad energia maggiore) esiste una banda intermedia, detta *banda proibita* o *energy gap*, che non può essere occupata: gli elettroni devono necessariamente avere energia minore (elettroni di valenza) o maggiore (elettroni di conduzione) rispetto all'intervallo proibito.

Nei conduttori la banda di valenza e quella di conduzione sono sovrapposte, per cui c'è un gran numero di elettroni in grado liberarsi dalla forza attrattiva del proprio nucleo e di muoversi all'interno del materiale. Negli isolanti, al contrario, la banda proibita è molto ampia, per cui è molto improbabile che un elettrone di valenza passi alla banda di conduzione.

Nei semiconduttori la banda proibita ha un valore moderato ed è quindi possibile, fornendo energia agli elettroni, il loro "salto" da una banda all'altra.

Il semiconduttore attualmente più diffuso nell'industria dell'elettronica e delle celle fotovoltaiche è il silicio; i motivi di questa larga diffusione sono elencati all'inizio del terzo capitolo. Il silicio ha numero atomico 14: 10 dei suoi elettroni sono ben legati al nucleo mentre 4, gli elettroni di valenza, sono ad esso debolmente legati. Stando alla Tabella IV, i fotoni aventi un'energia di almeno 1,11 eV incidenti su di un target di silicio a 300 K hanno la possibilità di far passare gli elettroni della banda di valenza alla banda di conduzione.

Tabella IV. – Valori dell'energy gap di alcuni dei semiconduttori più diffusi, calcolati ad una temperatura di 300 K (27 °C).

Materiale	Simbolo	Energy gap [eV] a 300 K
Germanio	Ge	0,67
Silicio	Si	1,11
Arseniuro di gallio	GaAs	1,43
Telloruro di Cadmio	CdTe	1,49
Selenio	Se	1,74
Fosfato di gallio	GaP	2,26
Solfuro di cadmio	CdS	2,42

A temperatura ambiente il silicio è un solido cristallino. Il suo reticolo cristallino è formato da atomi di silicio legati tra loro per mezzo di legami covalenti. Uno schema di questa struttura è rappresentato in figura 15. L'energia necessaria per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione può essere fornita ad un elettrone non solo da un fotone ma anche dall'agitazione termica del semiconduttore stesso: maggiore è la temperatura, maggiore è la probabilità per un elettrone di passare alla banda di conduzione. Questo fenomeno si verifica a qualsiasi temperatura maggiore dello zero assoluto.

Precisamente il quadrato della concentrazione di elettroni di un *semiconduttore intrinseco* (cioè un semiconduttore puro) che si trovano in banda di conduzione è

$$(10) \quad n_i^2 = BT^3 e^{-E_{g0}/k_B T},$$

con n_i concentrazione dei portatori di carica, B costante indipendente dalla temperatura ed E_{g0} energy gap calcolata allo zero assoluto. Ad esempio nel silicio, a 300 K, il numero di elettroni di conduzione per unità di volume (o *concentrazione di portatori*) è circa $1,1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Pur essendo questo un numero molto grande, è solo una piccola frazione della concentrazione degli atomi di silicio, che è circa $5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Il germanio, avendo un'energy gap inferiore a quello del silicio, a temperatura ambiente ha una concentrazione di portatori di carica di ben $2,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

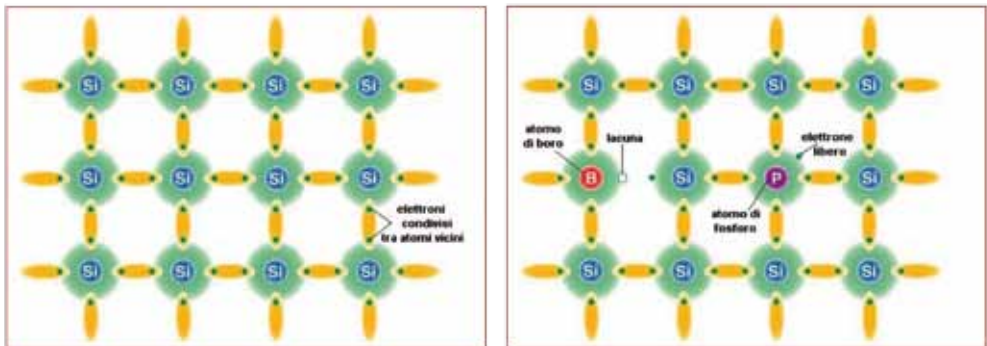


Fig. 15. – Sinistra: schema dei legami covalenti formati dagli atomi di silicio nella configurazione cristallina. Destra: drogaggio del silicio con un atomo del gruppo III (boro) e con un atomo del gruppo V (fosforo). Il drogaggio con atomi del gruppo III lascia nel semiconduttore delle “lacune”, cioè delle assenze di elettroni in grado di completare i quattro legami covalenti. Il drogaggio con atomi del gruppo V fornisce invece, per ogni atomo drogante, un elettrone libero di muoversi nel semiconduttore.

È possibile modificare la concentrazione dei portatori di carica di un semiconduttore introducendo nel semiconduttore stesso delle impurità. Il silicio (così come il germanio) appartiene al gruppo IV della tavola periodica. Inserendo, tramite tecniche opportune, degli elementi del gruppo III o del gruppo V al posto di alcuni atomi di silicio, si modifica la struttura cristallina del materiale e, cosa ben più importante, si modifica anche la struttura delle bande del semiconduttore. L'operazione di inserimento di impurità in un materiale prende il nome di *drogaggio*. Gli elementi droganti del silicio e del germanio usati più fre-

quentemente sono:

- gruppo III (accettori): boro, alluminio, gallio
- gruppo V (donori): antimonio, fosforo, arsenico

Gli elementi del gruppo V hanno un elettrone in più rispetto a quelli del gruppo IV. Come mostrato in figura 15 essi formano quindi 4 legami covalenti e l'elettrone non utilizzato per formare i legami è libero di muoversi all'interno del semiconduttore. I semiconduttori drogati con elementi del gruppo V hanno un'abbondanza di elettroni liberi e per questo sono detti di tipo *n* (*negative*). Gli elementi del gruppo III, avendo un elettrone in difetto rispetto agli elementi del gruppo IV, formano tre legami covalenti e creano una *lacuna*, cioè una mancanza di un elettrone in grado di formare un quarto legame covalente. Una lacuna può essere vista, oltre che come l'assenza di un elettrone, come un portatore di carica positiva: un flusso di elettroni in un certo verso è analogo ad un flusso di lacune nel verso opposto. I semiconduttori drogati con elementi del gruppo III hanno un'abbondanza di lacune e per questo sono detti di tipo *p* (*positive*).

La concentrazione di atomi dopanti può essere molto variabile, da 10^{12} cm^{-3} fino a 10^{18} cm^{-3} . L'inserimento di queste impurità in un semiconduttore aumenta la concentrazione di portatori di carica e rende un semiconduttore molto più sensibile alla radiazione elettromagnetica, cioè facilita il salto di un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione.

Un fotone incidente su di un semiconduttore, sia esso drogato oppure no, ha una certa probabilità di promuovere un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione. Questa probabilità è detta *efficienza quantica* (o QE, Quantum Efficiency). Un fattore che influenza molto questa probabilità è il *coefficiente di assorbimento* del semiconduttore, il quale esprime il numero di fotoni assorbiti dal semiconduttore per unità di spessore. In figura 16 sono mostrati i grafici del coefficiente di assorbimento di alcuni semiconduttori in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Ad esempio un coefficiente di assorbimento 10^4 cm^{-1} significa che ben il 63% dei fotoni viene assorbito nel primo micrometro di spessore del semiconduttore.

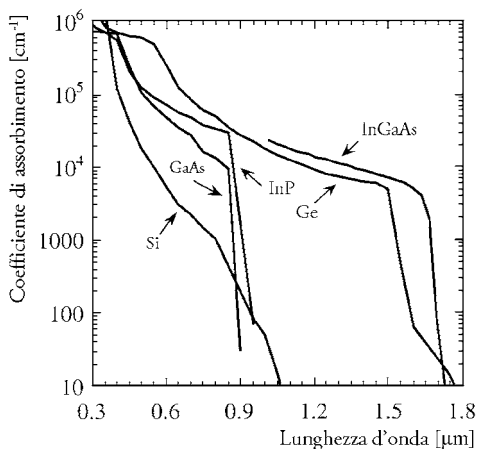


Fig. 16. – Grafici del coefficiente di assorbimento di alcuni semiconduttori in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente (fonte: E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press NY, 1985).

2.2.2 Funzionamento di una cella fotovoltaica

Ora che si è compreso che un fotone avente almeno una certa energia ha la possibilità di far passare un elettrone di un semiconduttore dalla banda di valenza a quella di conduzione, è fondamentale trovare un modo per orientare il moto di questi elettroni di conduzione in modo da generare una corrente elettrica all'interno del semiconduttore.

Ponendo a contatto un semiconduttore drogato di tipo n con lo stesso semiconduttore drogato di tipo p , gli elettroni e le lacune nei pressi della zona di contatto hanno modo di ricombinarsi⁽¹⁰⁾. Come è mostrato in figura 17, la ricombinazione di elettroni e lacune liberi genera una *regione di svuotamento*, priva di cariche elettriche libere di muoversi. Il semiconduttore di tipo n mostra quindi una regione di cariche positive vincolate al reticolo; tali cariche non sono altro che i protoni in eccesso dei nuclei degli elementi droganti del gruppo V. Analogamente il semiconduttore di tipo p mostra una regione di cariche negative vincolate al reticolo, che non sono altro che gli elettroni in eccesso degli elementi droganti del gruppo III.

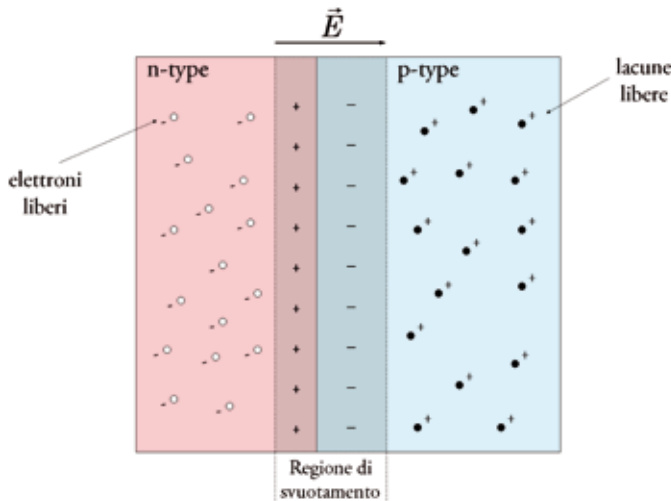


Fig. 17. – Schema di una giunzione $p-n$. Ponendo a contatto le superfici di un semiconduttore drogato di tipo p con uno di tipo n alcune lacune ed alcuni elettroni si ricombinano. Si genera quindi una regione di svuotamento, all'interno della quale esiste un campo elettrico.

Il sistema appena descritto è chiamato *giunzione p-n*. Dalla figura 17 si osserva inoltre che le cariche fisse all'interno della regione di svuotamento generano un campo elettrico orientato dal semiconduttore di tipo n verso quello di tipo p . Si ricorda che una carica positiva (in questo caso una lacuna), posta all'interno di un campo elettrico, si muove seguendo le linee di campo verso le zone in cui il campo elettrico è minore. In modo opposto si comportano gli elettroni.

⁽¹⁰⁾ In linea di principio questo è vero, ma non è possibile ottenere una giunzione $p-n$ semplicemente mettendo in contatto due materiali, uno di tipo p , l'altro di tipo n . Per maggiori dettagli si veda il paragrafo 3.1.2.

La giunzione $p-n$ è l'elemento basilare per l'intera industria dei semiconduttori. Esso trova quindi applicazione in tutto il campo della microelettronica per la realizzazione di circuiti integrati tramite i diodi e i transistor; anche il settore dell'optoelettronica deve un suo notevole sviluppo ai semiconduttori, grazie all'invenzione dei LED e dei diodi laser. Per finire, ed è questo in particolare il campo di nostro interesse, il settore delle energie alternative ha assistito ad un'incredibile fioritura grazie alle celle solari. La giunzione $p-n$ costituisce l'elemento chiave dell'industria del fotovoltaico ed è proprio questa tecnologia che verrà presentata di seguito.

Si supponga che un fotone, avente un'opportuna energia, incida su di una giunzione $p-n$. In questa situazione esiste una probabilità diversa da zero che il fotone riesca a "promuovere" un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione, cioè che il fotone generi una *coppia elettrone-lacuna*. In questa situazione l'elettrone e la lacuna iniziano a diffondere all'interno del semiconduttore e possono raggiungere, con una certa probabilità, la regione di svuotamento. Il campo elettrico presente in tale regione provvede quindi a separare le due cariche di segno opposto, generando una corrente all'interno del semiconduttore. Se ai capi della giunzione $p-n$ viene posto un amperometro è possibile rilevare il passaggio degli elettroni dalla regione di tipo p a quella di tipo n (e, viceversa, delle lacune dalla regione di tipo n a quella di tipo p).

APPROFONDIMENTO: La legge di Ohm

La *legge di Ohm* è una legge fondamentale in ambito di elettronica ed elettrotecnica. Essa stabilisce il legame tra la tensione V ai capi di un carico resistivo R e la corrente I che vi circola attraverso. Tale legge è valida per materiali ordinari (ossia non superconduttivi), posti a temperatura ambiente ed in presenza di campi elettrici non troppo elevati.

Una semplice dimostrazione della legge di Ohm si basa su un modello microscopico, detto modello di Drude, in grado di spiegare con buona approssimazione il fenomeno della conduttività. Si consideri un materiale conduttore, avente una struttura cristallina. Gli elettroni di conduzione vengono descritti come un gas di particelle libere di muoversi all'interno del conduttore, senza alcuna interazione reciproca, con una velocità quadratica media $\langle \vec{v}^2 \rangle$ definita dalla relazione

$$(11) \quad \frac{1}{2} m_e \langle \vec{v}^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T ,$$

dove k_B è la costante di Boltzman e T è la temperatura del gas di elettroni.

Gli elettroni di tale conduttore sono liberi di muoversi in seno al reticolo anche per distanze di parecchi passi reticolari prima di subire una collisione con un atomo. Avendo gli atomi del reticolo una massa migliaia di volte superiore alla massa di un elettrone, gli urti tra elettroni e atomi del reticolo vengono considerati come elastici, cosicché gli elettroni conservano nel loro moto la loro energia cinetica. In queste condizioni la velocità media degli elettroni è nulla e nel conduttore non circola corrente. Si consideri ora un materiale conduttore immerso in un campo elettrico \vec{E} . Gli elettroni di conduzione di tale materiale

risentono della forza di Coulomb

$$(12) \quad \vec{F} = m_e \vec{a} = -q\vec{E}.$$

Il segno negativo è dovuto alla carica negativa degli elettroni, i quali sono soggetti ad una forza avente direzione opposta al campo elettrico. Gli elettroni subiscono quindi delle accelerazioni dovute al campo elettrico e dei bruschi cambi di direzione dovuti agli urti con gli atomi del materiale. La velocità degli elettroni immediatamente prima di un urto è

$$(13) \quad \vec{v} = \tau \vec{a} = -\tau \frac{q\vec{E}}{m_e},$$

avendo indicato con τ il tempo medio che intercorre tra un urto e il successivo.

Se si considerano tanti urti successivi dello stesso elettrone si può esprimere l'intervallo di tempo medio τ in funzione del *cammino libero medio* λ , ossia del percorso che un elettrone compie in media fra un urto e il successivo (λ è naturalmente uguale per tutti gli elettroni) e della velocità $|\vec{v}|$:

$$(14) \quad \tau = \frac{\lambda}{|\vec{v}|}.$$

Poiché gli elettroni subiscono continue accelerazioni e frenate, raggiungendo in media immediatamente prima di un urto una velocità massima \vec{v} , la velocità media con la quale gli elettroni si muovono nel conduttore è quindi $\vec{v}/2$, detta *velocità di drift*. Moltiplicando tale velocità degli elettroni per la loro densità volumetrica n si ottiene il numero medio di cariche che attraversano una certa superficie di conduttore nell'unità di tempo. Moltiplicando poi questo numero per q e sapendo che la corrente elettrica circola nel verso opposto a quello degli elettroni, la densità di corrente elettrica risulta

$$(15) \quad \vec{J} = \frac{\tau q^2 n}{2m} \vec{E} = \sigma \vec{E},$$

il che significa che la densità di corrente elettrica \vec{J} è direttamente proporzionale al campo elettrico \vec{E} per mezzo della costante di proporzionalità σ detta *conducibilità* del materiale. Si consideri ora un conduttore di lunghezza d e sezione A , immerso in un campo elettrico \vec{E} diretto nella direzione del lato di lunghezza d (figura 18).

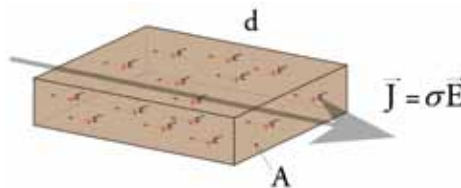


Fig. 18. – Schema della conduzione dell'elettricità all'interno di un materiale di lunghezza d e sezione A . Un campo elettrico \vec{E} genera un moto degli elettroni e quindi una densità di corrente \vec{J} .

Grazie alla relazione precedente è possibile ricavare l'equazione della corrente elettrica circolante nel conduttore

$$(16) \quad I = JA = \sigma \frac{V}{d} A = \frac{1}{\rho} \frac{V}{d} A,$$

con ρ , *resistività del materiale*, definito come l'inverso della conducibilità, e con V tensione ai capi del conduttore. Definendo la resistenza elettrica come

$$(17) \quad R = \rho \frac{d}{A},$$

si ottiene infine la legge di Ohm

$$(18) \quad V = RI .$$

L'equazione (17) è detta anche seconda legge di Ohm.

È importante osservare come l'assunzione di “elettroni liberi” alla base del modello di Drude, però, trascuri l'interazione reciproca tra gli elettroni, oltre all'interazione tra gli elettroni e gli atomi che non siano quelli interessati negli urti. A causa di questa semplificazione, il modello di Drude non è in grado di spiegare, tra le altre cose, la dipendenza della resistività dalla temperatura per valori sufficientemente piccoli di quest'ultima e di stimare correttamente il valore del calore specifico degli elettroni nei metalli. Il modello di Drude prevede infatti valori due ordini di grandezza superiori rispetto a quanto misurato sperimentalmente.

A parte questi limiti del modello, è stato dimostrato come esso spieghi correttamente la conduzione delle cariche elettriche in materiali conduttori posti a temperatura ambiente. Questo è vero sia per la conduzione di corrente continua che alternata. Il modello di Drude permette inoltre di ricavare dei valori di conducibilità termica dei metalli in accordo con quanto misurato sperimentalmente.

Si supponga ora di disporre di un dispositivo elettronico avente una certa curva caratteristica corrente-tensione (o “curva $I-V$ ”), descritta dalla funzione $I(V)$. Un carico resistivo collegato ai capi di tale dispositivo, avente come curva caratteristica una retta (detta retta di carico) con coefficiente angolare dipendente dalla sola resistenza R , definisce il punto di lavoro Q del sistema dato dall'intersezione delle due curve (figura 19).

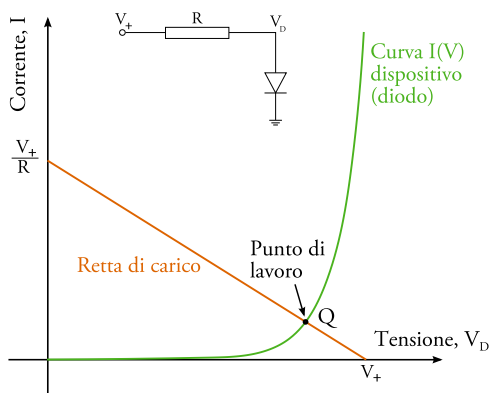


Fig. 19. – Grafico rappresentante l'intersezione tra la retta di carico e la curva caratteristica di un diodo. Il punto Q definisce le coordinate corrente-tensione alle quali il sistema, schematizzato nel circuito in alto, lavora.

Esercizio 8: La legge di Ohm

Un conduttore di rame di sezione costante $S = 1,3 \text{ cm}^2$ è percorso da una corrente $I = 200 \text{ A}$. Sapendo che alla conduzione partecipa un elettrone per ogni atomo di rame e che la densità del rame è $\rho = 8,9 \text{ g/cm}^3$, calcolare il numero n di elettroni liberi per cm^3 e la velocità media v di trasporto degli elettroni.

Svolgimento

Ricordando che in una mole di una qualsiasi sostanza (ossia in una quantità della sostanza la cui massa espressa in grammi è uguale al suo peso molecolare) ci sono N_A molecole (dove $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ è numero di Avogadro), che la molecola di rame è monoatomica e che il numero atomico del rame è $A = 63$, segue che il numero di atomi di rame per cm^3 è pari a N_A volte il numero di moli di rame per cm^3 :

$$n = \frac{N_A \rho}{A} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 8,9 \text{ g/cm}^3}{63} = 8,5 \cdot 10^{22} \text{ elettroni/cm}^3 .$$

La corrente che scorre nel conduttore è pari alla carica elettrica Q che attraversa nell'unità di tempo una sezione S del conduttore stesso. Chiaramente Q è pari alla somma delle cariche degli elettroni contenuti in un cilindro di base S e altezza $v \cdot \Delta t$, con $\Delta t = 1 \text{ s}$, ossia

$$Q = nqSv\Delta t = I\Delta t ,$$

da cui segue

$$v = \frac{I}{nqS} = \frac{200 \text{ A}}{8,5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} .$$

La figura 20 mostra lo schema di una giunzione p - n irraggiata con dei fotoni, ai capi della quale è collegato un carico resistivo (cioè un dispositivo in grado di sfruttare la corrente prodotta dalla cella solare). Si ricorda che, per convenzione, la corrente i in un circuito elettrico circola nel verso delle cariche positive, quindi in questo caso nel verso delle lacune. Nel momento in cui la corrente i passa attraverso il carico, ai capi di quest'ultimo si genera una differenza di potenziale.

È noto che, data una giunzione p - n e applicata ai suoi capi una certa differenza di potenziale, all'interno della giunzione circola una corrente nel verso opposto a quella fotogenerata, data da una ben precisa legge.

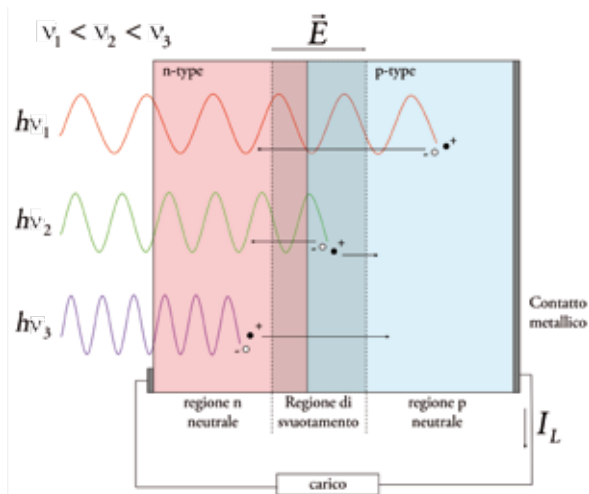


Fig. 20. – Schema di una cella solare. Un fotone di energia $h\nu$ produce una coppia elettrone-lacuna. Il campo elettrico all'interno della regione di svuotamento divide la coppia appena generata e produce la corrente I_L .

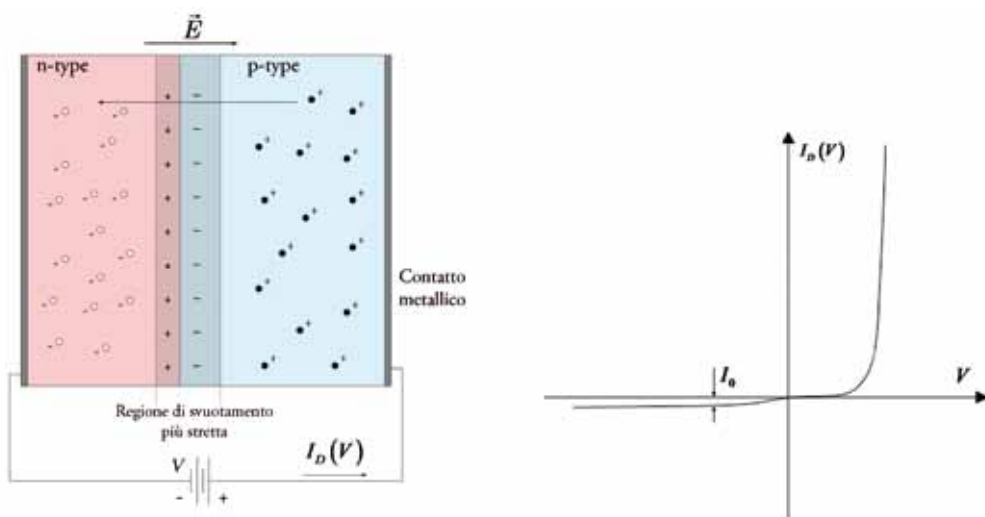


Fig. 21. – Applicando una tensione V ai capi di una giunzione $p-n$ la regione di svuotamento si restringe (figura a sinistra), abbassandosi quindi anche la barriera di potenziale che gli elettroni della regione n (le lacune della regione p) devono superare per ricombinarsi con le lacune (gli elettroni) libere e generare quindi una corrente nel semiconduttore. L'andamento della corrente $I_D(V)$ in funzione della tensione è rappresentato nel grafico a destra.

Per meglio comprendere cosa accada ad una cella solare, all'interno della quale circola una corrente che viene utilizzata da un carico collegato ai suoi capi, ci concentriamo momentaneamente sul funzionamento di una semplice giunzione $p-n$ non illuminata, detta anche *diodo*. Applicando una differenza di potenziale V ai capi di un diodo si induce un restringimento della regione di svuotamento e quindi si facilita il passaggio di elettroni dalla

regione n alla regione p (o viceversa di lacune dalla regione p alla regione n). Si crea quindi una corrente $I_D(V)$ dipendente dalla differenza di potenziale V

$$(19) \quad I_D(V) = I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right)$$

con q carica elementare ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C), k_B costante di Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T temperatura della cella e I_0 corrente di saturazione inversa. Quest'ultimo fattore dipende da una serie di parametri caratteristici del semiconduttore e dalla concentrazione di atomi droganti. Per avere un'idea di cosa rappresenti I_0 si osservi la figura 21.

Si supponga ora di irraggiare una giunzione $p-n$ ai cui capi è collegato un carico. Nel circuito così creato iniziano a scorrere due correnti, dirette in verso opposto. Una è la corrente I_L generata dai fotoni incidenti sul semiconduttore mentre un'altra è la corrente $I_D(V)$ dovuta al fatto che ai capi del carico (e quindi della giunzione) si genera una differenza di potenziale V . Per visualizzare la sovrapposizione delle due correnti si osservi la figura 22.

L'equazione caratteristica di una cella solare è quindi

$$(20) \quad I = I_L - I_D(V) = I_L - I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right),$$

il cui grafico $I-V$ (corrente-tensione) è rappresentato in figura 23. La corrente I_L è detta *corrente di corto circuito* (in figura I_{SC} , *short circuit current*) ed è la corrente che circola nella cella solare quando il carico resistivo è nullo. Se il carico fosse invece idealmente infinito (nel gergo tecnico si dice che il carico ha un'impedenza infinita) nella cella non circolerebbe alcuna corrente e si creerebbe una differenza di potenziale tra i due contatti metallici detta *tensione di circuito aperto* (V_{OC} , *open circuit voltage*).

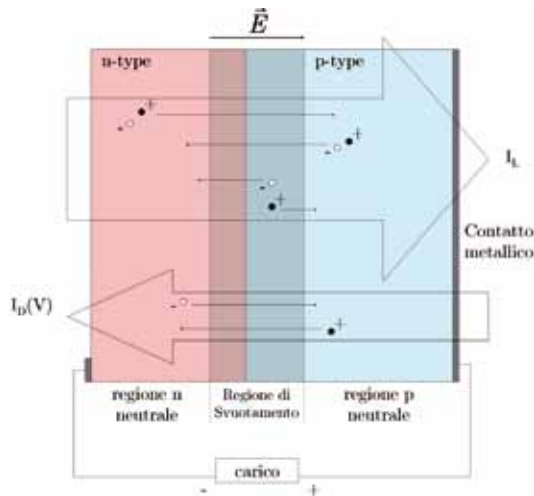


Fig. 22. – Schema delle correnti circolanti in una cella solare. Le correnti I_L e I_D si sovrappongono e la loro differenza, funzione della tensione ai capi della cella, è rappresentata dall'equazione (20).

La potenza assorbita da un carico resistivo nel quale circola una corrente I e ai cui capi è presente una differenza di potenziale V è

$$(21) \quad P = VI .$$

Data la curva caratteristica di una cella solare, esiste una coppia di valori di tensione e corrente per il quale il loro prodotto è massimo. Tale punto di massima potenza (in figura 23 è indicato con MPP, Maximum Power Point) è dato dal prodotto di V_{MP} e di I_{MP} . Esiste inoltre un parametro per caratterizzare la “bontà” di una cella solare. Esso è detto fattore di riempimento (spesso indicato per brevità con FF, Fill Factor) ed è il rapporto tra la potenza indicata dal punto MPP e la massima potenza teorica estraibile da una cella:

$$(22) \quad FF = \frac{I_{MP} V_{MP}}{I_{SC} V_{OC}} .$$

Questo non è altro che il rapporto tra le aree dei rettangoli evidenziati in figura 23.

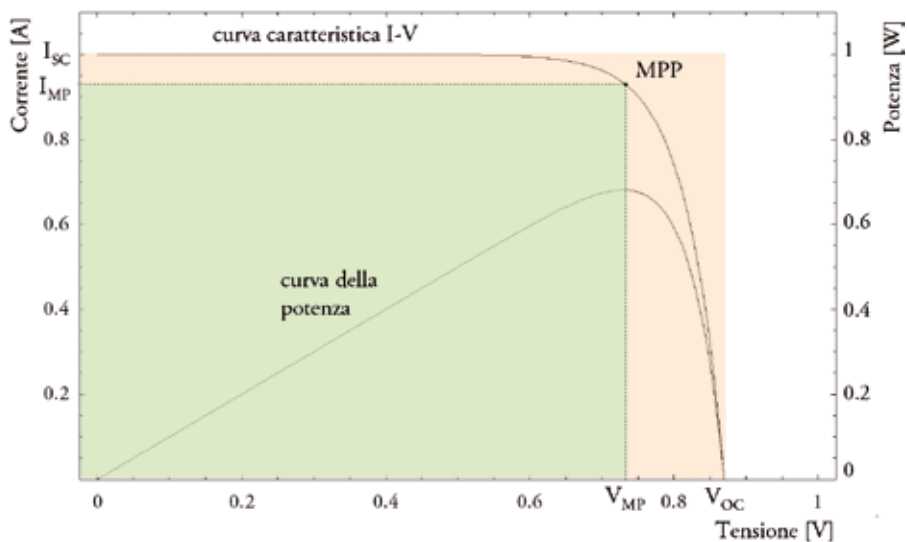


Fig. 23. – Curva caratteristica di una cella solare (I - V curve) e curva della potenza elettrica emessa dalla cella ($power$ curve). Quest’ultima è variabile a seconda del carico collegato alla cella. Esiste un punto di massima potenza (MPP, Maximum Power Point) in cui la cella fornisce il massimo della potenza elettrica, precisamente $I_{MP}V_{MP}$. Il rapporto tra le aree dei due rettangoli, rispettivamente quello verde e quello arancione, è detto Fill Factor ed è un parametro legato all’efficienza limite di una cella fotovoltaica.

Esercizio 9: Valore della banda proibita di un semiconduttore

La conducibilità di un un semiconduttore cresce quando viene illuminato con luce di lunghezza d'onda $\lambda \leq 345$ nm. Questo risultato suggerisce che gli elettroni vengano promossi dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Calcolare il valore E_g dell'energia della banda proibita di questo semiconduttore.

Svolgimento

Il fotone di massima lunghezza d'onda (minima energia) in grado di provocare l'aumento di conducibilità ha $\lambda = 345$ nm e la sua energia è uguale alla banda proibita

$$E_g = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{345 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 3,6 \text{ eV} .$$

Esercizio 10: Potenza elettrica di una cella solare

Si supponga di investire una giunzione $p-n$ con un'intensità $N = 10^{19}$ fotoni al secondo, aventi tutti lunghezza d'onda $\lambda = 550$ nm e che solo il 90% di questi fotoni riesca a generare nel semiconduttore una coppia elettrone-lacuna. Ai capi della cella è collegato un carico resistivo $R = 1,6 \Omega$.

Qual è la potenza elettrica dissipata da tale carico?

Confrontare l'energia dissipata in un secondo con l'energia totale dei fotoni incidenti nello stesso intervallo di tempo. Supponendo che l'energia in eccesso vada a scaldare direttamente il semiconduttore e supponendo inoltre che il semiconduttore trattenga tale calore senza dissiparlo, di quanto è aumentata la temperatura della cella dopo 10 minuti di esposizione? (dati del semiconduttore: calore specifico $C_S = 700 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; massa $m = 10 \text{ g}$).

Svolgimento

La corrente circolante è

$$I = N \cdot 90\% \cdot q = 10^{19} \text{ fotoni/s} \cdot 0,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 1,44 \text{ A} ,$$

quindi la potenza dissipata per effetto Joule della resistenza è

$$P_{\text{resist}} = I^2 R = 3,32 \text{ W} .$$

L'energia di un fotone di lunghezza d'onda è

$$E_\gamma = h \frac{c}{\lambda} = 3,61 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,26 \text{ eV} ,$$

quindi la potenza scaricata dai fotoni sulla cella solare è

$$P_{\text{fotoni}} = N \cdot E_\gamma = 3,61 \text{ W} .$$

La differenza tra le due potenze è la potenza che va a scaldare direttamente la cella

$$\Delta P = P_{\text{fotoni}} - P_{\text{resist}} = 0.29 \text{ W} .$$

Quindi l'energia che viene riversata sulla cella nell'arco di 10 minuti è

$$Q = 0.29 \text{ W} \cdot 600 \text{ s} = 174 \text{ J} .$$

Ricordando la legge $Q = m \cdot C_s \cdot \Delta T$ è immediato ottenere l'incremento di temperatura della cella

$$\Delta T = \frac{Q}{mC_s} = \frac{174 \text{ J}}{0,010 \text{ kg} \cdot 700 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}} \simeq 25^\circ\text{C} .$$

APPROFONDIMENTO: Bandgap diretta ed indiretta

Si consideri un solido cristallino, come può essere ad esempio un semiconduttore, avente una certa struttura reticolare. Ciascun atomo di cui è composto un solido siffatto risente, in prima approssimazione, dell'interazione coulombiana con gli atomi ad esso più vicini ed ha la possibilità di oscillare attorno ad una certa posizione di equilibrio. All'interno del solido cristallino si possono instaurare delle oscillazioni, caratterizzate da una precisa lunghezza d'onda. È noto che ad ogni fotone avente una certa lunghezza d'onda λ è possibile associare un momento (o quantità di moto), definito come

$$(23) \quad \vec{p} = \hbar \vec{k} , \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} , \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} ,$$

con \vec{k} vettore d'onda associato, la cui direzione è quella di propagazione del fotone e con \hbar costante di Planck ridotta.

Analogamente, ad ogni moto vibrazionale di un solido cristallino è possibile associare un momento, detto *momento di cristallo*, per mezzo della stessa definizione. A causa della dualità onda-corpuscolo a cui è soggetto ogni corpo in natura, così come i fotoni sono quanti di onde elettromagnetiche, i *fononi* sono quanti di onde sonore che si propagano all'interno del solido aventi un momento e un vettore d'onda definiti dalla (23). L'introduzione del concetto di fonone è fondamentale per comprendere la differenza tra semiconduttori a *bandgap* diretta o indiretta.

Come definito nel paragrafo 2.2.1, l'energy gap di un semiconduttore è l'energia minima necessaria ad un fotone per essere promosso dalla banda di valenza a quella di conduzione. Ogni semiconduttore presenta una differente struttura a bande. Il diagramma a bande di un semiconduttore è l'insieme di tutte le curve energia-momento degli elettroni di un cristallo. Tali curve rappresentano le energie che un elettrone può o non può possedere, in funzione del suo momento p ; a questo proposito si osservi il caso puramente ideale di un solido cristallino unidimensionale rappresentato in figura 24: gli elettroni del cristallo possono possedere solo dei valori di energia E e momento p che permettano loro di ricadere in delle bande permesse. Un solido cristallino, inoltre, possiede in teoria infinite bande energetiche,

ma gli elettroni vivono solitamente entro i gap energetici permessi ad energia inferiore, in accordo col principio, valido per ogni sistema fisico, di minimizzazione dell'energia.

Con riferimento a figura 25 un semiconduttore si dice essere a *bandgap diretta* se il massimo della banda di valenza e il minimo della banda di conduzione hanno la stessa coordinata momento (p). Viceversa un semiconduttore si dice essere a *bandgap indiretta* se il massimo della banda di valenza e il minimo della banda di conduzione hanno differente coordinata momento.

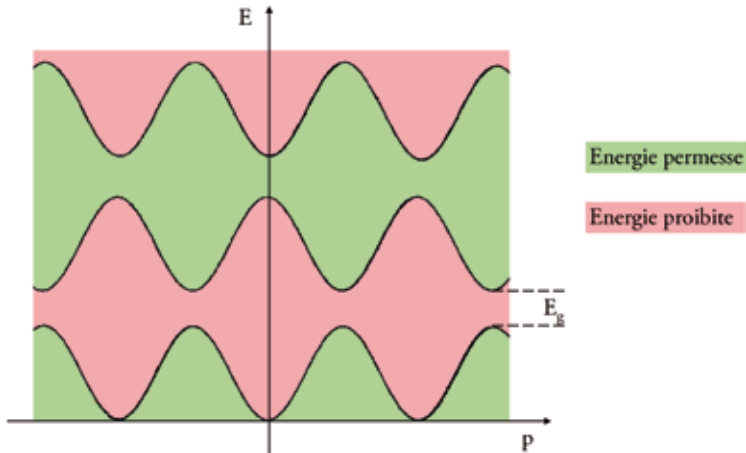


Fig. 24. – Diagramma a bande di un solido cristallino unidimensionale. Si osserva che esistono delle energie permesse e delle energie proibite agli elettroni. Tali regioni sono delimitate da delle curve, funzioni del momento degli elettroni. La differenza tra il massimo assoluto di una curva e il minimo assoluto della curva successiva è definito come energy gap.

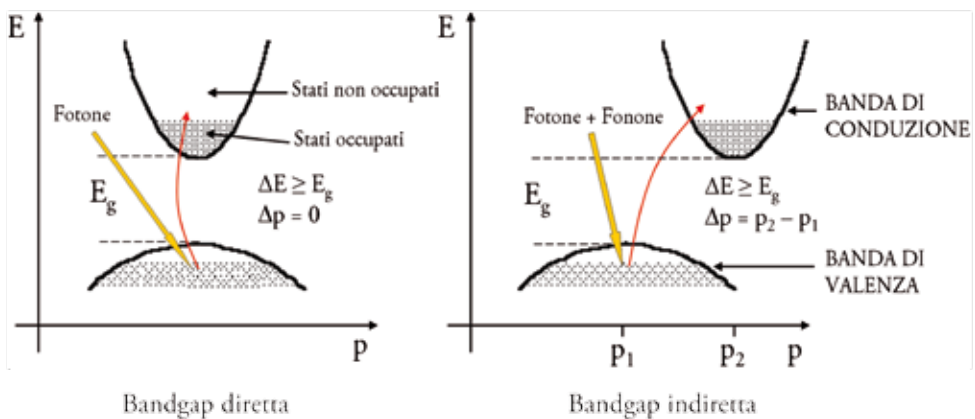


Fig. 25. – Diagramma a bande di un semiconduttore a bandgap diretta e di uno a bandgap indiretta. Nel primo caso è sufficiente l'assorbimento di un fotone per promuovere un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione, mentre nel secondo caso è richiesto anche l'assorbimento di un fonone.

Il processo di promozione di un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione può avvenire solo se l'energia e il momento si conservano. A partire da questo principio inviolabile, si osserva che nei semiconduttori a bandgap diretta il passaggio dalla banda di valenza a quella di conduzione può avvenire semplicemente grazie all'interazione di un fotone sufficientemente energetico con un elettrone. Nel caso di semiconduttori a bandgap indiretta occorre che nel processo di assorbimento del fotone intervenga anche un fonone che dia all'elettrone un momento appropriato. Questo secondo processo è chiaramente sfavorito rispetto al primo perché richiede l'assorbimento simultaneo di un fotone e di un fonone. Semiconduttori a bandgap diretta tipicamente impiegati sono tellururo di cadmio (CdTe), solfuro di cadmio (CdS), arseniuro di gallio (GaAs), arseniuro di gallio e indio (InGaAs), fosfuro di gallio e indio (InGaP), selenio (Se). Silicio (Si), germanio (Ge), fosfuro di gallio (GaP) sono invece semiconduttori a bandgap indiretta. A titolo esemplificativo sono riportati in figura 26 i diagrammi a bande di un semiconduttore a bandgap indiretta (Si) ed uno a bandgap diretta (GaAs). Una nota particolare merita l'arseniuro di gallio (GaAs), che nella sua forma cristallina è impiegato nella fabbricazione di celle *thin film* ad altissima efficienza. A causa del suo costo molto elevato è impiegato principalmente nell'alimentazione dei satelliti artificiali. Una recente evoluzione delle celle GaAs è stata lo sviluppo delle celle a doppia e tripla giunzione (vedi approfondimento sull'efficienza limite di una cella fotovoltaica) aventi un'efficienza superiore al 40% e che negli ultimi anni stanno trovando applicazione anche in ambito terrestre grazie al fotovoltaico a concentrazione.

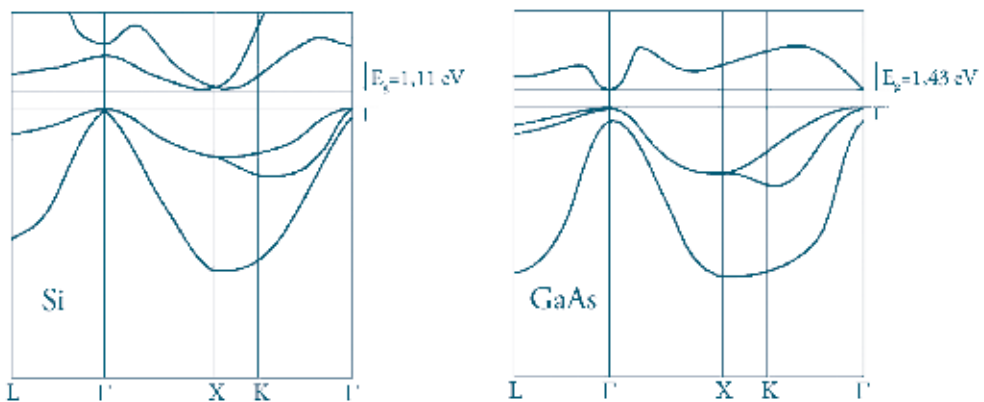


Fig. 26. – Diagramma a bande del silicio (sinistra) e dell'arseniuro di gallio (destra). Da questi grafici si nota, tra l'altro, che Si è un semiconduttore a bandgap indiretta, mentre GaAs è a bandgap diretta (fonte: H. Ibach H. Luth, Solid-State Physics, Springer, quarta edizione, 2009).

APPROFONDIMENTO: Efficienza Quantica di una cella fotovoltaica

Non tutti i fotoni incidenti su di una giunzione $p-n$ riescono a far passare gli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione. Questo fenomeno possiede una certa probabilità di verificarsi, dipendente dai fattori sotto elencati:

- Il salto energetico richiesto ad un elettrone per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione è detto energy gap e dipende dal tipo di semiconduttore e dalla sua temperatura. L'energy gap è quindi l'energia minima che un fotone deve possedere per poter generare una coppia elettrone-lacuna.
- Ogni semiconduttore è caratterizzato da un coefficiente di assorbimento (vedi figura 26). Questo coefficiente deve essere pesato col fatto che ogni semiconduttore ha uno spessore finito, e quindi può risultare trasparente a fotoni aventi un'elevata lunghezza d'onda.
- I fotoni incidenti possono essere riflessi dalla superficie superiore del semiconduttore, causata dalla differenza di indice di rifrazione tra aria e semiconduttore stesso. La percentuale di radiazione riflessa dipende, oltre che dall'indice di rifrazione del semiconduttore, dall'angolo tra il vettore d'onda della radiazione incidente e il vettore normale alla superficie della cella.

Noti i fattori appena elencati, è possibile affermare che ogni fotone incidente sul semiconduttore possiede certa probabilità di generare una coppia elettrone-lacuna che potrebbe produrre una corrente elettrica. Tale probabilità prende il nome di Efficienza Quantica (QE da Quantum Efficiency)

Tenendo conto del solo coefficiente di assorbimento $\alpha(\lambda)$, il numero di fotoni che penetrano in un semiconduttore fino ad una profondità x è

$$(24) \quad N_{ph}(x) = N_S e^{-\alpha(\lambda)x},$$

con N_S numero di fotoni incidenti sulla superficie del semiconduttore. Per ottenere il coefficiente di generazione di coppie elettrone-lacuna, cioè il numero di portatori di carica generati nell'unità di percorso, occorre derivare $N_{ph}(x)$ rispetto ad x e integrare il risultato su tutte le lunghezze d'onda

$$(25) \quad G(x, \lambda) = -\frac{dN_{ph}(x)}{dx} = \alpha(\lambda)N_S e^{-\alpha(\lambda)x},$$

$$(26) \quad G(x) = \int_{\lambda=0}^{\infty} \alpha(\lambda)N_S e^{-\alpha(\lambda)x} d\lambda.$$

Il termine $dN_{ph}(x)$ rappresenta la variazione infinitesima di fotoni tra la profondità x e $x + dx$. Tale termine è sicuramente minore o uguale a zero e poiché il coefficiente di generazione di coppie $G(x, \lambda)$ è definito positivo, allora viene introdotto il segno negativo nel secondo membro dell'equazione (25).

A titolo esemplificativo in figura 27 è riportato il coefficiente di generazione di coppie elettrone lacuna nel silicio in funzione dello spessore del semiconduttore. La figura mette in evidenza il fatto che in un semiconduttore la maggior parte dei fotoni viene raccolta nei primi 10–20 μm di spessore. Questo dato è molto importante per comprendere alcuni dettagli riguardanti la fabbricazione delle celle solari che verranno presentati nel terzo capitolo.

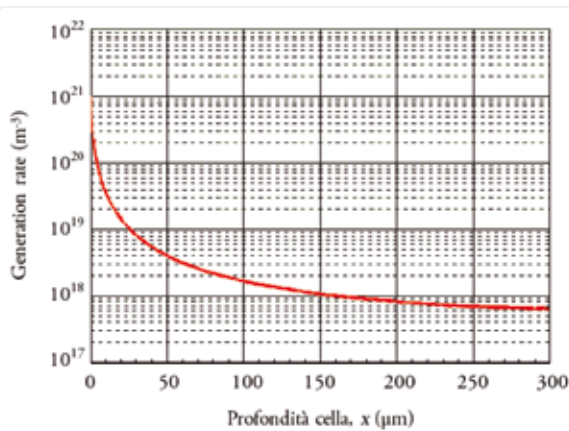


Fig. 27. – Coefficiente di generazione delle coppie elettrone-lacuna nel silicio, in funzione della profondità nel semiconduttore.

In conclusione, l'efficienza quantica di ogni cella solare ha un andamento abbastanza tipico, riportato in figura 28. La QE è limitata ad un certo intervallo dello spettro: un estremo è dettato dal valore dell'energy gap, mentre l'altro è dovuto al fatto che fotoni molto energetici generano delle coppie elettrone-lacuna troppo vicino alla superficie, tanto da risultare inutili ai fini della generazione di una corrente elettrica.

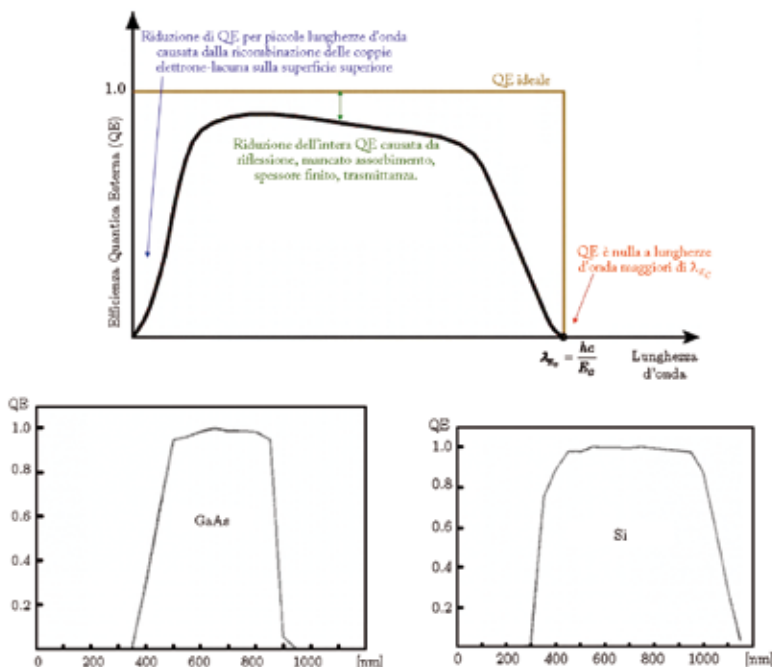


Fig. 28. – Efficienza quantica di una cella solare. Solo i fotoni aventi energia sufficiente (cioè lunghezza d'onda minore di un certo valore) sono in grado di generare una coppia elettrone-lacuna. Come si vede dai grafici, i fotoni troppo energetici danno un'efficienza quantica nulla perché generano la coppia elettrone-lacuna non appena penetrano nel semiconduttore, quindi non sufficientemente in profondità nella giunzione per riuscire a separare l'elettrone dalla lacuna e indurre quindi una corrente elettrica.

2.3 Futuro: tecnologie emergenti

Il mondo della ricerca sul fotovoltaico è in continuo fermento ed esistono diverse alternative al silicio mono o poli cristallino (che attualmente è il materiale più utilizzato nella costruzione di celle), anche se vanno perfezionate per renderle economicamente accessibili, efficienti e allo stesso tempo resistenti alle intemperie.

Un'alternativa è data dalla tecnologia a *film sottile* (*thin film*), nelle sue diverse tipologie. I moduli fotovoltaici in film sottile si sono già affacciati sul mercato, ma hanno ancora un ruolo marginale per via dei rendimenti limitati o dei costi elevati delle tecnologie di nuovissima generazione.

Un'altra tecnologia promettente che ha già iniziato ad essere disponibile sul mercato è il *fotovoltaico a concentrazione*, mentre molte sono le speranze riposte nelle *celle organiche*.

2.3.1 Celle a film sottile

L'idea alla base della tecnologia a film sottile consiste nell'utilizzare sottili pellicole di materiale semiconduttore, applicate su di un supporto a basso costo (spesso vetro o ceramica). L'intento è di ottenere un prodotto economico e avente un'efficienza paragonabile, se non superiore, a quella delle tradizionali celle al silicio. I semiconduttori più utilizzati sono il silicio amorfo, il diseleniuro di rame-indio-gallio (CIGS) e il tellururo di cadmio (CdTe).

Queste sostanze hanno un'elevata capacità di assorbire la radiazione solare, per questo è necessario uno strato molto sottile, fino ad uno spessore di 0,001 mm.

Inoltre, la produzione è notevolmente meno costosa rispetto alle celle in silicio cristallino, sia per il minore impiego di materiale, sia per il minor dispendio energetico della produzione industriale. Un'altra particolarità vantaggiosa è data dal fatto che la forma può essere sagomata a piacimento per integrare il pannello praticamente ovunque.

I contatti elettrici della cella consistono in una copertura metallica uniforme sul lato posteriore, ed in una copertura di ossidi di metallo trasparenti (TCO, Transparent Conductive Oxide) sul lato anteriore.

Le caratteristiche della tecnologia a film sottile la rendono adatta alle applicazioni spaziali; infatti è possibile arrotolare i pannelli solari, leggeri e flessibili, e stiparli al sicuro durante il lancio per poi srotolarli e disporli all'esterno dei satelliti una volta giunti nello spazio.

Tra i materiali impiegati nella tecnologia del film sottile, il **silicio amorfo**, a-Si, rappresenta un'alternativa al silicio cristallino. Di fatto, questa tecnologia ne utilizza gli scarti per depositarne uno strato sottile (1–2 μm) su supporti di altri materiali, ad esempio vetro o plastica, anche di dimensioni considerevoli, per cui è improprio parlare di celle.

Il record di efficienza di celle a-Si, registrato in laboratorio, è 12,5% mentre le efficienze di moduli completi realizzati con questa tecnologia tende al 10%, con un decadimento nei primi mesi di vita del 30%. La vita media di un impianto si aggira intorno ai 10 anni, ma questo tipo di pannello, poiché utilizza molto meno materiale pregiato, è notevolmente più economico dell'equivalente in silicio mono o poli cristallino. Inoltre, appartenendo alla classe del film sottile, il silicio amorfo è estremamente versatile dal punto di vista architettonico: si può utilizzare come rivestimento per coperture (il materiale è scuro e uniforme) o impiegare per realizzare vere e proprie tegole fotovoltaiche.

Per il momento, l'impiego del silicio amorfo è limitato dalla scarsa efficienza, ma stanno prendendo piede tecniche di sovrapposizione di diversi strati caratterizzati da assorbimento della radiazione solare su diversi intervalli di frequenza (celle multigiunzione), il che permetterebbe di aumentare l'efficienza complessiva dell'impianto, che, inoltre, non risente delle variazioni di temperatura di cui risentono le celle in silicio cristallino e questo permette di abbattere anche i costi di manutenzione.

L'impiego di **silicio amorfo e microcristallino**, a-Si/ μ c-Si, rientra nella tecnologia del film sottile e rappresenta una delle frontiere più recenti e promettenti della ricerca nel settore del fotovoltaico, tanto che molte importanti ditte si stanno specializzando in questo tipo di tecnologia.

La tecnologia di a-Si/ μ c-Si si basa sulla sovrapposizione di uno strato di silicio amorfo a-Si su uno strato di silicio microcristallino μ c-Si ad alto rendimento (figura 29). Questa sovrapposizione prende il nome di *giunzione doppia* (tandem junction) o *eterogiunzione* (HIT, Heterojunction with Intrinsic Thin layer) dal momento che sono presenti due diverse giunzioni *p-n* che "lavorano" in serie una sull'altra. I due strati assorbono intervalli di frequenze differenti della radiazione solare, il che permette di aumentare l'efficienza finale dell'impianto fotovoltaico.

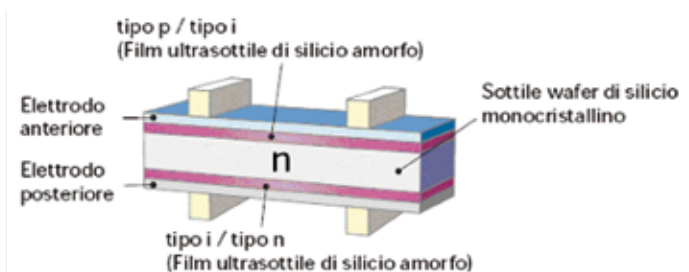


Fig. 29. – Sezione di una eterogiunzione tra silicio monocristallino e amorfo. La particolare configurazione permette alla giunzione di raccogliere fotoni da entrambe le facce.

Grazie alla perfetta simmetria degli strati, è possibile esporre alla luce del Sole entrambe le facce della cella, il che consentirebbe di sfruttare anche la luce riflessa all'interno di ambienti in cui la cella potrebbe essere integrata.

Questo tipo di materiale subisce un degrado minore rispetto al silicio per via dei fattori ambientali di temperatura e radiazione solare. Attualmente le celle a-Si/ μ c-Si hanno un record di efficienza del 23,0%, valore che cala a 19% circa per un modulo completo.

Il **tellururo di cadmio**, CdTe, è un composto chimico formato da cadmio e tellurio (un sale per la precisione), particolarmente adatto all'impiego nel campo del fotovoltaico per via delle sue caratteristiche semiconduttive. I processi di produzione, poiché si utilizza la tecnologia del film sottile, ed il materiale stesso, anche in virtù della quantità ridotta, sono più economici rispetto al silicio, il che rende questo materiale molto interessante per il futuro. Il record di efficienza delle celle CdTe è attualmente 17,3%, mentre il modulo in commercio a più alta efficienza vanta un valore superiore al 14%. Sebbene il cadmio sia un elemento

tossico allo stato gassoso, e che necessita di attenzione durante i processi produttivi, una volta associato al tellurio risulta molto stabile e sicuro.

Il **diseleniuro di rame-indio-gallio**, CIGS (Copper Indium Gallium Selenide), è un altro composto chimico semiconduttore utilizzato con la tecnologia del film sottile. La sua formula chimica è $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ dove x è un numero compreso tra 0 e 1. Nel caso in cui x sia uguale ad 1 si ha diseleniuro di rame-indio puro (CIS), mentre se x è nullo si ha diseleniuro di rame-gallio puro (CGS). È necessario, durante la produzione, prestare attenzione a sigillare accuratamente i moduli perché questo materiale risente dell'umidità e del calore, ma non subisce alcun degrado a causa della radiazione solare, come avviene per il silicio amorfo. Le celle CIGS hanno un record di efficienza del 20,3%, mentre la più alta efficienza finora registrata di un modulo completo è circa 14%. La produzione in serie di questa tecnologia, se realizzata, dovrebbe risultare più economica rispetto al silicio cristallino. Infine, il pericolo derivante dalla tossicità del selenio può essere trascurato in virtù del modesto contenuto di questo elemento nelle celle CIGS.

APPROFONDIMENTO: Efficienza limite di una cella fotovoltaica

La conoscenza del limite teorico di efficienza di una cella solare costituisce un argomento di fondamentale importanza all'interno della ricerca sul fotovoltaico, sia per comprendere quali sono i materiali più prestanti e in che modo occorre modificarli per questa applicazione, sia per conoscere i margini di miglioramento possibili.

Un importante studio sull'argomento fu condotto negli anni '60 da William Shockley e Hans Queisser⁽¹⁾, col quale si concluse che l'efficienza di una cella solare a giunzione singola è massima se l'energy gap ha un valore di 1,1 eV; in tal caso l'efficienza è del 31%.

Successivi studi che tennero in considerazione il reale spettro solare AM1.5G incidente su di una cella solare ed altri fattori corressero questo valore a 33,7%, per un valore dell'energy gap di 1,1 eV. L'andamento dell'efficienza di una cella solare a giunzione singola in funzione dell'energy gap è rappresentato in figura 30.

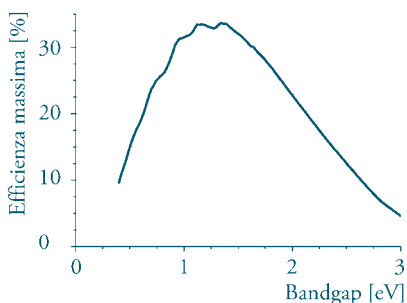


Fig. 30. – Grafico del limite di efficienza di una cella solare a giunzione singola (limite di Shockley-Queisser) in funzione del bandgap (fonte: <http://sjbyrnes.com/sq.pdf>).

⁽¹⁾ W. Shockley, H. J. Queisser, *Detailed Balance Limit of Efficiency of pn Junction Solar Cell*, J. Appl. Phys., 32, 510 (1961).

Il superamento di questo limite, noto come *limite di Shockley-Queisser*, è possibile utilizzando celle costituite da più giunzioni $p-n$, note appunto come *celle multigiunzione*.

La differenza fondamentale tra le comuni celle al silicio e le celle multigiunzione consiste nel collegamento in serie di più giunzioni $p-n$, aventi degli energy gap tali da coprire una banda dello spettro solare più ampia possibile. In figura 31 è rappresentato un confronto tra una cella a giunzione singola ed una a tripla giunzione: si osserva come la seconda sia sensibile ad una porzione più ampia dello spettro solare. La Tabella V riassume i risultati di un recente studio sull'efficienza limite di una cella solare in funzione del numero di giunzioni.

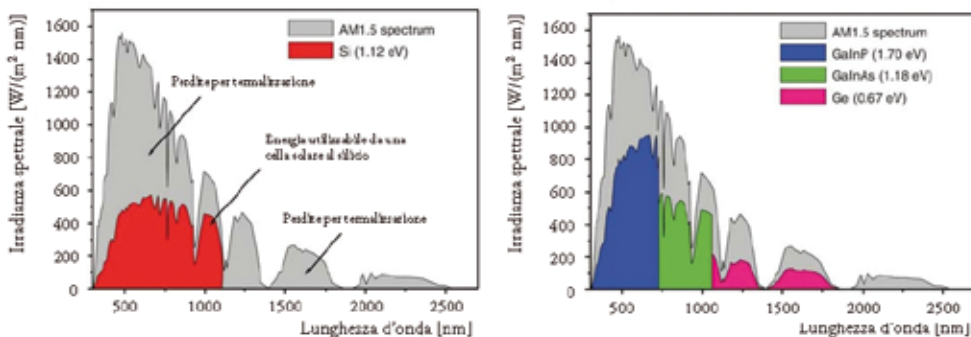


Fig. 31. – Confronto della risposta allo spettro solare AM1.5G (in grigio) tra una cella al silicio (curva rossa in figura a sinistra) e una a tripla giunzione (curve a colori nella figura a destra). Si nota che il maggior numero di giunzioni permette alla cella di raccogliere una porzione più ampia dello spettro solare.

Tabella V. – Limite teorico di efficienza di una cella solare al variare del numero di giunzioni $p-n$ di cui è costituita. (fonte: S. P. Bremner *et al.*, *Analysis of Tandem Solar Cell Efficiencies Under AM1.5G Spectrum Using a Rapid Flux Calculation Method*, Prog. Photovolt. Res. Appl., 16, 225–233 (2008)).

# giunzioni	Limite teorico di efficienza [%]
1	33,7
2	45,7
3	51,6
4	55,3
5	57,6
6	59,4
7	60,8
8	61,4

L'aumento del numero di giunzioni non è però proporzionale all'efficienza massima della cella solare: all'aumentare del numero di giunzioni l'aumento dell'efficienza è sempre più esiguo. Esiste quindi un punto di incrocio tra l'efficienza massima di una cella solare e le difficoltà tecniche incontrate nella sua realizzazione che costringe a scegliere un determinato numero di giunzioni come tecnologia ottimale da sviluppare. Il mondo della ricerca sulle

celle multi giunzione ha scelto come compromesso le celle a tripla giunzione III-V (3J), le quali sono le celle a più alta efficienza finora prodotte e disponibili sul mercato. Esse sono così chiamate perché gli elementi di cui sono composte due delle tre giunzioni appartengono ai gruppi III e V della tavola periodica. La giunzione superiore è composta da fosforo di gallio e indio (InGaP , $E_g = 1,8 \text{ eV}$), quella centrale di arseniuro di gallio e indio (InGaAs , $E_g = 1,4 \text{ eV}$) e quella inferiore di germanio (Ge , $E_g = 0,65 \text{ eV}$). L'ordine col quale queste giunzioni sono disposte è dettato dal fatto che la giunzione con energy gap minore non deve essere la prima ad essere attraversata dalla radiazione solare, per evitare che assorba la radiazione destinata alle giunzioni con energy gap superiori. Nel caso delle celle a tripla giunzione è possibile modificare l'energy gap di una giunzione agendo sulle percentuali di elementi dei gruppi III e V che la compongono. In figura 32 sono riassunte le caratteristiche tecniche delle celle 3J attualmente prodotte: il grafico dell'efficienza quantica mostra come le tre giunzioni siano calibrate in modo da raccogliere la maggior porzione possibile di spettro solare.

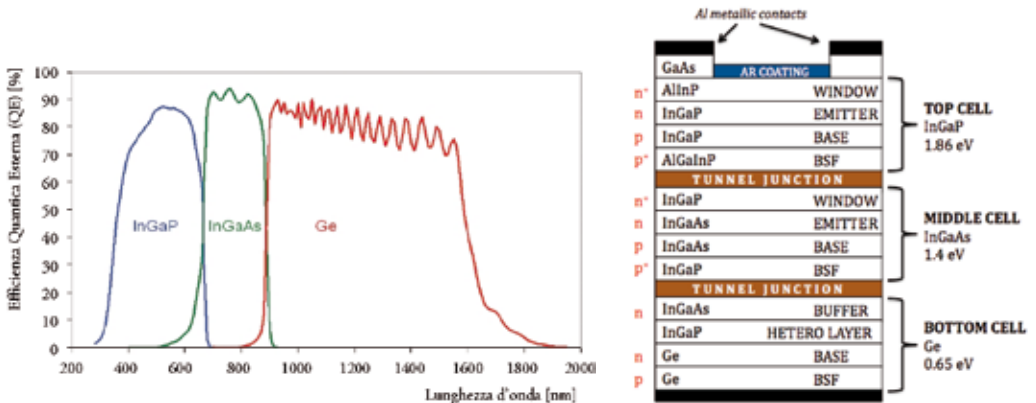


Fig. 32. – Caratteristiche tecniche di una cella solare a tripla giunzione (3J) III-V). Sinistra: efficienza quantica. Destra: struttura della cella, nella quale si vede l'ordine col quale vengono disposte le tre giunzioni $p-n$ (fonte: www.emcore.com).

Le diverse tecnologie fotovoltaiche, siano esse a giunzione singola o multipla, a base di silicio monocristallino, policristallino o amorfo, o ancora celle organiche, possono essere tra loro confrontate usando come termine di paragone la loro efficienza massima registrata in laboratorio. A questo scopo figura 33 raccoglie i grafici dell'andamento dei record di efficienza delle varie tecnologie fotovoltaiche ed è ben evidente come le celle a tripla giunzione abbiano la più alta efficienza finora registrata e al tempo stesso siano una delle tecnologie con maggior tasso di crescita.

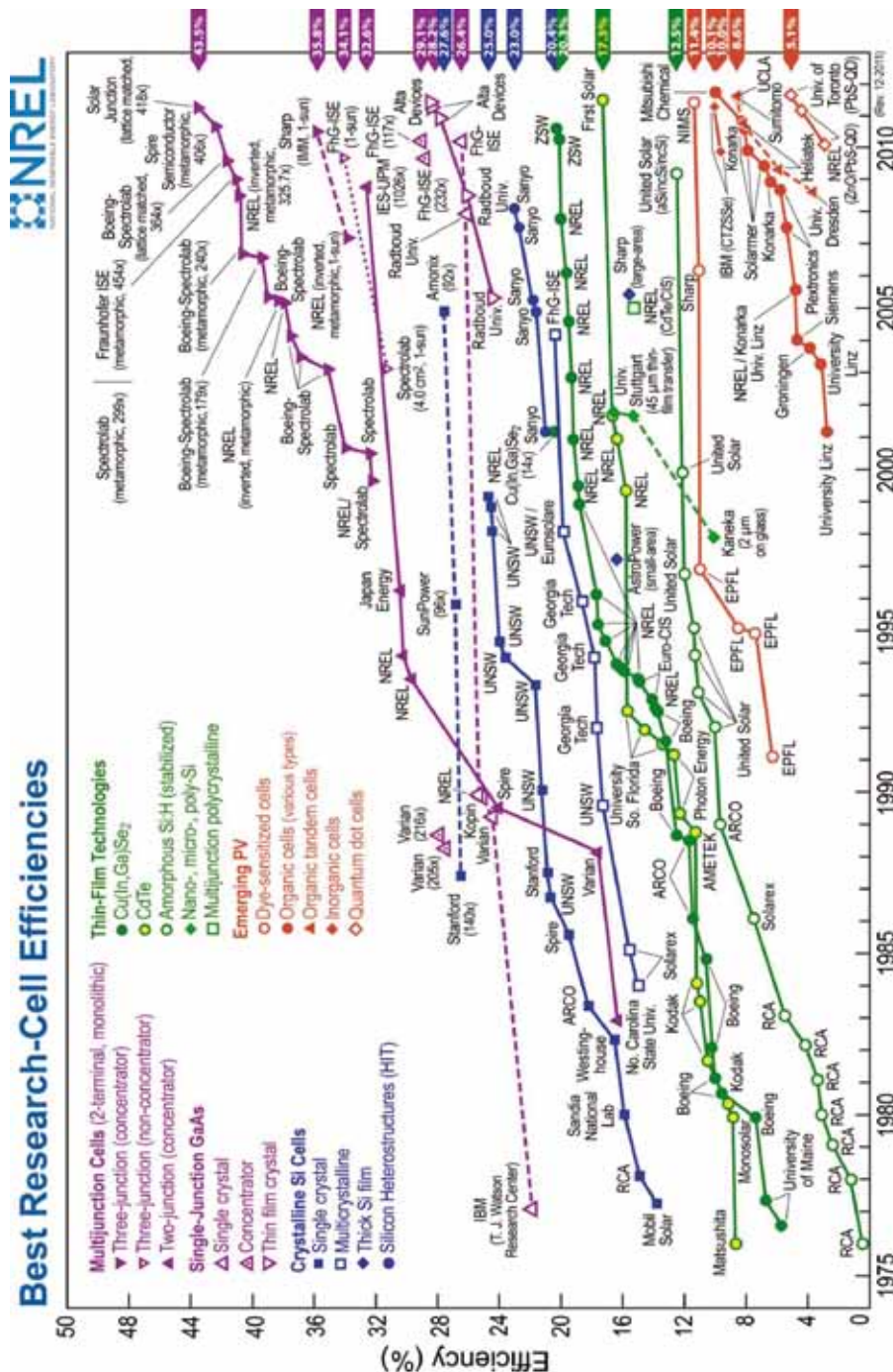


Fig. 33. – Andamento della massima efficienza registrata in laboratorio per le diverse tecnologie fotovoltaiche, suddivise in quattro grandi categorie: celle multi giunzione, con giunzione in silicio cristallino, thin film e tecnologie emergenti (fonte: www.nrel.gov).

2.3.2 Fotovoltaico a concentrazione

L'idea alla base dello sviluppo di sistemi fotovoltaici a concentrazione è la riduzione dei costi di produzione di energia elettrica. La strategia per il raggiungimento di questo obiettivo consiste primariamente nella riduzione della quantità di semiconduttore utilizzato. Molte aziende stanno investendo nello sviluppo di tecnologie a film sottile installate su supporti a basso costo.

Il fotovoltaico a concentrazione (CPV, Concentrated Photovoltaics) segue un approccio complementare ed utilizza sistemi ottici (specchi o lenti) per concentrare la radiazione solare su delle piccole celle. Col termine “fattore di concentrazione” si intende il rapporto tra l'irraggiamento (potenza per unità di superficie) di una cella solare, illuminata concentrando la radiazione, e l'irraggiamento della stessa esposta direttamente al Sole in condizioni standard (precisamente 850 W/m^2 , temperatura ambiente $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Ad esempio una cella di 1 cm^2 illuminata con una potenza di 20 W ha un fattore di concentrazione $235\times$ (in condizioni standard riceverebbe una potenza di $0,085 \text{ W/cm}^2$). Come accennato nell'approfondimento sull'efficienza limite di una cella fotovoltaica, il numero di giunzioni di cui una cella solare è composta stabilisce un limite teorico di efficienza. Concentrando la radiazione solare sulla cella è possibile aumentare questo limite. Ad esempio concentrando 1000 volte la radiazione sulla cella a giunzione singola si raggiunge un limite del 37%. Il limite teorico per una cella a tripla giunzione, con concentrazione $1000\times$, è invece 56%⁽¹²⁾ mentre nel caso fosse possibile realizzare una cella con un numero infinito di giunzioni si potrebbe raggiungere al massimo l'87% di efficienza.

L'idea di concentrare la radiazione solare sulle celle fotovoltaiche, col conseguente spostamento della spesa dalle celle al sistema di concentrazione, è di per sé molto semplice ma innesca delle sfide tecnologiche di non facile risoluzione. È dalla metà degli anni '70 che hanno iniziato a svilupparsi alcuni progetti di CPV. L'idea della concentrazione della radiazione solare è, però, diventata commerciabile solo negli ultimi 5-10 anni, grazie alla forte diminuzione del costo delle celle a tripla giunzione, aventi un'elevata efficienza e in grado di mantenere elevato questo rendimento anche ad altissime concentrazioni (fino a $2000\times$).

I sistemi di fotovoltaico a concentrazione sono costituiti da moduli che funzionano come dei piccoli telescopi, in grado di puntare direttamente il Sole e di concentrarne la radiazione su di una piccola superficie. Questi sistemi “vedono” quindi solo il Sole e una piccola porzione di cielo ad esso adiacente.

La prima e sostanziale differenza tra fotovoltaico tradizionale (PV) e fotovoltaico a concentrazione (CPV) consiste quindi nel fatto che il primo sfrutta la radiazione globale, mentre il secondo quella diretta. Utilizzando celle solari a tripla giunzione ad altissima efficienza e dei materiali a basso costo (lenti in plexiglass, vetri e specchi) per concentrare la radiazione solare, il fotovoltaico a concentrazione appare come una rivoluzione rispetto al fotovoltaico tradizionale (figura 34). Il principale svantaggio dei sistemi CPV consiste nel fatto che i moduli, ricevendo solo la radiazione diretta, devono essere montati su degli inseguitori, in grado di puntare il Sole con una certa precisione.

⁽¹²⁾ Al momento il record di efficienza di una cella a tripla giunzione appartiene ad una cella del tipo GaInP/GaInAs/Ge con il 42,3% (con concentrazione $406\times$ della radiazione solare) (fonte: www.nrel.gov).

Il fotovoltaico a concentrazione è una tecnologia ancora giovane ma che promette, entro pochissimi anni, di superare ampiamente il fotovoltaico tradizionale, soprattutto in quelle località nelle quali la componente diretta della radiazione solare è molto intensa (zone con cieli molto limpidi).

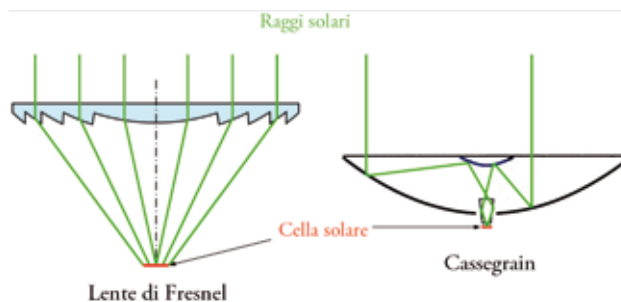


Fig. 34. – Schemi ottici dei più comuni sistemi di fotovoltaico a concentrazione. La radiazione solare viene concentrata per mezzo di una lente (sinistra) o di un sistema di specchi (destra) su di una cella solare (in rosso in figura). Spesso viene posto un prisma appena davanti alla cella per raccogliere meglio i raggi periferici (come mostrato nella figura a destra).

2.3.3 Celle organiche

È interessante notare come la natura fornisca all'uomo nuovi spunti per migliorare: consideriamo ad esempio la fotosintesi clorofilliana. Questo processo attivo nelle piante sfrutta di fatto l'energia del Sole per trasformare acqua e anidride carbonica in glucosio e ossigeno. Se si riuscisse a riprodurre un processo analogo per sfruttare l'energia del Sole ed ottenere prodotti finali differenti, come l'energia elettrica, sarebbe un'enorme conquista. L'obiettivo di creare celle solari organiche a base di clorofilla è infatti allo studio in molti centri di ricerca in tutto il mondo. Esistono già alcuni prototipi di celle solari a base organica, che però, purtroppo, non superano un'efficienza di laboratorio del 10%, che corrisponde ad un'efficienza effettiva del 5%.

Altri composti organici, come i pigmenti del mirtillo o l'emoglobina (la proteina dei globuli rossi che trasporta l'ossigeno), vengono utilizzati per sperimentare celle solari di nuova generazione, ma i risultati, per il momento, sono analoghi al caso della clorofilla.

Nella maggior parte dei casi, si utilizza una base di ossido di titanio, un ingrediente comune e non tossico che si trova in innumerevoli prodotti, come dentifrici, vernici idrosolubili per interni e creme solari, combinandolo con i composti naturali appena visti.

Un altro fattore interessante viene dalla facilità con cui si potrebbero produrre le nuove celle, non solo perché i materiali sarebbero sempre disponibili, ma anche per via dei costi ridotti di produzione: i composti organici si possono infatti utilizzare come fossero inchiostri e le normali tecniche di stampa a getto sarebbero sufficienti per depositare la piccola quantità necessaria di materiale attivo sulla superficie scelta come supporto (figura 35). Il processo sarebbe di gran lunga più economico di quello usato per la produzione delle attuali celle al silicio, ma al momento, oltre ai problemi di efficienza, la cella organica presenta anche problemi di stabilità nel tempo. Ciononostante, la ricerca in questo settore appare promettente

e non è escluso che ci riservi delle piacevoli sorprese.

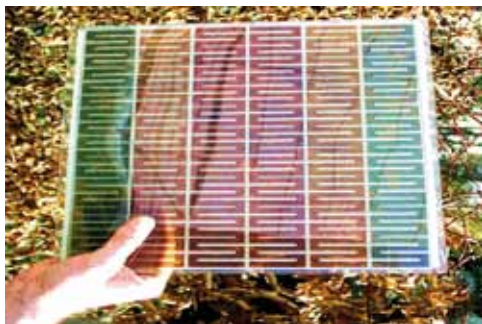


Fig. 35. – Celle organiche ottenute con coloranti naturali (fonte: <http://www.solarisnano.com/solarenergy.php>).

APPROFONDIMENTO: Introduzione ai dispositivi fotonici

I dispositivi fotonici sono quegli strumenti per i quali i fotoni giocano un ruolo fondamentale nel loro funzionamento. I dispositivi fotonici possono essere divisi in tre categorie: dispositivi in grado di convertire l'energia elettrica in radiazione (ad esempio LED e diodi laser), dispositivi in grado di rivelare un segnale luminoso (*photodetector*) e infine dispositivi in grado di convertire la radiazione in energia elettrica (cella solare). Poiché quest'ultima tecnologia verrà largamente descritta nei restanti capitoli, vengono qui di seguito presentati alcuni dispositivi catalogabili nelle prime due categorie

I LED

L'elemento fondamentale di un LED (Light-Emitting Diode) è, come per le celle solari, la giunzione *p-n*. Illuminando una giunzione *p-n* e collegandovi ai capi un utilizzatore, nel circuito scorre una corrente elettrica. È possibile invertire il processo, applicando dall'esterno una differenza di potenziale che riduca la barriera della regione di svuotamento. Diminuendo questa barriera si innescano dei processi di ricombinazione degli elettroni liberi e delle lacune il cui effetto è il rilascio di energia sotto forma di fotoni aventi un'energia uguale a quella dell'energy gap. Il gap energetico della giunzione stabilisce la lunghezza d'onda, e quindi il colore, della radiazione emessa.

Osservando la Tabella IV e sapendo che un fotone avente un'energia di 1 eV ha una lunghezza d'onda di 1242 nm, è possibile realizzare dei led che emettano radiazione visibile (nel range 380–780 nm) utilizzando dei semiconduttori aventi un'energy gap di circa 2 eV.

A seconda della quantità e del tipo di drogante, che ne modifica l'energy gap, con il fo-

sfuro di gallio (GaP) possono essere realizzati led di svariati colori. Nel caso in cui non venga drogato, il fosforo di gallio serve per realizzare dei led verdi: ad un'energy gap di 2,26 eV corrisponde una lunghezza d'onda di 550 nm. La struttura di un LED è rappresentata in figura 36: il semiconduttore è alloggiato in una superficie concava riflettente in modo da direzionare la luce emessa; il tutto è poi inserito in una copertura trasparente.

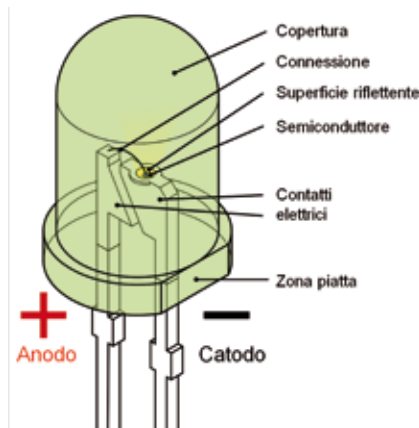


Fig. 36. – Struttura di un LED. Una giunzione $p-n$ è alimentata in modo che, per mezzo della ricombinazione di elettroni e lacune, vengano emessi fotoni aventi un'energia pari a quella dell'energy gap. La giunzione è inserita in una cavità riflettente, in modo da direzionare i fotoni prodotti (fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Led>).

Gli esposimetri delle fotocamere reflex: i fotodiodi

Poiché una giunzione $p-n$ fornisce una corrente proporzionale all'intensità della radiazione su di essa incidente, è possibile usare questa proprietà per costruire dei dispositivi in grado di misurare la quantità di luce incidente su di una certa superficie.

In figura 37 è mostrata la sezione di una fotocamera reflex: la luce proveniente dal soggetto inquadrato passa attraverso le lenti dell'obiettivo e, dopo una serie di riflessioni, può essere osservata attraverso il mirino. La prima riflessione che la luce subisce è dovuta ad uno specchio ribaltabile semiriflettente: parte della luce vi passa attraverso e, dopo una serie di riflessioni, raggiunge la parte inferiore della fotocamera dove è posto un sensore per mettere a fuoco automaticamente l'immagine (sistema AutoFocus, o AF). La porzione della luce riflessa verso un pentaprisma viene in gran parte riflessa verso l'oculare, dal quale il fotografo ha la possibilità di inquadrare la scena. Una parte di questa luce viene indirizzata verso un sensore esposimetrico costituito quasi sempre da un fotodiodo al silicio. Per effetto fotovoltaico viene prodotta una corrente proporzionale alla quantità di radiazione incidente. Tale segnale viene elaborato dalla fotocamera e mostrato su una scala graduata, la quale indica al fotografo se l'apertura del diaframma e il tempo di esposizione scelti permettono di ottenere una foto esposta in modo corretto.

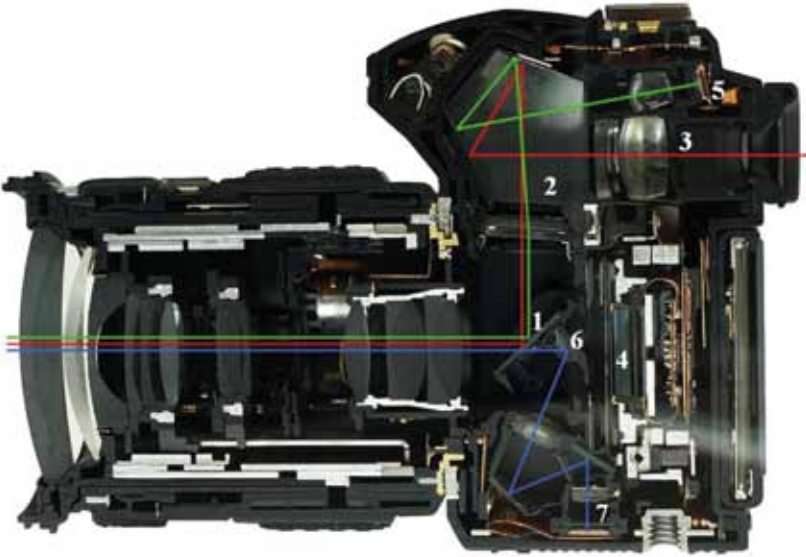


Fig. 37. – Sezione di una fotocamera reflex. 1. specchio reflex, 2. pentaprisma, 3. mirino oculare, 4. sensore d'immagine CCD o CMOS, 5. sensore espositivo, 6. sub-specchio AutoFocus (AF), 7. sensore AF.

3. DALLA GIUNZIONE *p-n* ALL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO

La realizzazione delle celle fotovoltaiche richiede processi produttivi a volte anche molto complessi. Le tecnologie attualmente più diffuse e consolidate sono quelle basate sulle celle al silicio. In questo capitolo ci si concentra quindi sulle tecniche di produzione di moduli fotovoltaici basati su celle solari composte da silicio monocristallino (c-Si), policristallino (p-Si) o amorfo (a-Si) (figura 38).

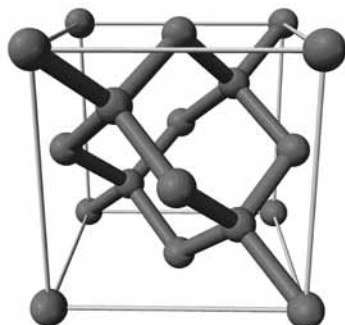


Fig. 38. – Il silicio nella sua forma cristallina ha una struttura identica a quella cubica tipica del diamante: ogni atomo di silicio è in grado di formare quattro legami covalenti con altrettanti atomi di silicio (fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon>).

Il grande successo di questo tipo di celle solari è da ricercarsi in una serie di fattori favorevoli, primo fra tutti la curva di efficienza quantica del silicio (vedi figura 28), in grado di coprire una buona parte dello spettro solare. Il silicio è inoltre il secondo elemento più abbondante, dopo l'ossigeno, nella crosta terrestre (essa è infatti composta per il 28% circa, sia in termini di volume che di massa, da silicio) e questo è uno dei motivi che ha condotto l'industria dei semiconduttori ad investire in questa tecnologia. Una basilare differenza tra l'industria dei circuiti elettronici integrati e quella delle celle solari consiste nel fatto che la prima necessita di semiconduttori monocristallini ad elevatissima purezza mentre la seconda può accontentarsi di livelli di purezza più modesti.

A seconda del livello di purezza, è possibile distinguere tre classi di silicio:

- silicio di grado metallurgico: un'impurità ogni 10^2 atomi di silicio,
- silicio di grado solare: un'impurità ogni 10^6 – 10^8 atomi di silicio,
- silicio di grado elettronico: un'impurità ogni 10^9 – 10^{11} atomi di silicio.

3.1 Tecniche di produzione dei pannelli fotovoltaici

3.1.1 Purificazione del silicio e crescita dei cristalli

Per ottenere il silicio adatto all'industria dei semiconduttori si parte da sabbia di rocce silicee e quarzose. Il primo processo consiste nella riduzione del silicio in una reazione ad alta temperatura. La tecnica sviluppata per trasformare silice (SiO_2) in silicio (Si) è la carboriduzione: in forni ad arco sommerso ad una temperatura di circa 2000 K, quindi ben superiore a quella di fusione del silicio (1687 K), si ha la reazione



La sabbia e i cristalli di quarzite vengono sistemati in un crogiolo di grafite; il crogiolo viene inserito in una camera (la “carcassa” del forno) e al suo interno vengono immersi due elettrodi di grafite; durante il funzionamento si crea un arco elettrico sommerso e il silicio liquido che si forma cola, attraverso un opportuno becco, in una lingottiera dove poi solidifica in silicio di grado metallurgico. Questo presenta una percentuale di impurità eccessive per cui viene eseguita una seconda reazione, la quale prende il nome di “processo Siemens” (figura 39).

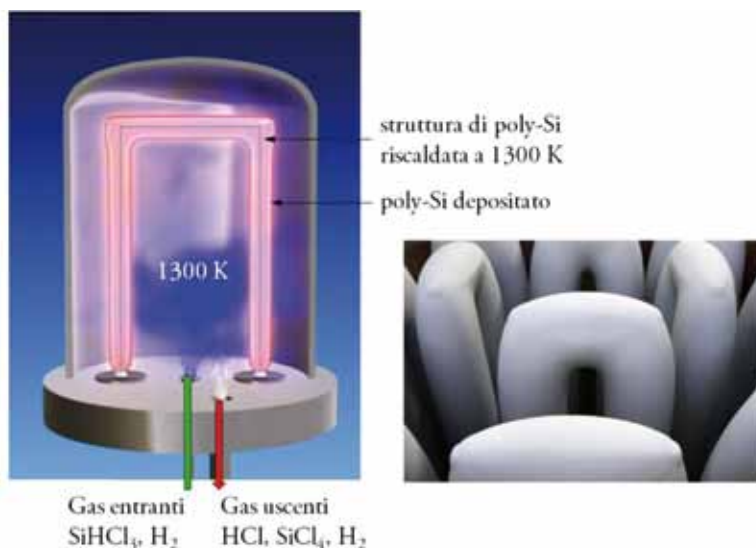
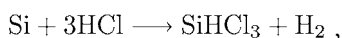
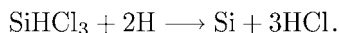


Fig. 39. – Processo Siemens: deposizione degli atomi di silicio contenuti nella molecola di silano (SiHCl_3) su di una barra di silicio ultrapuro in ambiente posto a circa 1300 K (fonti: <http://www.schott.com>, <http://www.analyticjournal.de/>).

I blocchi di silicio metallurgico vengono inseriti in un reattore particolare, nel quale viene immesso acido cloridrico (HCl) in forma gassosa. Avviene così la reazione



nella quale vengono prodotti idrogeno e triclorosilano. Il triclorosilano (aeriforme) fluisce in un filtro e poi in un reattore CVD (Chemical Vapor Deposition). Qui, tramite l'immissione di H_2 , avviene la deposizione del silicio su delle barre di silicio policristallino ultrapuro, portate ad una temperatura di circa 1300 K, secondo la reazione



Le barre di silicio policristallino così ottenute, che possiedono un livello di purezza tale da poter essere classificate come silicio di grado solare, vengono successivamente triturate e fuse (*melt*). Esse possono quindi andare incontro ad un ulteriore processo di purificazione e di solidificazione sotto forma di monocristalli, oppure possono essere usate per ottenere dei wafer di silicio policristallino. Questa seconda possibilità può essere realizzata applicando due differenti processi.

Il **processo casting** (figura 40), detto anche solidificazione direzionale, consiste nella solidificazione del silicio fuso in forma di parallelepipedo. Questo processo avviene con tempi troppo rapidi e con una modalità inadeguata ai fini della realizzazione di un unico monocristallo. Il blocco di silicio policristallino così solidificato viene quindi tagliato in parallelepipedi aventi una sezione uguale a quella delle celle solari che si vorrà ottenere.

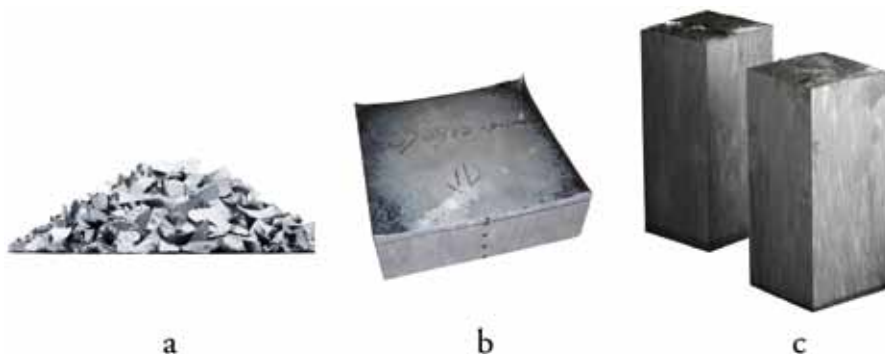


Fig. 40. – Processo casting: il silicio di grado solare (a) ottenuto dal processo Siemens viene fuso e solidificato in forma di parallelepipedi (b), dai quali vengono tagliati dei blocchi a base quadrata (c).

Il **processo EFG** (Edge-defined Film-fed Growth – crescita di film di silicio a bordo predefinito) consiste nella solidificazione del *melt* di silicio all'interno di una corona ottagonale o dodecagonale, avente uno spessore coincidente con quello delle celle finite. Le facce di questa struttura poligonale vengono quindi tagliate tramite un laser in wafer delle dimensioni desiderate.

Oltre a questi due processi appena descritti, è possibile trattare il silicio ottenuto dal processo Siemens al fine di ottenere dei wafer di silicio monocristallino. Anche in questo caso le tecniche utilizzate possono essere due.

Il **processo Czochralsky** (metodo CZ) (vedi figura 41) consiste nel sollevamento a bassissima velocità di un seme di silicio monocristallino, immerso inizialmente per pochi millime-

tri in un crogiolo contenete silicio puro fuso. Il semiconduttore nel crogiolo è mantenuto ad una temperatura di pochi gradi superiore a quella di fusione del materiale; il silicio, aderendo al seme monocristallino che gradualmente viene estratto dalla massa fusa, solidifica molto rapidamente conservando la struttura monocristallina del seme a cui si lega. Il controllo rigoroso della temperatura del materiale fuso, dell'atmosfera nella camera e della velocità di estrazione, nonché l'assenza assoluta di vibrazioni, permette la produzione di campioni perfettamente cilindrici e altamente puri.

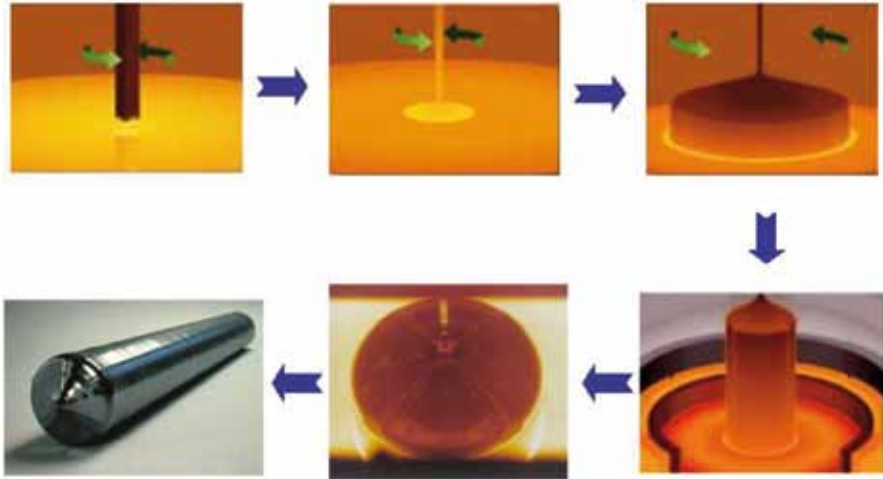


Fig. 41. – Processo Czochralsky: un germe di silicio monocristallino viene immerso in un *melt* di silicio fuso; estraendo lentamente il germe, gli atomi di silicio del *melt* aderiscono al germe ereditandone la struttura cristallina. Controllando con meccanismi di controreazione (feedback) la temperatura del silicio fuso, il suo peso, le velocità di rotazione ed estrazione del germe è possibile ottenere dei cilindri perfettamente monocristallini (fonte: http://www.fullman.com/semiconductors/_crystalgrowing.html).

Nel **processo float zone** (metodo FZ) (vedi figura 42) un cilindro di silicio policristallino viene calato verticalmente entro una zona nella quale è presente un campo magnetico di intensità tale da indurre delle correnti elettriche all'interno del materiale. Per effetto Joule il cilindro di silicio si scalda fino a fondere. Nel lento processo di raffreddamento gli atomi hanno modo di disporsi in modo da formare un unico monocristallo. Oltre alla capacità di produrre dei cilindri di silicio monocristallino, il processo *float zone* permette anche di aumentare il livello di purezza del materiale: sfruttando il fatto che il silicio e le impurità in esso presenti fondono a temperature differenti, durante il processo float zone le impurità vengono quasi completamente confinate nella parte finale del cilindro formatosi, le quali possono quindi essere facilmente rimosse. Questo processo può chiaramente essere ripetuto più volte, al fine di ottenere dei monocristalli di silicio estremamente puri. I problemi del metodo float zone sono quelli correlati al collasso della zona fusa che rimane compatta e solidale al solido grazie unicamente alle forze di tensione superficiale del fuso. Per questo motivo il diametro tipico dei cilindri ottenuti con il metodo FZ è 20 mm. Con metodi molto sofisticati si possono però raggiungere diametri di 150 mm.

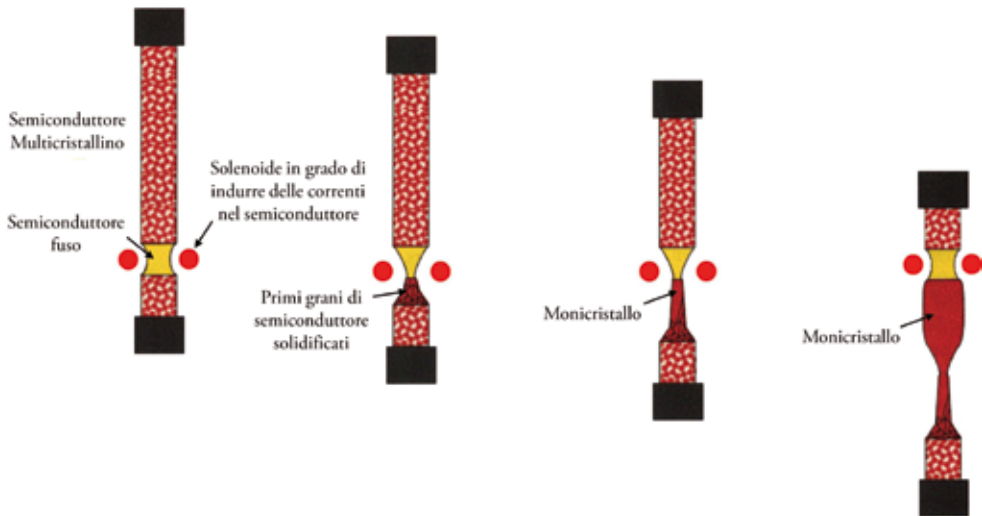


Fig. 42. – Processo float zone: un cilindro di semiconduttore mono o poli cristallino viene calato attraverso un solenoide in grado di generare nel semiconduttore delle correnti indotte tali da liquefare il semiconduttore stesso. Il risultato del processo è un cilindro, avente un diametro massimo di 150 mm, perfettamente monocristallino. L'utilità di processare cilindri monocristallini consiste nella purificazione del semiconduttore (fonte: <http://people.ccmr.cornell.edu/~dieck/xtalgrowth.jpg>).

Una volta ottenuto il materiale semiconduttore, sia esso silicio mono o poli cristallino, si prosegue con il processo di *wafering* il quale, come dice il nome stesso, è volto ad ottenere delle sezioni molto sottili, dette *wafer*, di silicio. La prima fase del wafering consiste in un “ritaglio” (o *cropping*) del blocco: nel caso dei processi CZ e FZ vengono tagliate le due estremità del cilindro mentre nel caso del processo *casting* il blocco di polisilicio viene levigato fino ad assumere la forma di un parallelepipedo. Nella seconda fase del wafering, detta *squaring*, si ricavano dei blocchi aventi una sezione uguale a quella delle celle che si intenderà ottenere. Per finire, questi blocchi a base quadrata vengono “affettati” (*slicing*) in wafer aventi spessori di 180–240 μm (figura 43).

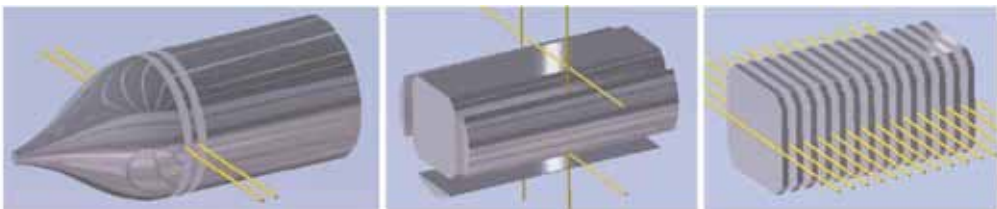


Fig. 43. – Tre fasi del processo di taglio (o wafering) di un blocco di silicio mono o poli cristallino: cropping, squaring e slicing (fonte: <http://www.appliedmaterials.com/>).

Le tecniche usate per tagliare in wafer i blocchi a base quadrata utilizzano un disco rotante con lama diamantata oppure dei cavi metallici sottilissimi che, strofinando contro il semiconduttore, riescono a tagliarlo con grande precisione. Nel taglio con il disco rotante

quasi la metà del semiconduttore viene perso: i dischi più sottili attualmente utilizzati hanno infatti uno spessore paragonabile allo spessore del wafer. Il silicio eliminato durante il taglio viene successivamente raccolto e fuso nel melt del processo casting o CZ. La seconda tecnica di taglio è da molti preferita rispetto a quella con lama rotante poiché permette di perdere meno materiale: i cavi utilizzati hanno infatti un diametro di circa $120\ \mu\text{m}$, che è la metà dello spessore tipico di un wafer. Il reale responsabile del taglio non è però il cavo stesso, bensì un composto semi-liquido (*slurry*) contenente carburo di silice e glicole nel quale il cavo si trova immerso e che trasporta facendolo strofinare sul semiconduttore. Come rappresenta lo schema di figura 44, il cavo viene posizionato in modo da formare una rete per mezzo della quale si possono ottenere in breve tempo numerosi wafer; il cavo, che viene fatto scorrere all'interno del sistema ad una velocità che può essere compresa tra 5 e 25 m/s, subisce degli attenti controlli, volti soprattutto a valutare che non si assottigli troppo. Anche in questo processo un'elevata percentuale di materiale semiconduttore viene sbriciolata e successivamente riutilizzata per creare altri lingotti.

I wafer così ottenuti sono successivamente sottoposti a diversi lavaggi per rimuovere il composto di glicole e carburo di silicio, asciugati con aria compressa ed infine catalogati in base a diversi parametri – forma dimensione, proprietà della superficie, spessore, fratture – e solo quelli che risultano idonei passano alla fase successiva del processo.

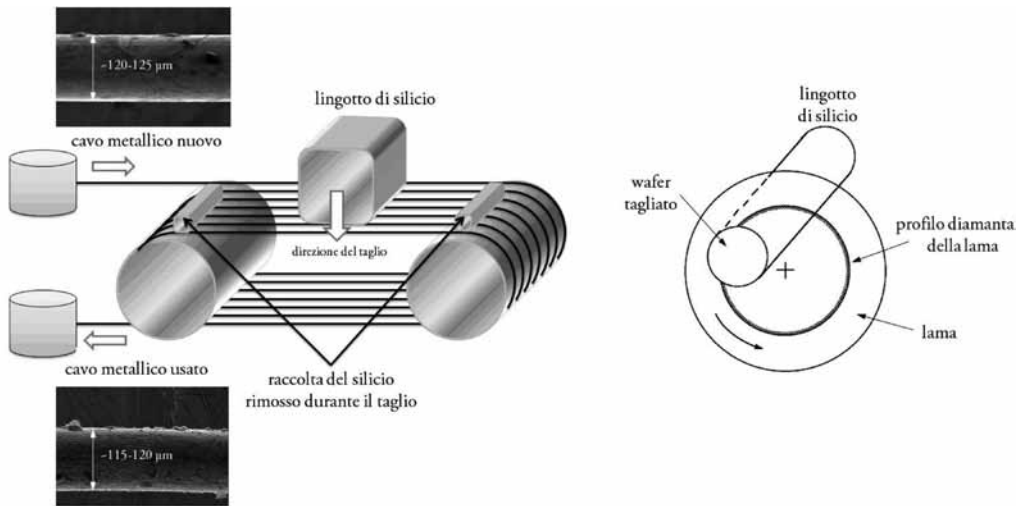


Fig. 44. – Tecniche di taglio dei blocchi di silicio mono e poli cristallino, a sinistra per mezzo di un sistema di cavi micrometrici mentre a destra tramite l'ausilio di una lama circolante con profilo diamantato (fonte: www.pv-tech.org).

Per concludere il discorso delle tecnologie di produzione delle celle fotovoltaiche basate sul silicio, il caso del silicio amorfo richiede un discorso separato rispetto a quello finora fatto in merito al silicio mono e poli cristallino. Il silicio amorfo è delle tre tecnologie la più economica, ma anche la meno efficiente. La sua tecnica di produzione consiste in una semplice deposizione del silano (SiH_4) su lastre di vetro o plastica per mezzo del processo CVD (Chemical Vapour Deposition). Gli svantaggi del silicio amorfo sono gli stessi del si-

licio policristallino, ma più accentuato. Un metodo adottato frequentemente per diminuire le imperfezioni del silicio amorfo è la passivazione della superficie mediante idrogeno, cioè la diffusione di atomi di idrogeno entro il silicio, aventi lo scopo di occupare le frequenti lacune dovute alla struttura amorfa, cioè con reticolo cristallino disordinato. Le frequenti lacune all'interno di un semiconduttore, infatti, rendono poco efficiente la diffusione degli elettroni entro la cella poiché questi avrebbero modo di ricombinarsi nel corso della loro diffusione verso la regione di svuotamento. A differenza delle tecnologie basate sul silicio mono o poli cristallino, con le quali come si è visto si realizzano wafer aventi uno spessore di circa 200 μm , il silicio amorfo richiede la deposizione di uno strato di appena 1–2 μm (figura 45).

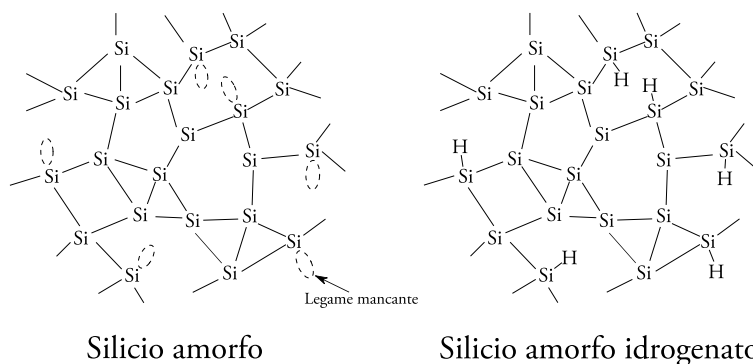


Fig. 45. – La rapida deposizione di uno strato molto sottile (1–2 μm) di silicio crea una struttura amorfa. Le molte lacune di legami, che limitano il flusso di corrente all'interno del semiconduttore, vengono occupate tramite un processo di idrogenazione.

3.1.2 Introduzione alle tecniche di drogaggio delle celle solari

Come anticipato nel paragrafo 2.2, una cella fotovoltaica è composta da una giunzione p - n , cioè da un semiconduttore drogato di tipo p e di tipo n . Non è però possibile ottenere una giunzione p - n semplicemente mettendo a contatto due semiconduttori, uno di tipo p , l'altro di tipo n : la discontinuità del reticolo cristallino all'interfaccia fra le due parti conterrebbe troppe imperfezioni che ne impedirebbero il funzionamento. La zona p e la zona n devono essere contigue nello stesso monocristallo. In un processo di drogaggio occorre quindi stabilire il semiconduttore da drogare, l'elemento drogante di tipo n e quello di tipo p , le loro concentrazioni e la profondità della giunzione. Quest'ultima grandezza è definita come la distanza tra la faccia anteriore della cella fotovoltaica (quella esposta alla radiazione) e l'interfaccia tra le zone p ed n .

Una prima tecnica di drogaggio consiste nella crescita di un cristallo di un semiconduttore non puro ma già drogato. Il semiconduttore fuso, contenente delle impurità, viene fatto cristallizzare secondo le tecniche descritte nel paragrafo precedente (casting, EFG, CZ, FZ). Il risultato è un semiconduttore contenente una densità di atomi droganti molto omogenea.

A partire da questo semiconduttore drogato, ad esempio, di tipo p possono essere inserite delle impurità donori. La *concentrazione netta* dei portatori di carica è

$$(27) \quad N = N_D - N_A$$

con N_D concentrazione di atomi donori e N_A concentrazione di atomi accettori. Si può in questo modo creare un sottile strato drogato di tipo n . In questo caso si dice che si è operata un'inversione di drogaggio per *sovracompensazione*.

Una diffusa tecnica attraverso la quale si inseriscono impurità di tipo opposto è detta *diffusione*. Questa tecnica consiste nel porre il semiconduttore drogato, ad esempio di tipo p drogato con boro, in un ambiente ad elevata temperatura (tipicamente 800–1000 °C) immerso in un gas contenente, ad esempio, fosforo. Il materiale viene lasciato all'interno del forno il tempo necessario per permettere agli atomi di fosforo di penetrare all'interno del semiconduttore fino alla profondità desiderata. Com'è possibile vedere dalla figura 46 nei pressi della superficie del semiconduttore ($x = 0$) la concentrazione di atomi donori è maggiore rispetto a quella degli atomi accettori, quindi il semiconduttore risulta drogato di tipo n . Il valore della profondità x alla quale $N_A = N_D$ indica la localizzazione della giunzione.

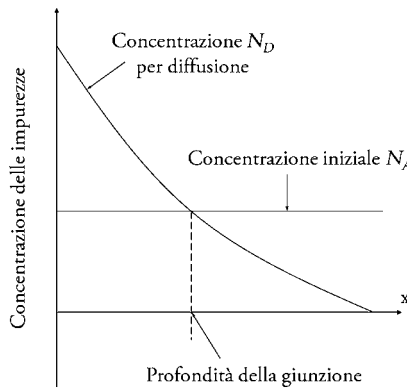


Fig. 46. – In un semiconduttore drogato inizialmente con una concentrazione N_A di atomi accettori, sono fatti diffondere degli atomi donori. Il grafico rappresenta la loro concentrazione N_D in funzione della distanza dalla superficie.

La profondità della giunzione è un parametro di fondamentale importanza per il corretto funzionamento di una cella fotovoltaica. Le coppie elettrone-lacuna generate dai fotoni devono poter diffondere per raggiungere la regione di svuotamento, all'interno della quale il campo elettrico presente provvede a dividere queste due cariche e generare una corrente elettrica nel semiconduttore. Le coppie possono essere generate all'interno della regione n , della regione p o della regione di svuotamento. In quest'ultimo caso l'elettrone e la lacuna generati vengono immediatamente separati dal campo elettrico e quindi tutti i fotoni assorbiti in questa regione contribuiscono a creare una corrente elettrica. Negli altri due casi non tutti gli elettroni e le lacune generate contribuiscono alla corrente perché nel processo di diffusione verso la regione di svuotamento potrebbero ricombinarsi, rispettivamente, con una lacuna o un elettrone.

Tenendo presente questo importante fatto e ricordando che il coefficiente di generazione di coppie è molto elevato in prossimità della superficie del semiconduttore sulla quale incidono i fotoni (vedi figura 27), la profondità della giunzione è molto contenuta: su di uno

spessore di una cella fotovoltaica di circa 200 μm , la giunzione ha una profondità di appena pochi micrometri (figura 47).

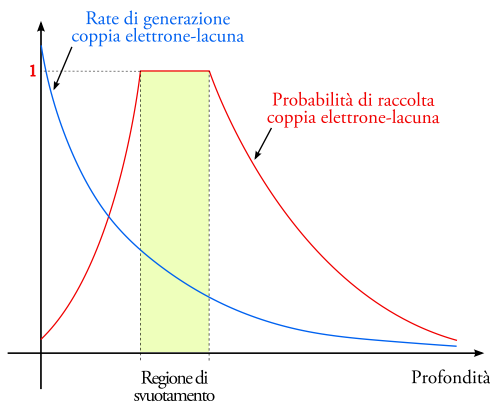


Fig. 47. – Sovrapposizione dei grafici di probabilità di generazione e di raccolta di una coppia elettrone-lacuna, entrambi graficati in funzione della profondità del semiconduttore. Considerata la rapidissima decrescita della curva della probabilità di generazione, la profondità della giunzione ha un valore di pochi micrometri.

Conclusa la fase di drogaggio, sulla superficie delle celle rimane un sottile strato fosforico che deve essere rimosso tramite fluoruro d'idrogeno. Successivamente i wafer vengono lavati. A questo stadio la cella riflette ancora il 20% della luce del Sole. Per questo viene applicato uno speciale rivestimento antiriflesso: sulla cella sono depositati sottili strati di nitrito di sodio ed altri composti chimici che ne riducono il coefficiente di riflessione al di sotto del 4% nell'intervallo spettrale d'interesse per la cella. Il rivestimento avviene in un ambiente sottovuoto ed è in questa fase che la cella acquisisce il suo caratteristico colore blu.

3.1.3 Dalla giunzione $p-n$ al modulo fotovoltaico

Arrivati a questo punto della produzione della cella fotovoltaica, occorre creare dei contatti metallici per trasportare la corrente fotogenerata nella giunzione $p-n$ verso un carico esterno. Occorre quindi un contatto metallico su ciascuna delle due facce della cella, tenendo in considerazione che una delle due facce deve essere anche in grado di assorbire la radiazione solare incidente. Per questo motivo sulla faccia inferiore della cella vengono serigrafati (ossia stampati con una tecnica particolare) dei contatti elettrici, detti *busbar*, ed è applicato uno strato di alluminio, mentre sulla faccia superiore, quella attraverso la quale penetra la radiazione solare, oltre ai busbar viene stampata anche una griglia metallica molto fitta, composta da fili, detti *fingers* (vedi figura 48). La larghezza dei fili di questa griglia è un parametro importante, perché all'aumentare di tale valore aumenta anche la percentuale di cella oscurata dai fili stessi. Occorre quindi trovare un giusto compromesso, cercando di minimizzare questo spessore ma al tempo stesso di non depositare un filo conduttore troppo fragile.

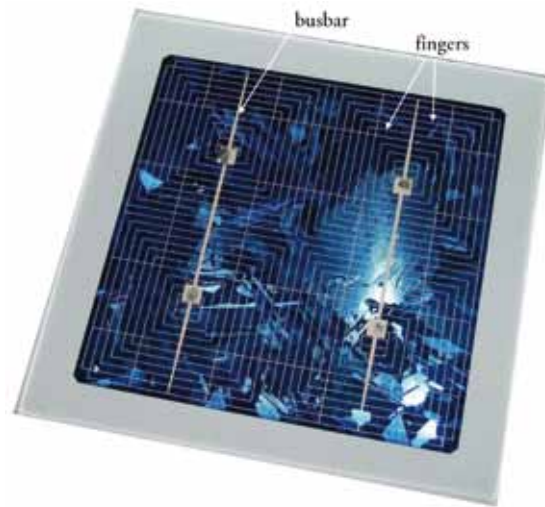


Fig. 48. – Immagine di una cella fotovoltaica con evidenziati i contatti elettrici (fingers e busbar) (fonte: <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle>).

APPROFONDIMENTO: Tecniche di drogaggio dei semiconduttori

Oltre alla tecnica diffusiva, un altro modo per realizzare una giunzione $p-n$ è la *crescita epitassiale*. Questa tecnica consiste nella crescita di un sottile strato di semiconduttore drogato su un substrato di semiconduttore monocristallino drogato in modo diverso. Questa tecnica è più veloce rispetto alla diffusione, però non è molto precisa nella localizzazione della giunzione e non permette, inoltre, di far crescere strati superiori ai 10 μm .

Un ultimo metodo è l'*impiantazione ionica*. In questo caso il drogaggio è realizzato mediante il bombardamento del semiconduttore con ioni di materiale drogante ad alta energia. Maggiore è l'energia degli ioni e maggiore sarà la loro penetrazione nel semiconduttore. Questo metodo ha il vantaggio di permettere l'impiantazione di atomi di ogni tipo ma ha anche lo svantaggio di richiedere una costosa strumentazione (vedi figura 49).

Le tecniche qui presentate per la realizzazione di giunzioni $p-n$ sono utilizzate in elettronica a seconda degli scopi da raggiungere. La necessità di realizzare circuiti integrati di dimensioni nanoscopiche, quindi volti ad una integrazione su larghissima scala (VLSI, Very Large Scale Integration), spinge ad utilizzare l'impiantazione ionica come tecnica di drogaggio. Questa è infatti la tecnica più precisa, sia dal punto di vista della localizzazione del drogaggio nel semiconduttore, che della profondità della giunzione, che della densità di atomi droganti. Le giunzioni $p-n$ utilizzate nei pannelli fotovoltaici sono invece realizzate con la tecnica di diffusione.

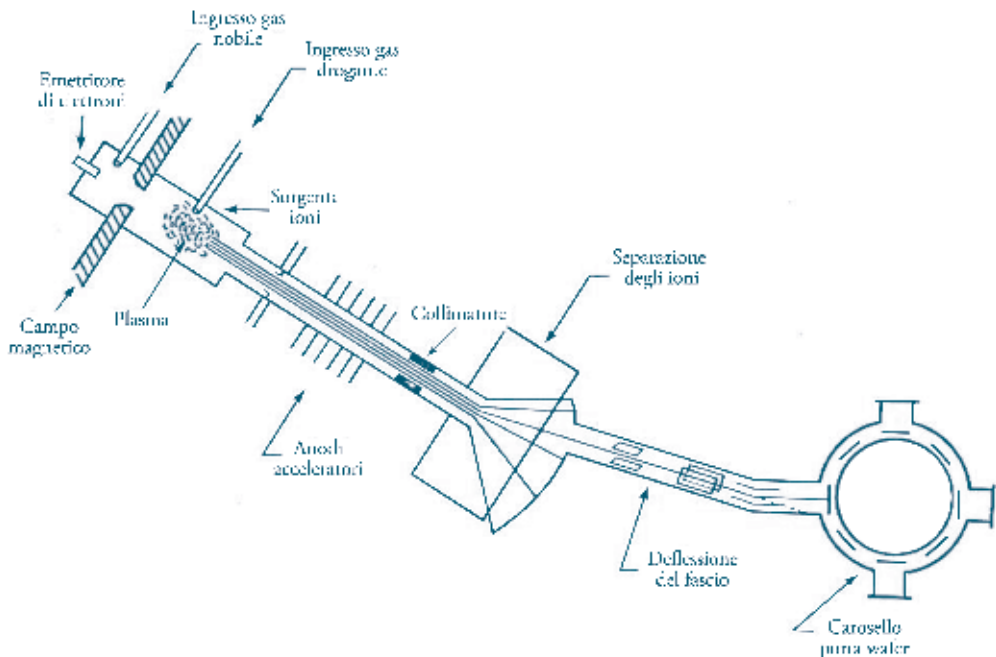


Fig. 49. – Schema dell'apparato utilizzato per il drogaggio per impiantazione ionica. Il materiale drogante, dopo essere stato ionizzato (vengono estratti alcuni elettroni in modo da rendere l'atomo complessivamente carico), viene accelerato. Passa poi attraverso uno spettrometro di massa che ne seleziona solo gli atomi da impiantare. Il fascio viene quindi indirizzato verso il semiconduttore da drogare (fonte: <http://itisra-venna.dyndns.org>).

Una volta applicati i contatti metallici le celle sono saldate tra loro in serie, quindi i busbar anteriori di una cella sono saldati ai busbar posteriori della cella successiva. Le stringhe di celle così create vengono poi collegate in parallelo tra di loro in modo da formare un modulo completo. Il numero di celle collegate in serie e il numero di stringhe in parallelo variano da produttore a produttore. Questa matrice di celle viene poi ricoperta superiormente da una pellicola di EVA (Etilene-Vinil-Acetato), che svolge funzioni di isolamento e protezione, e da un vetro protettivo; l'insieme di celle è protetto e sostenuto posteriormente da una lamina di polivinilfluoruro, comunemente noto come tedlar. Nella stazione successiva, in ambiente sottovuoto, il vetro, la matrice di celle e gli strati protettivi sono compressi e sigillati a caldo in modo da creare un oggetto compatto. Il modulo viene, infine, inserito in una cornice metallica che gli conferisce il suo aspetto finale. In figura 50 sono visibili la sezione di un modulo fotovoltaico, illustrante le superfici di ricoprimento delle celle solari appena descritte, e un modulo fotovoltaico completo.

Prima della catalogazione ed archiviazione, ogni modulo viene testato da un simulatore di luce solare, il quale è in grado di misurarne le prestazioni in condizioni di alto (1000 W/m^2) e basso (200 W/m^2) irraggiamento sottoponendolo a delle illuminazioni molto rapide.

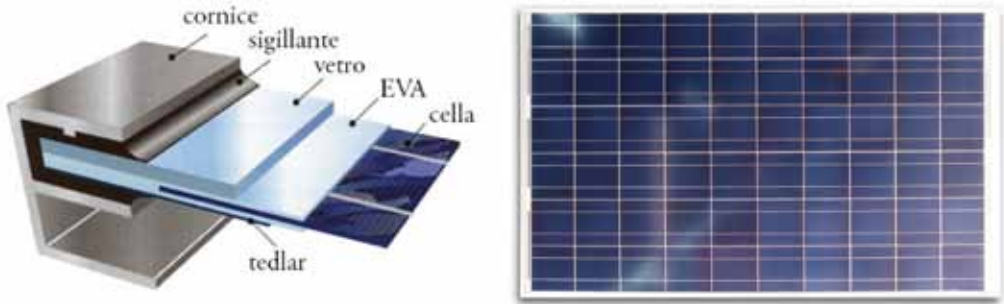


Fig. 50. – Sulla sinistra lo schema della sezione di un modulo fotovoltaico, mentre sulla destra la foto di un modulo completo (fonti: www.sardegna.ricerche.it, <http://solaris-novigrad.hr>).

3.1.4 Come leggere il datasheet di un modulo fotovoltaico

Ogni modulo fotovoltaico, prima di essere messo in commercio, viene testato in laboratorio ed i risultati del test vengono riportati schematicamente in un documento che prende il nome di *datasheet*. La condizione nella quale viene eseguito questo test è detta Standard Test Condition (STC), il che significa che l'intero modulo viene illuminato per un tempo brevissimo da un flash: durante questo test la temperatura della cella è quella dell'ambiente (tipicamente 25 °C) mentre l'irraggiamento può essere alto o basso (rispettivamente 1000 e 200 W/m²). In questo breve lasso di tempo vengono misurati dei valori che potrebbero essere quelli riportati nella Tabella VI. Nel datasheet di un modulo fotovoltaico sono riportate anche le caratteristiche elettriche in condizioni di lavoro (NOCT, Normal Operating Cell Temperature): sono questi i numeri più importanti perché descrivono le prestazioni del modulo nel momento in cui, posto sotto l'azione dei raggi solari, si scalda e raggiunge una temperatura di equilibrio; maggiore è la temperatura delle celle, minore risulta l'efficienza del modulo.

L'efficienza di un modulo fotovoltaico è definita come il rapporto tra la potenza elettrica trasferita ad un carico collegato al modulo e la potenza della radiazione solare incidente sul modulo, entrambe calcolate per unità di superficie:

$$(28) \quad \eta = \frac{P_{\text{elettrica,MPP}}}{P_{\text{Sole}}} .$$

La potenza elettrica è la potenza calcolata nel punto MPP (punto di massima potenza, v. paragrafo 2.2.2). Ricordando che la potenza nel punto MPP è

$$(29) \quad P_{\text{MPP}} = V_{\text{MPP}} I_{\text{MPP}} = V_{\text{OC}} I_{\text{SC}} FF$$

con V_{MPP} e I_{MPP} rispettivamente tensione e corrente nel punto di massima potenza, allora l'efficienza di un modulo aumenta all'aumentare dei parametri V_{OC} , I_{SC} e FF .

Si definisce *potenza nominale* o *potenza di picco* di un modulo (o di un impianto fotovoltaico nel caso di più moduli tra loro connessi) la potenza massima misurata in condizioni

STC. Essendo questo il picco della potenza di un modulo si utilizza come unità di misura “watt picco” (simbolo W_p) al posto di “watt” (simbolo W). Nel caso del modulo di Tabella VI la potenza di picco è $210 W_p$.

Tabella VI. – Esempio di datasheet di un modulo fotovoltaico commerciale. Queste sono le prestazioni che attualmente possiede un tipico modulo con celle di silicio policristallino. Questo tipo di moduli è attualmente il più diffuso in virtù del suo vantaggioso rapporto tra energia prodotta e costo.

Dati elettrici in condizioni STC			
	Simbolo	Valore	Unità di misura
Potenza massima	P_{MPP}	210	W
Tensione di circuito aperto	V_{OC}	33,2	V
Tensione di massima potenza	V_{MPP}	26,6	V
Corrente di corto circuito	I_{SC}	8,58	A
Corrente di massima potenza	I_{MPP}	7,90	A
Fattore di riempimento	FF	73,8	%
Dati elettrici in condizioni NOCT			
Potenza massima	P_{MPP}	148	W
Tensione di circuito aperto	V_{OC}	29,9	V
Tensione di massima potenza	V_{MPP}	23,5	V
Corrente di corto circuito	I_{SC}	6,98	A
Corrente di massima potenza	I_{MPP}	6,32	A
Fattore di riempimento	FF	71,2	%
Variazione di V_{oc} con la temperatura	dV_{OC}/dT	-0,120	V/°C
Variazione di I_{sc} con la temperatura	dI_{SC}/dT	5,15	mA/°C
Variazione di P_{MPP} con la temperatura	dP_{MPP}/dT	-0,967	W/°C

Dati meccanici	
Altezza	1500 mm
Larghezza	990 mm
Profondità	36 mm
Peso	18,5 kg
Peso specifico	12,5 kg/m ²

Legenda:

- STC, Standard Test Conditions: Air mass 1.5, irraggiamento $1000 W/m^2$, temperatura cella $25^\circ C$.
- NOCT, Normal Operating Cell Temperature: Air mass 1.5, irraggiamento $800 W/m^2$, temperatura cella $49^\circ C$, temperatura aria $25^\circ C$, velocità del vento 1 m/s.

Esercizio 11: efficienza di un modulo fotovoltaico

Con riferimento al datasheet di Tabella VI, calcolare l'efficienza del modulo fotovoltaico in condizioni STC e NOCT

Svolgimento

In condizioni STC la potenza elettrica per unità di superficie è:

$$P_{m^2} = \frac{P_{MPP}}{\text{Area modulo}} = \frac{210 \text{ W}}{1,5 \times 0,99 \text{ m}^2} = 141,4 \text{ W/m}^2.$$

L'efficienza è quindi

$$\eta = \frac{141,4 \text{ W/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} = 0,141 \Rightarrow \eta = 14,1\% .$$

In condizioni NOCT la potenza elettrica per unità di superficie è

$$P_{m^2} = \frac{P_{MPP}}{\text{Area modulo}} = \frac{148 \text{ W}}{1,5 \times 0,99 \text{ m}^2} = 99,7 \text{ W/m}^2 .$$

L'efficienza è quindi

$$\eta = \frac{99,7 \text{ W/m}^2}{800 \text{ W/m}^2} = 0,125 \Rightarrow \eta = 12,5\% .$$

Come noto, si osserva che l'efficienza di un modulo fotovoltaico in condizioni di lavoro (in questo caso le celle hanno una temperatura di 49 °C) è inferiore rispetto all'efficienza del modulo misurata in fase di test.

APPROFONDIMENTO: Circuito elettrico equivalente di una cella fotovoltaica

Nel paragrafo 2.2.2 è stato descritto il funzionamento di una cella fotovoltaica ed è stata presentata l'equazione della curva caratteristica corrente-tensione, $I(V)$. Tale equazione è valida solo per una cella solare ideale, nella quale cioè la corrente che circola nel carico è data dalla sovrapposizione della corrente fotogenerata e della corrente che circola in un diodo (la giunzione $p-n$ della cella stessa). In una cella solare reale, però, esistono dei fattori che richiedono una descrizione più dettagliata. Per comprendere questo problema è necessario schematizzare la cella solare per mezzo di un circuito elettrico equivalente.

Un circuito elettrico equivalente è una schematizzazione, più o meno dettagliata, di un qualsiasi impianto elettrico. Tale schematizzazione consiste nel riprodurre l'impianto in esame per mezzo degli elementi base dell'elettronica, quindi resistenze, capacità, induttanze, generatori di corrente e di tensione, interruttori. La descrizione dell'impianto in esame si riduce quindi allo studio del circuito equivalente; tale descrizione può essere più o meno accurata (nonché più o meno complessa) a seconda del numero di componenti elettronici invocati.

Nel caso di una cella fotovoltaica, un tipico circuito equivalente utilizzato per descriverla è quello mostrato in figura 51. Gli elementi utilizzati sono: un generatore di corrente che descrive la corrente I_L fotogenerata, un diodo attraversato dalla corrente $I_D(V)$, una resistenza parallelo R_P e una resistenza serie R_S . I primi due elementi sono sufficienti per descrivere il comportamento di una cella solare ideale, avente un'equazione caratteristica descritta dalla relazione (20), mentre per una cella solare reale è necessario introdurre delle resistenze parassite.

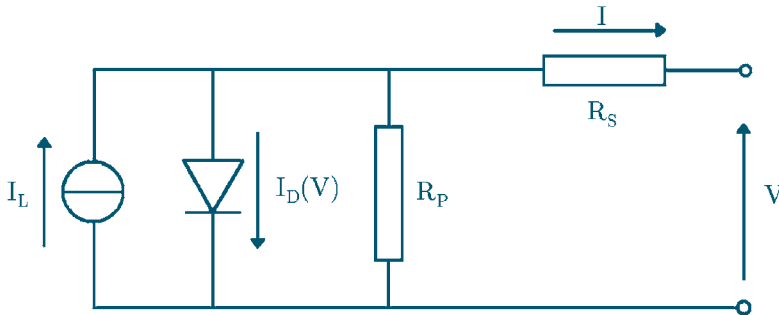


Fig. 51. – Circuito elettrico equivalente di una cella solare reale. I_L è la corrente fotogenerata, $I_D(V)$ è la corrente che fluisce nella giunzione in conseguenza della tensione V sui suoi capi, R_P ed R_S sono le “resistenze parassite” in parallelo ed in serie ad una cella solare ideale. Tali resistenze sono introdotte nello schema del circuito elettrico equivalente per rendere conto della discrepanza tra le curve $I(V)$ corrente-tensione di una cella solare reale e di una cella solare ideale.

La resistenza serie R_S è dovuta alla resistività non nulla dei contatti elettrici della cella (fingers e busbar), del corpo del semiconduttore e dei fili elettrici di contatto tra la cella ed il carico. La resistenza parallelo R_P nasce invece da alcuni contatti tra la faccia superiore e quella inferiore della cella dovuti, ad esempio, allo strato protettivo di EVA o ad imperfezioni della cella. Studiando il circuito di figura 51 è possibile riscrivere l'equazione caratteristica di una cella solare:

$$(30) \quad I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{k_B T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_P}.$$

A partire da questa equazione è possibile studiare l'andamento della curva $I(V)$ al variare delle resistenze parassite. Si osserva anzitutto che il caso ideale è quello nel quale le resistenze parassite serie e parallelo valgono rispettivamente $R_S = 0$ e $R_P = \infty$. Osservando la figura 52 si può notare come le due resistenze parassite siano critiche per l'efficienza di una cella: al variare del loro valore varia la curva $I(V)$ nonché il punto di massima potenza.

Oltre alle resistenze parassite, un altro importante fattore che influenza le prestazioni di un modulo fotovoltaico è la temperatura delle celle solari.

Come si può vedere da Tabella VI, all'aumentare della temperatura i parametri elettrici del modulo fotovoltaico variano: la corrente di corto circuito tende ad aumentare, mentre la tensione di circuito aperto tende a diminuire. Complessivamente all'aumentare della temperatura le prestazioni del modulo fotovoltaico, tipicamente la potenza erogata, diminuiscono.

perché diminuisce il fattore di riempimento. Questo fenomeno può essere modellato per mezzo di un circuito elettrico equivalente avente delle opportune resistenze parassite R_S ed R_P .

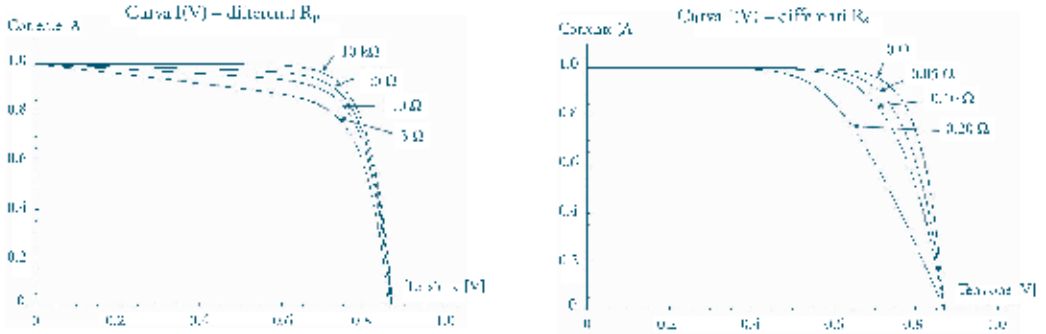


Fig. 52. – Curve corrente-tensione $I(V)$ di una cella fotoelettrica per differenti valori delle resistenze parassite R_S ed R_P , ottenute tramite l'equazione (30) nella quale sono stati impostati i parametri $I_L = 1$ A, $I_0 = 0,05$ μ A, $T = 300$ K.

3.2 Impianti fotovoltaici

Negli impianti di produzione di energia elettrica, un modulo fotovoltaico trova applicazione in una varietà di situazioni molto ampia. Al lettore saranno probabilmente familiari le calcolatrici aventi delle celle solari integrate, semplice esempio di *energy supply* (fornitura di energia) ad un sistema che richiede una bassissima potenza elettrica per poter funzionare. Un altro semplice esempio è dato dai sistemi di alimentazione di piccoli dispositivi per mezzo di pannelli montati su camper o imbarcazioni o sui parchimetri nelle città.

I pannelli fotovoltaici, però, non si limitano solo alla fornitura di energia a sistemi che richiedono necessariamente basse potenze o che siano isolati. Un tipico esempio di sistema integrato alla rete elettrica è dato dagli impianti fotovoltaici installati sui tetti delle abitazioni, o dai parchi solari di medie e grandi dimensioni installati sui tetti dei capannoni o in terreni da rivalutare come ad esempio terreni non edificabili e/o non coltivabili. Come ultimi esempi di questa, che non vuole assolutamente essere una panoramica esauriente delle possibili applicazioni della tecnologia fotovoltaica, si possono citare i sistemi di alimentazione dei *rover* delle missioni spaziali (i veicoli utilizzati per l'esplorazione di altri pianeti), dei satelliti artificiali e della Stazione Spaziale Internazionale.

Concentrando l'attenzione alle sole applicazioni terrestri statiche, pur sottolineando il fatto che gli argomenti che seguono restano validi anche in ambito spaziale o di locomozione terrestre, si vuole distinguere gli impianti fotovoltaici nel modo seguente:

- **Impianti ad isola (stand alone).** Si tratta di un insieme di moduli fotovoltaici, opportunamente connessi tra loro, per l'alimentazione di utenze isolate (ad esempio segnaletica stradale luminosa) o di piccole abitazioni isolate. In entrambi i casi è necessario il collegamento dei moduli anche ad un accumulatore in grado di caricarsi quando l'impianto non

viene utilizzato dalle utenze e in grado di garantire un supporto energetico nel caso in cui l'impianto fosse temporaneamente improduttivo (ad esempio a causa del maltempo). Nel caso di alimentazione di abitazioni, è necessaria l'introduzione di un *inverter*, un dispositivo in grado di convertire la corrente e la tensione continue prodotta dai pannelli, o erogata dalle batterie, in corrente e tensione alternate. Questo è un passaggio necessario dal momento che le apparecchiature elettriche che quotidianamente utilizziamo necessitano di una tensione alternata di 220V.

- **Impianti connessi alla rete di distribuzione dell'energia elettrica (grid connected).** Non è questa la sede per addentrarsi nella struttura della rete di distribuzione dell'energia elettrica, ma si cercherà di accennare al modo col quale gli impianti fotovoltaici possono esservi connessi. I tralicci della rete elettrica, ormai parte integrante dei nostri paesaggi, possono trasportare segnali in bassa, media o alta tensione. A seconda della potenza nominale di un impianto fotovoltaico, può essere più opportuno immettere nella rete elettrica l'energia prodotta dall'impianto in bassa, media o alta tensione. Gli impianti fotovoltaici domestici, tipicamente installati sui tetti delle abitazioni, hanno una potenza nominale tale da poter soddisfare il fabbisogno energetico di una famiglia. Le potenze in questione non sono molto elevate, quindi questi impianti sono connessi alla rete elettrica per mezzo di un inverter in grado di convertire corrente e tensione continue in alternate a bassa tensione, quindi a 220 V⁽¹³⁾. Quando la potenza nominale di un impianto inizia a diventare considerevole, potrebbe essere opportuno immettere l'energia prodotta nella rete elettrica non più in bassa, ma in media o alta tensione. Quest'ultimo caso richiede spesso, oltre all'installazione dell'impianto, anche la realizzazione di una linea elettrica idonea al trasporto dell'energia prodotta. È consuetudine distinguere gli impianti fotovoltaici in base alla loro potenza nominale; potenze inferiori ai 200 kW_p sono possedute da installazioni su immobili di privati cittadini, di attività commerciali e di piccole aziende, con lo scopo di soddisfare i propri bisogni energetici. In particolare, per le applicazioni residenziali la potenza dell'impianto non supera quasi mai i 6 kW_p. Potenze superiori ai 200 kW_p riguardano invece degli impianti realizzati da imprese interessate alla produzione di energia elettrica sia per l'autoconsumo che per la pura vendita.

A prescindere dalla dimensione di un impianto fotovoltaico, i moduli possono essere connessi tra loro in serie in modo da formare delle stringhe; tali stringhe possono poi essere connesse tra loro in parallelo. Supponendo di avere due moduli identici che ricevono lo stesso irraggiamento, se tali moduli sono connessi tra loro in serie allora la corrente ai capi della stringa è pari alla corrente di ciascuno dei due moduli, mentre la tensione è uguale alla somma delle tensioni ai capi di ciascun modulo. Viceversa, se due moduli identici sono tra loro connessi in parallelo, la tensione complessiva è pari alla tensione ai capi di ciascuno dei due moduli, mentre la corrente è uguale alla somma delle correnti di ciascun modulo. L'intera matrice di moduli è poi connessa ad un inverter, avente lo scopo di trasformare

⁽¹³⁾ Senza entrare in dettagli tecnici, sappiamo che il segnale immesso nella rete elettrica deve possedere una certa *fase*. Si può pensare alla tensione della rete elettrica come ad un'onda oscillante, avente quindi una certa ampiezza ed una certa fase. Affinché il segnale prodotto da un impianto non vada ad interferire con quello della rete, occorre che il primo sia, entro un certo margine d'errore, in fase con il secondo.

la tensione prodotta da continua ad alternata e di immettere nella rete l'energia elettrica prodotta (figura 53).

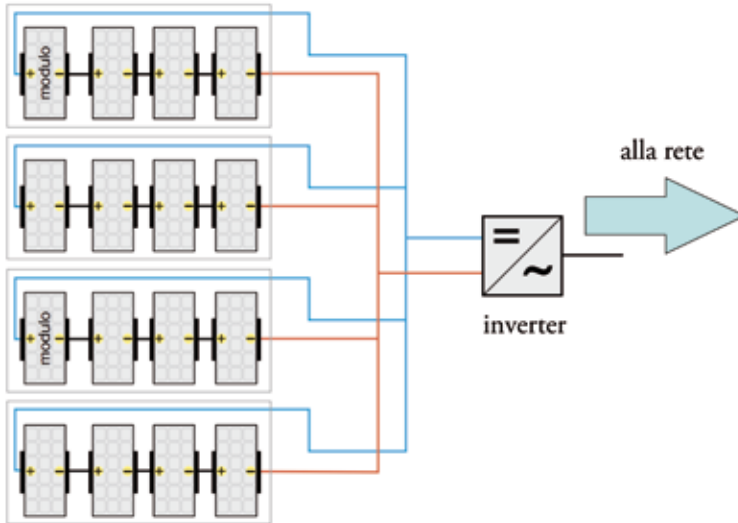


Fig. 53. – Esempio di schema di connessione di un insieme di moduli fotovoltaici. Nello schema sono rappresentate quattro stringhe di pannelli, ciascuna costituita da quattro pannelli connessi in serie, connesse tra loro in parallelo. Tutto il sistema è poi connesso ad un inverter, il quale immette l'energia prodotta nella rete elettrica.

La funzione dell'inverter è inoltre quella di fungere da *carico variabile* (in gergo tecnico è detto MPPT, Maximum Power Point Tracker) con lo scopo di porre il sistema nel punto di lavoro che garantisca la più alta produttività di energia elettrica. Con riferimento a figura 23, ogni modulo fotovoltaico, in base all'irraggiamento, alla temperatura e alla fattura delle celle, possiede una certa curva caratteristica corrente-tensione. Esiste quindi un punto di tale curva nel quale la potenza (cioè il prodotto tra la corrente e la tensione) è massima ed è possibile fare lavorare un modulo in tale punto imponendo una certa tensione ai suoi capi.

Il collegamento in serie e parallelo di varie celle e moduli contribuisce a creare un sistema avente nel suo insieme una nuova curva caratteristica; una delle funzioni dell'inverter è appunto quella di ricercare, in ogni istante, il punto di massima potenza di tale curva.

Si consideri a titolo esemplificativo il caso rappresentato in figura 54. Due celle sono connesse in serie: una delle due riceve un certo irraggiamento mentre l'altra è, per qualche motivo, posta in ombra o danneggiata. In una situazione del genere il sistema si limiterebbe a trasportare la corrente generata dalla cella meno performante e la tensione sarebbe comunque la somma delle tensioni di ciascuna cella. Nel caso in cui una cella sia ombreggiata o danneggiata, la corrente dell'intera stringa verrebbe limitata dal fatto che una cella funziona male. Per questi motivi i moduli fotovoltaici possiedono dei collegamenti elettrici interni con dei diodi, detti *diodi di bypass*, la cui funzione è "aggirare" un insieme di celle che per qualche motivo potrebbero non essere molto performanti, garantendo al sistema di estrarre la massima potenza elettrica per quella situazione.

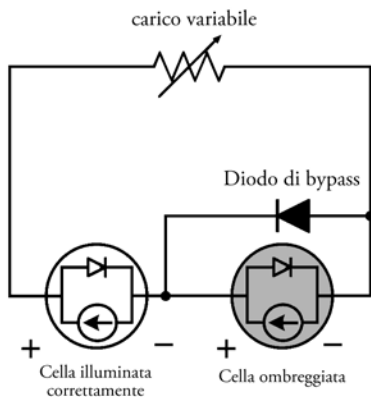


Fig. 54. – Circuito equivalente di due celle solari connesse in serie. In parallelo alla cella ombreggiata è connesso anche un diodo di bypass.

La figura 55 rappresenta la curva caratteristica dello schema elettrico di figura 54; nel caso in cui nessuna cella sia ombreggiata la curva corrente-tensione evidenzia che la corrente di corto circuito è quella di una cella non ombreggiata (uguale nelle due celle), mentre la tensione di circuito aperto è la somma delle tensioni ai capi di ciascun cella. Nel caso in cui una cella sia ombreggiata, la curva caratteristica è quella rossa, la quale mette in evidenza due diversi punti, A e B, nei quali la potenza elettrica potrebbe essere massima. In questo esempio la massima potenza si ha nel punto A, come messo in evidenza dal grafico a destra. In questa situazione, quindi, il diodo di bypass esclude la cella ombreggiata dal circuito elettrico, preservando la corrente della cella non ombreggiata ma riducendo la tensione ad un valore pari alla tensione che si avrebbe ai capi di una sola cella non ombreggiata.

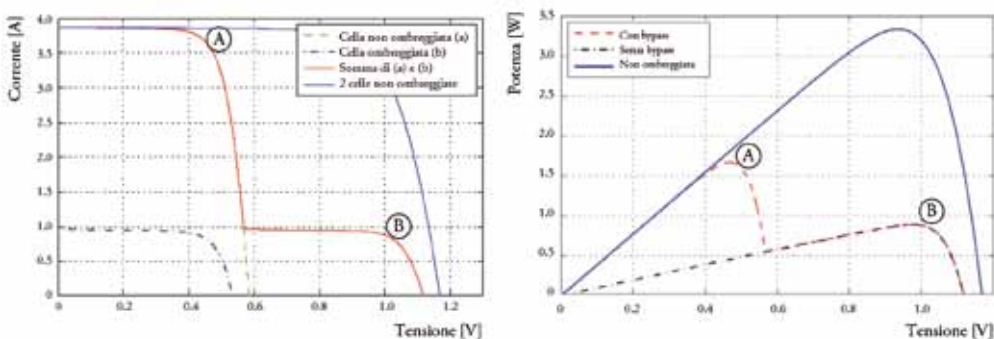


Fig. 55. – Sinistra: curve caratteristiche del sistema di figura 54. Destra: curve dell'andamento della potenza elettrica al variare della tensione ai capi del carico. Come si può vedere, il diodo di bypass esclude dal circuito la cella ombreggiata, facendo sì che il punto di massima potenza non sia più B, bensì A (fonte: D. Sera, Y. Baghzouz, *On the Impact of Partial Shading on PV Output Power*, Proceedings of RES'08, WSEAS Press, 2008).

4. L'ENERGIA FOTOVOLTAICA E L'AMBIENTE

Questo capitolo vuole essere un riassunto di quanto visto finora, ai fini dell'applicazione delle tecnologie fotovoltaiche nel mondo reale. Tali tecnologie si propongono come fonti di “energia pulita”, ossia che non produce emissioni di elementi inquinanti o gas responsabili dell'effetto serra. Però è anche vero che per fabbricare i moduli fotovoltaici è necessaria una quantità di energia che, almeno inizialmente, è fornita da fonti convenzionali e quindi inquinanti. Inoltre durante il processo produttivo si utilizzano a volte composti e elementi che possono comportare qualche rischio ambientale.

Il termine “energia pulita” necessita di essere compreso a fondo, per cui occorre introdurre il concetto di *Energy PayBack Time* (EPBT)

4.1 Energy PayBack Time

L'Energy PayBack Time è definito come il tempo di funzionamento di un impianto elettrico necessario a produrre la stessa quantità di energia utilizzata per la sua realizzazione e manutenzione fino a quel momento.

Ogni impianto fotovoltaico (moduli, inverter, cavi, trasporto...) richiede per la sua costruzione, installazione, manutenzione e disinstallazione l'uso di una certa quantità di materiali e il consumo di energia. Tale energia è per la maggior parte quella impiegata per la produzione dei materiali durante i processi industriali.

La figura 56 mostra l'Energy PayBack Time di differenti tipi di sistemi fotovoltaici installati in una località con irraggiamento globale 1924 kWh/m^2 annuo. Come si può vedere dalla figura 56 il processo più oneroso dal punto di vista energetico è quello di purificazione del silicio. Alcuni modelli suggeriscono che le energie attualmente impiegate per realizzare moduli fotovoltaici variano a seconda della tecnologia adottata nel modo seguente⁽¹⁴⁾:

- 778 kWh/m^2 per silicio monocristallino,
- 750 kWh/m^2 per silicio policristallino,
- 275 kWh/m^2 per silicio amorfo,
- 225 kWh/m^2 per CdTe,
- 468 kWh/m^2 per CIGS.

⁽¹⁴⁾ Valori tratti da M. de Wild-Sholten, *Energy payback times of PV modules and systems*, in Workshop Photovoltaik-Modultechnik, Köln, 26-27 November, 2009.

A questo punto è necessario sottolineare il fatto che le energie che si stanno confrontando (energia per produrre ed installare un impianto fotovoltaico ed energia prodotta da un impianto) sono “tipi” diversi di energia: i macchinari impiegati nella purificazione del silicio, nella produzione delle celle e del modulo finito utilizzano energia elettrica, ma tale energia potrebbe essere stata prodotta da una centrale nucleare, così come da una a carbone o da una idroelettrica, ciascuna delle quali possiede una certa efficienza di conversione dell’energia primaria entrante in energia elettrica. In questo calcolo è importante tenere in considerazione anche l’energia spesa per l’estrazione dei combustibili utilizzati nelle centrali elettriche. Inoltre l’energia impiegata per il trasporto dei moduli non è di natura elettrica ed essa dipende, oltre che dal mezzo di trasporto, anche dalla distanza percorsa. Questa variabilità si traduce in un’incertezza nel valore dell’effettiva energia impiegata per l’installazione di un intero impianto fotovoltaico e quindi nel valore dell’Energy PayBack Time. I valori di EPBT sono quindi solo delle stime, ottenute da modelli basati su assunzioni ed approssimazioni.

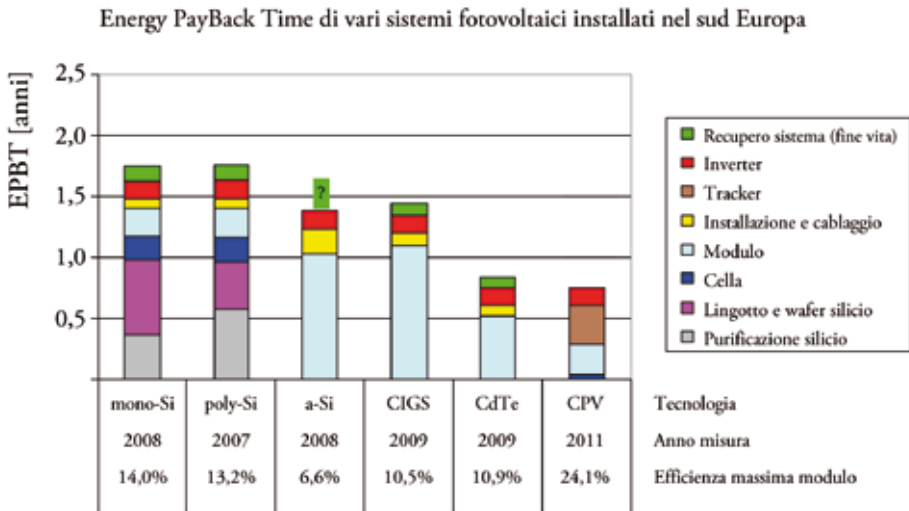


Fig. 56. – Energy PayBack Time di differenti tipi di sistemi fotovoltaici installati nel sud Europa, precisamente in una località con irraggiamento globale 1924 kWh/m^2 , misurato rispetto ad un piano inclinato di un angolo ottimale verso sud, e con irraggiamento diretto 1794 kWh/m^2 .

4.2 Dimensionamento di un impianto fotovoltaico di medie dimensioni

Si è scelto di dedicare l’ultimo paragrafo allo studio di due situazioni molto comuni. Facendo riferimento a dei pannelli solari basati su celle di silicio policristallino, in particolare al modulo di esempio presentato in Tabella VI, verranno ora dimensionati due impianti: il primo è un tipico impianto casalingo connesso in bassa tensione alla rete elettrica, mentre il secondo è un parco solare di medie dimensioni connesso in media tensione alla rete elettrica.

Esempio 1: impianto casalingo installato sul tetto di una abitazione

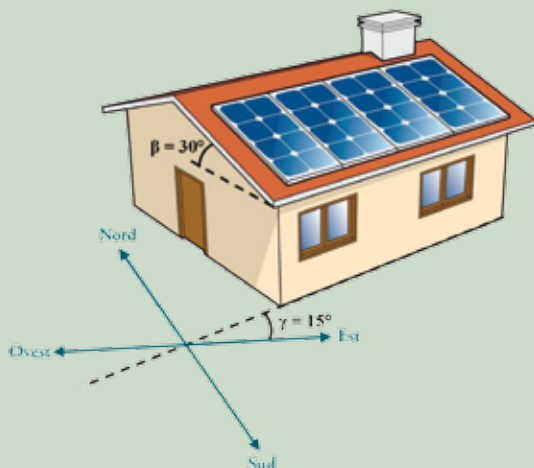


Fig. 57. – Situazione analizzata nell'esempio 1: un'abitazione, il cui tetto è inclinato di 30° , è orientata verso est con un angolo di 15° . Sul tetto dell'abitazione è installato un impianto fotovoltaico avente una potenza nominale di 3 kWp.

Si consideri l'abitazione di figura 57, avente un tetto inclinato di 30° e orientata in direzione est di 15° . Facendo riferimento alla Tabella VI, si dimensiona un impianto fotovoltaico, da installare sul tetto della casa, avente le seguenti caratteristiche:

- potenza di picco: 3 kWp
- inclinazione del tetto: 30°
- orientamento del tetto: 15° est
- località: Roma
- funzionamento per 20 anni
- degrado impianto nel tempo:
 - per 7 anni l'impianto lavora al 100% delle sue capacità
 - per i successivi 7 anni produce il 90% dell'energia
 - nei successivi 6 anni l'energia prodotta si riduce all'80%
- sopprime un'efficienza costante dei pannelli nell'arco di una giornata
- usare i parametri NOCT (Normal Operating Cell Temperature) della Tabella VI per calcolare l'efficienza di conversione della radiazione in energia elettrica⁽¹⁵⁾.

⁽¹⁵⁾ In questo esempio, così come nel successivo, si suppone che l'efficienza dei moduli nell'arco dell'anno sia costante e precisamente quella della condizione NOCT. Si trascurano quindi numerosi fattori quali ad esempio temperatura ed irraggiamento.

Obiettivi

- dimensionare l'impianto dal punto di vista della sua superficie
- calcolare l'energia prodotta dall'impianto in 20 anni

Svolgimento: Stando alla Tabella II, l'irraggiamento globale orizzontale annuale di Roma è 1612 kWh/m^2 . Occorre correggere questo valore, in modo da ottenere l'irraggiamento dei moduli aventi un'inclinazione $\beta = 30^\circ$ e un orientamento $\gamma = 15^\circ$. La Tabella C.I (vedi Appendice C) suggerisce che il coefficiente correttivo da adottare è 1,12. I moduli considerati in questo problema ricevono quindi ogni anno la seguente energia:

$$\text{Irraggiamento} = GHI \cdot \text{coeff. correttivo} = 1612 \text{ kWh/m}^2 \cdot 1,12 = 1805 \text{ kWh/m}^2.$$

Stando alla Tabella VI, la potenza nominale di un modulo fotovoltaico è 210 Wp . Ciò significa che per ottenere una potenza dell'impianto di 3 kWp occorre il seguente numero di pannelli:

$$\text{numero pannelli} = \frac{3 \text{ kWp}}{210 \text{ Wp}} = 14,3 \Rightarrow 15 \text{ pannelli}.$$

Considerato che ogni pannello ha un'area di $1,500 \text{ m} \cdot 0,990 \text{ m} = 1,485 \text{ m}^2$, l'area complessiva dell'impianto è

$$\text{Area}_{\text{impianto}} = 15 \text{ pannelli} \cdot 1,485 \frac{\text{m}^2}{\text{pannello}} = 22,3 \text{ m}^2.$$

Nell'esercizio 11 è stata calcolata l'efficienza dei moduli fotovoltaici in questione; in condizioni NOCT l'efficienza è risultata $12,5\%$. Ciò significa che nell'arco di un anno, e per tutti i primi 7 anni di funzionamento, l'impianto produrrà

$$\begin{aligned} \text{Energia}_{\text{anno}} &= \text{Irraggiamento} \cdot \text{area} \cdot \text{efficienza} = 1 \\ &= 1805 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{anno}} \cdot 22,3 \text{ m}^2 \cdot 0,125 = 5031 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}}. \end{aligned}$$

È interessante notare che questo valore risulta sufficiente per soddisfare il fabbisogno energetico di una famiglia, dato che il consumo nazionale medio di una famiglia composta da 4 persone è circa 4400 kWh/anno .

A partire dal valore appena calcolato è possibile ricavare le energie prodotte per i 20 anni successivi

$$\text{Energia}_{\text{anni } 1 \rightarrow 7} = 5031 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \cdot 7 \text{ anni} = 35217 \text{ kWh},$$

$$\text{Energia}_{\text{anni } 8 \rightarrow 14} = 5031 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \cdot 90\% \cdot 7 \text{ anni} = 31695 \text{ kWh},$$

$$\text{Energia}_{\text{anni } 15 \rightarrow 20} = 5031 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \cdot 80\% \cdot 6 \text{ anni} = 24149 \text{ kWh}.$$

L'energia totale prodotta dall'impianto, nell'arco di 20 anni di funzionamento, è la somma delle energie appena calcolate

$$\text{Energia}_{\text{Totale } 20 \text{ anni}} = (35217 + 31695 + 24149) \text{ kWh} = 91061 \text{ kWh}.$$

Esempio 2: parco solare di medie dimensioni (esempi: tetto di un grande capannone, superfici di ombreggiamento di un grande parcheggio o terreno da rivalutare)

Si consideri un grande capannone, dotato di un tetto piano avente una grande superficie. Si supponga di voler riempire tale spazio con delle stringhe di pannelli fotovoltaici, opportunamente inclinati verso sud, utilizzando una superficie di $100 \times 100 \text{ m}^2$ (un ettaro).

Con riferimento ai dati sottostanti, si dimensiona tale impianto fotovoltaico:

- edificio con pareti orientate secondo di punti cardinali
- località: Roma
- funzionamento per 20 anni
- degrado impianto nel tempo:
 - per 7 anni l'impianto lavora al 100% delle sue capacità
 - per i successivi 7 anni produce il 90% dell'energia
 - nei successivi 6 anni l'energia prodotta si riduce all'80%
- supporre un'efficienza costante dei pannelli nell'arco di una giornata
- usare i parametri NOCT della Tabella VI per calcolare l'efficienza di conversione della radiazione in energia elettrica
- disporre le file di pannelli in modo che se il Sole ha un'elevazione sull'orizzonte maggiore di 20° non ci siano ombreggiamenti tra i pannelli

Obiettivi

- calcolare il numero di pannelli installati
- calcolare la potenza di picco
- calcolare l'energia prodotta dall'impianto in 20 anni

Svolgimento: (valgono le indicazioni sulle formule dell'esempio precedente). Stando alla Tabella II, l'irraggiamento GHI (Global Horizontal Irradiation) di Roma è 1612 kWh/m^2 . L'angolo di inclinazione ottimale dei pannelli per la latitudine di Roma è $\beta = 30^\circ$. La Tabella C.I suggerisce che il coefficiente correttivo da adottare è 1,13. L'energia ricevuta dai pannelli considerati in questo problema è quindi

$$1612 \text{ kWh/m}^2 \cdot 1,13 = 1822 \text{ kWh/m}^2.$$

La figura 58 riassume i risultati del problema riguardante la disposizione dei pannelli e il loro ombreggiamento. Sapendo che i pannelli considerati hanno una lunghezza di 1,500 m e un'inclinazione di 30° , la loro altezza dal terreno è 0,750 m. Con riferimento alla figura, la distanza tra le file di pannelli è

$$\frac{0,750 \text{ m}}{\sin 20^\circ} \cdot \cos 20^\circ = 0,750 \text{ m} \cdot \cotg 20^\circ = 2,061 \text{ m}.$$

Una fila occupa quindi $(2,061 + 1,299) \text{ m} = 3,360 \text{ m}$ e il numero totale di file che possono essere installate sulla superficie considerata è

$$\frac{100 \text{ m}}{3,360 \text{ m}} = 29,8 \Rightarrow 30 \text{ file di pannelli ,}$$

mentre il numero totale di pannelli che possono essere installati è:

$$30 \text{ file di pannelli} \cdot 100 \frac{\text{pannelli}}{\text{fila}} = 3000 \text{ pannelli} .$$

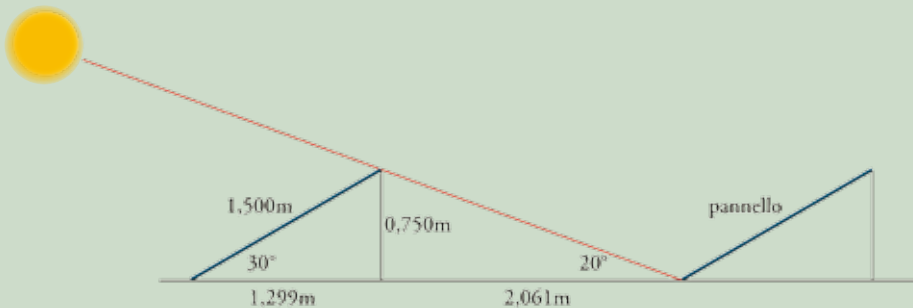


Fig. 58. – Situazione analizzata nell'esempio 2: calcolo della disposizione dei pannelli fotovoltaici, aventi un'inclinazione di 30° , affinché non ci siano ombreggiamenti nel caso in cui il Sole abbia un angolo di elevazione sull'orizzonte maggiore di 20° .

Noto il numero di pannelli, è immediato calcolare la potenza di picco dell'impianto sapendo che la potenza nominale di un pannello è 210 W_p:

$$P = 3000 \text{ pannelli} \cdot 210 \text{ W}_p = 630 \text{ kW}_p .$$

Sapendo inoltre che la superficie di un pannello è $1,500 \text{ m} \cdot 0,990 \text{ m} = 1,485 \text{ m}^2$, la superficie totale dei pannelli installati è

$$\text{Area}_{\text{impianto}} = 3000 \text{ pannelli} \cdot 1,485 \frac{\text{m}^2}{\text{pannello}} = 4455 \text{ m}^2 .$$

Moltiplicando questo valore per l'energia ricevuta da ciascun pannello e l'efficienza in condizioni NOCT si ottiene l'energia prodotta dall'impianto in un anno di funzionamento. Occorre però correggere questo valore dal momento che se il Sole ha un'elevazione inferiore ai 20° i pannelli sono parzialmente ombreggiati. Senza entrare in dettagli tecnici, che dovrebbero considerare la disposizione dei diodi di bypass e l'irraggiamento nei momenti nei quali il Sole ha un'elevazione inferiore a 20°, si suppone che l'energia prodotta da questo impianto sia del 10% inferiore rispetto a quella che avrebbe prodotto un identico impianto in assenza di ombreggiamenti:

$$\text{Energia}_{\text{anno}} = 1822 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{anno}} \cdot 4455 \text{ m}^2 \cdot 12,5\% \cdot 90\% = 913,16 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} .$$

A partire dal valore appena calcolato è possibile ricavare le energie prodotte per i 20 anni successivi

$$\text{Energia}_{\text{anni } 1 \rightarrow 7} = 913,164 \frac{\text{MWh}}{\text{anno}} \cdot 7 \text{ anni} = 6,39 \text{ GWh} ,$$

$$\text{Energia}_{\text{anni } 8 \rightarrow 14} = 913,154 \frac{\text{MWh}}{\text{anno}} \cdot 90\% \cdot 7 \text{ anni} = 5,75 \text{ GWh} ,$$

$$\text{Energia}_{\text{anni } 15 \rightarrow 20} = 913,154 \frac{\text{MWh}}{\text{anno}} \cdot 80\% \cdot 6 \text{ anni} = 4,38 \text{ GWh} .$$

L'energia totale prodotta dall'impianto, nell'arco di 20 anni di funzionamento, è la somma delle energie appena calcolate

$$\text{Energia}_{\text{Totale } 20 \text{ anni}} = (6,39 + 5,75 + 4,38) \text{ GWh} = 16,52 \text{ GWh} .$$

Appendice A: Quanto consuma?

Per prendere dimestichezza con gli ordini di grandezza di energie con le quali abbiamo a che fare tutti i giorni, viene proposta una tabella che elenca i consumi tipici di alcuni elettrodomestici, facendo una stima dei consumi di una famiglia composta da 4 persone.

Elettrodomestico	Potenza elettrica in fase di utilizzo [W]	Periodo di utilizzo	Energia annua consumata [kWh]
Asciugacapelli	1500	30 minuti/settimana	39
Aspirapolvere	1000	45 minuti/settimana	39
Asciugatrice	2000	3 ore/settimana	312
Aspirapolvere	2000	2 ore/settimana	208
Condizionatore	1000	4 ore/giorno (2 mesi)	240
Ferro da stiro	2000	3 ore/settimana	312
Forno	2000	1 ora/settimana	104
Forno a microonde	1500	30 minuti/settimana	39
Frigorifero	100	16 ore/giorno	584
Illuminazione varia	60–100	4 ore/giorno	88–146
Lavastoviglie	2000	4 lavaggi/settimana	330
Lavatrice (ciclo 60°)	2000	4 lavaggi/settimana	300
Lettore CD/DVD	50	7 ore/settimana	18
PC desktop	100	8 ore/giorno	292
Radiosveglia	10	continuo	88
Scaldabagno elettrico	1000	4 ore/giorno	1460
Telefono	1	continuo	9
Televisore lcd 40"	300	4 ore/giorno	438

Appendice B: Fattori di conversione e costanti fisiche

Fattori di conversione dell'energia

Con il termine fattore di conversione si indica il numero per il quale occorre moltiplicare il valore numerico di una data grandezza rispetto a una certa unità di misura per ottenere il valore numerico della stessa grandezza rispetto a un'altra unità di misura. Con riferimento alla Tabella seguente, per ottenere il valore numerico dell'energia nelle unità indicate in testa alla colonna occorre moltiplicare il numero che la esprime nelle unità indicate a sinistra delle righe per il fattore situato all'incrocio.

	Joule	Elettronvolt	Chilowattora
Joule [J]	1	$6,25 \cdot 10^{18}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$
Elettronvolt [eV]	$1,6 \cdot 10^{-19}$	1	$4,44 \cdot 10^{-26}$
Chilowattora [kWh]	$3,6 \cdot 10^6$	$2,25 \cdot 10^{25}$	1

Come si legge la tabella: ad esempio $1 \text{ J} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$ oppure $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$.

Grandezze fondamentali nel SI

Grandezza	Unità di misura	Simbolo
Lunghezza	metro	m
Massa	chilogrammo	kg
Tempo	secondo	s
Intensità di corrente	ampere	A
Quantità di sostanza	mole	mol
Temperatura termodinamica	kelvin	K
Intensità di emissione	candela	cd

Prefissi per potenze di dieci

Fattore	Prefisso	Simbolo
10^{24}	yotta	Y
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	etto	h
10^1	deca	da

Fattore	Prefisso	Simbolo
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	yocto	y

Costanti fisiche di maggior interesse

Costante	Simbolo	Valore
Velocità della luce nel vuoto	c	$299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Carica elementare	e	$1,602\,176\,565 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Massa dell'elettrone	m_e	$9,109\,382\,91 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Costante di Planck	h	$6,626\,069\,57 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
Costante di Boltzmann	k_B	$1,380\,6488 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Numero di Avogadro	N_A	$6,022\,141\,29 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Costante dei gas	R	$8,314\,4621 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
Costante di Stephan-Boltzmann	σ	$5,670\,373 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
Distanza media Terra-Sole	d_{TS}	$149\,597\,870,7 \text{ km} = 1 \text{ AU}$
Raggio terrestre medio	R_T	$6371,0 \text{ km}$
Raggio solare medio	R_S	$6,96 \cdot 10^5 \text{ km}$
Accelerazione di gravità	g	$9,806\,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Appendice C: Inclinazione ed orientamento dei pannelli

In conseguenza di quanto spiegato nel paragrafo 1.2, un pannello fotovoltaico eroga il massimo della potenza nel caso in cui l'angolo tra la direzione di provenienza dei raggi solari e il vettore normale alla superficie del pannello sia nullo (cioè nel caso in cui i raggi incidano perpendicolarmente alla superficie). In pratica questo angolo varia continuamente a causa del moto apparente del Sole e dell'avvicinarsi delle stagioni. Il moto di rotazione della Terra è causa del moto apparente giornaliero del Sole, il quale compie sulla volta celeste una certa traiettoria, mentre il moto di rivoluzione causa una variazione di questa traiettoria nell'arco delle stagioni. L'asse terrestre ha un'inclinazione di circa $23,45^\circ$ rispetto al piano sul quale giace l'orbita della Terra attorno al Sole. Ciò significa che i luoghi sulla superficie terrestre che vedranno almeno una volta nell'arco di un anno transitare il Sole allo zenit saranno tutti quelli compresi tra $\pm 23,45^\circ$ di latitudine (Nord o Sud). Figura C.1 rappresenta gli estremi di questa situazione: il Sole si trova allo Zenith di un punto dell'equatore nel giorno di equinozio e in un punto del parallelo del tropico nel giorno di solstizio.

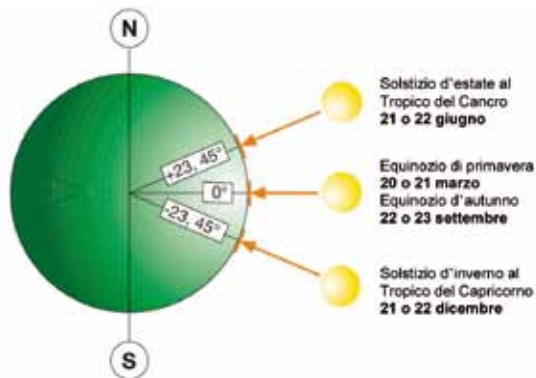


Fig. C.1. – Schema della proiezione dei raggi solari sulla superficie terrestre negli istanti di equinozio o di solstizio (fonte: <http://www05.abb.com>).

Con riferimento alla figura C.3, affinché un pannello riceva i raggi solari ortogonali alla sua superficie nel giorno con maggior numero di ore di luce dell'anno per la località nella quale è installato e nel momento del passaggio del Sole al meridiano locale, occorre che esso sia inclinato di un angolo

$$(C. 1) \quad \beta = L - 23,45^\circ,$$

con L latitudine del luogo in analisi. Questa considerazione è però valida solo per i luoghi con latitudini maggiori di $23,45^\circ$ (o minori di $-23,45^\circ$). In tutti i luoghi subtropicali il problema è risolto con $\beta = 0^\circ$. Questo non è però un buon criterio per scegliere l'inclinazione ottimale dei pannelli solari poiché si andrebbero a privilegiare eccessivamente i giorni dell'anno con un gran numero di ore di luce, a discapito degli altri periodi dell'anno. Occorre invece tenere conto dell'energia totale ricevuta dal pannello solare nell'arco dell'intero anno. Nel caso dell'Italia l'angolo β ottimale è circa 30° , con i pannelli rivolti esattamente a sud (se ci trovassimo nell'emisfero australe i pannelli andrebbero invece inclinati verso nord).

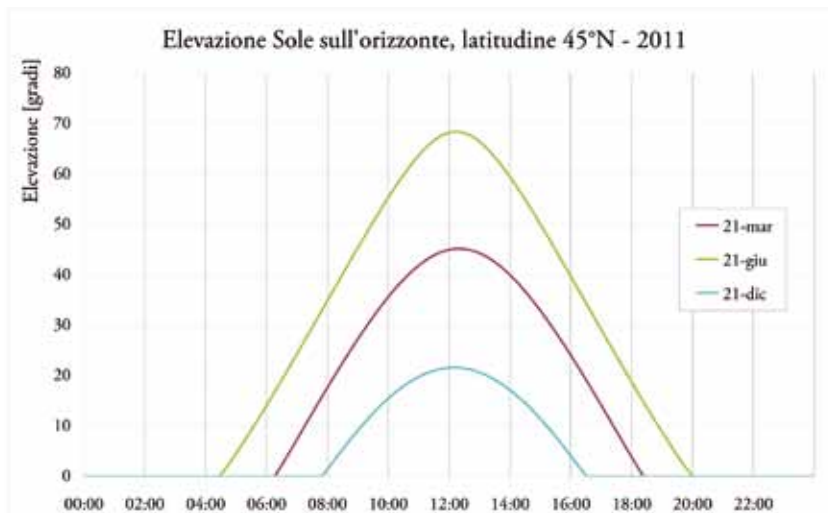


Fig. C.2. – Curve di elevazione del Sole sull'orizzonte in tre diversi giorni dell'anno, calcolate per una località con latitudine 45°Nord.

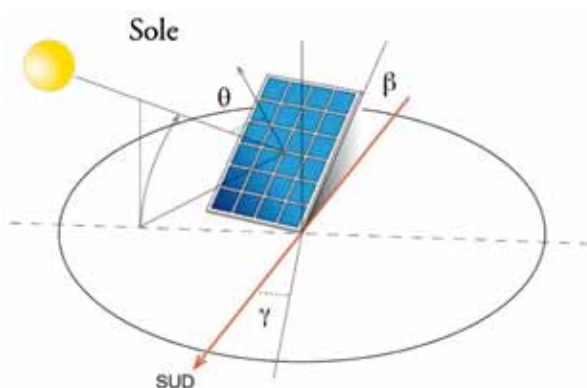


Fig. C.3. – Definizione degli angoli che caratterizzano la posizione di un pannello fotovoltaico rispetto ai punti cardinali e alla direzione di provenienza dei raggi solari (fonte: <http://www05.abb.com>).

Occorre poi considerare anche l'eventualità che il sito sul quale un impianto fotovoltaico viene installato non sia rivolto esattamente a sud, ma abbia un orientamento non nullo nella direzione est-ovest. Questo potrebbe essere ad esempio il caso del tetto di una casa non esattamente orientata secondo i punti cardinali. La seguente tabella raccoglie i fattori correttivi per i quali l'irraggiamento di un piano orizzontale di una certa località deve essere moltiplicato. Stando alle Tabelle II e C.I, un pannello solare con superficie di 1 m^2 installato a Roma (latitudine $41^\circ 53' 35''$ N) su di un tetto avente un'inclinazione di 30° ed un orientamento verso est di 15° riceverà annualmente un irraggiamento $1612 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 1\text{ m}^2 \cdot 1,12 = 1805\text{ kWh}$.

Tabella C.I. – Fattori correttivi ai valori di irraggiamento di GHI per un impianto fotovoltaico avente un certo angolo d'orientamento nella direzione est-ovest e un certo angolo di inclinazione dei pannelli.

Nord Italia – latitudine 44°N

Inclinazione (β)	Orientamento (γ)				
	0° (sud)	$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 90^\circ$ (est, ovest)
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10°	1,07	1,08	1,09	1,04	0,99
20°	1,11	1,10	1,09	1,07	0,96
30°	1,13	1,13	1,10	1,07	0,93
40°	1,12	1,11	1,09	1,05	0,89
50°	1,09	1,08	1,05	1,02	0,83
60°	1,03	0,99	0,96	0,93	0,77
70°	0,95	0,95	0,93	0,89	0,71
90°	0,74	0,74	0,73	0,72	0,57

Centro Italia – latitudine 41°N

Inclinazione (β)	Orientamento (γ)				
	0° (sud)	$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 90^\circ$ (est, ovest)
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10°	1,07	1,07	1,06	1,04	0,99
20°	1,11	1,11	1,09	1,07	0,96
30°	1,13	1,12	1,10	1,07	0,92
40°	1,12	1,12	1,09	1,05	0,87
50°	1,09	1,08	1,05	1,01	0,82
60°	1,03	1,02	0,99	0,96	0,76
70°	0,94	0,94	0,92	0,88	0,70
90°	0,72	0,72	0,71	0,70	0,56

Sud Italia – latitudine 38°N

Inclinazione (β)	Orientamento (γ)				
	0° (sud)	$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 90^\circ$ (est, ovest)
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10°	1,06	1,06	1,05	1,04	0,99
20°	1,10	1,09	1,08	1,06	0,96
30°	1,11	1,10	1,08	1,06	0,92
40°	1,10	1,09	1,07	1,03	0,87
50°	1,06	1,05	1,03	0,99	0,82
60°	0,99	0,99	0,96	0,93	0,75
70°	0,91	0,91	0,88	0,88	0,69
90°	0,68	0,68	0,68	0,67	0,55

Glossario

A

Accettore

Dal latino *acceptus*, indica in generale «colui che riceve». In fisica, gli accettori sono atomi utilizzati per drogare semiconduttori e ricevere da essi degli elettroni. Si utilizzano per formare delle zone positive (*zone p*) in cui il numero di lacune è maggiore rispetto al numero di elettroni. Ad esempio nel caso del silicio, il quale possiede quattro elettroni di valenza, gli elementi accettori sono quelli appartenenti al gruppo III della tavola periodica, quindi boro (B), alluminio (Al), indio (In) e gallio (Ga). Utilizzati in combinazione con atomi donori permettono di formare delle giunzioni p-n.

Anodo

Dal greco *ανωδος* (anodos), «salita». Il termine fu introdotto nel 1834 da Michael Faraday durante i suoi studi sulla conducibilità dei liquidi. All'interno di un apparecchio elettronico, l'anodo è l'elettrodo a potenziale maggiore (polo positivo) e può raccogliere, accelerare o deflettere gli elettroni emessi dal catodo, l'elettrodo a potenziale minore (polo negativo). Per convenzione, il verso della corrente è quello delle cariche libere positive e va dall'anodo al catodo.

B

Banda energetica

Intervallo di energia che gli elettroni possono (o meno) occupare. A seconda dell'energia e della quantità di moto possedute, l'elettrone può trovarsi nella banda di valenza o in quella di conduzione. Tra la *banda di valenza* (ad energia inferiore) e la *banda di conduzione* (ad energia maggiore) esiste una banda intermedia, detta *banda proibita* o *energy gap*, che non può essere occupata: gli elettroni devono necessariamente avere energia minore (elettroni di valenza) o maggiore (elettroni di conduzione) rispetto all'intervallo proibito. Nei conduttori la banda di valenza e quella di conduzione sono sovrapposte, per cui c'è un continuo movimento di elettroni all'interno dei conduttori. Negli isolanti, al contrario, la banda proibita è molto ampia, per cui è molto improbabile che un elettrone di valenza passi alla banda di conduzione. Nei semiconduttori il gap ha un valore moderato ed è quindi possibile, fornendo energia agli elettroni, il loro "salto" da una banda all'altra.

C

Catena protone-protone (o p-p)

Processo di fusione nucleare in più fasi che converte nuclei di idrogeno, ossia protoni, in nuclei di elio, con grande rilascio di energia. La catena p-p costituisce il processo di combustione predominante nelle stelle di dimensione uguale o inferiore a quella del Sole.

Catodo

Dal greco *καταθωδος* (catodos), «discesa». Il termine fu introdotto nel 1834 da Michael Faraday durante i suoi studi sulla conducibilità dei liquidi. All'interno di un apparecchio elettronico, il catodo è l'elettrodo a potenziale minore (polo negativo) ed emette gli elettroni che poi saranno raccolti, accelerati o deflessi dall'anodo, l'elettrodo a potenziale maggiore (polo positivo). Per convenzione, il verso della corrente è quello delle cariche libere positive e va dall'anodo al c.

CdTe

si tratta di un materiale semiconduttore che contiene cadmio e tellurio, usato soprattutto in forma di film sottile policristallino per dispositivi fotovoltaici.

Cella fotovoltaica

Dispositivo in grado di convertire la radiazione luminosa in energia elettrica. È costituito da un *wafers* (una “fetta” sottile) di materiale semiconduttore opportunamente drogato (*giunzione p-n*) e successivamente trattato in modo da evitare fenomeni di riflessione della radiazione incidente. I contatti elettrici in metallo sono posti sulle due facce del dispositivo cui può essere quindi collegato un carico resistivo. L'intera cella f. ha uno spessore che non supera il mezzo millimetro ed ha dimensioni che generalmente, per la tecnologia basata sul silicio, vanno dai 10 ai 15 cm per lato. Più celle collegate in serie e/o parallelo formano un modulo fotovoltaico.

CIGS

Copper Indium Gallium Selenide: si tratta di un materiale semiconduttore che contiene rame, indio, gallio e selenio, usato soprattutto in forma di film sottile policristallino per dispositivi fotovoltaici.

CIS

Come il CIGS, ma nel caso in cui il composto non contenga il gallio.

CLFR

Compact Linear Fresnel Reflector: insieme di specchi piani che, opportunamente orientati su un tubo ricevitore, simulano la superficie di un concentratore parabolico lineare.

Conto energia

Meccanismo di incentivazione statale alla produzione di energia elettrica da impianti fotovoltaici (con potenza di picco non inferiore ad 1 kWp) connessi in maniera permanente alla rete elettrica nazionale. Fu inizialmente promosso dalla Comunità Europea e recepito in Italia a partire dal 2003 con una serie di decreti legislativi e attuativi. Gli incentivi, rivolti a privati, imprese ed enti pubblici, hanno durata ventennale, con calo graduale delle tariffe incentivate, e sono proporzionali all'energia elettrica prodotta.

Corpo nero

Corpo ideale in grado di assorbire tutta la radiazione elettromagnetica incidente. Anche se in natura non esiste nessun corpo perfettamente assorbente, è comunque possibile realizzare un oggetto del genere prendendo una cavità, mantenuta ad una temperatura T controllata e avente un piccolo foro per permettere alla radiazione di passarvi attraverso. La radiazione entrante non ha alcuna possibilità di uscire poiché viene assorbita dalle pareti interne della cavità dopo un certo numero di riflessioni. Questo oggetto, essendo in perfetto equilibrio termico, irradia la stessa quantità di energia che assorbe (principio di conservazione dell'energia) ed emette una radiazione, detta *radiazione di corpo nero*, avente uno spettro caratteristico, descritto dalla distribuzione di Planck, dipendente esclusivamente dalla temperatura del corpo. La differenza tra lo spettro di un corponero e quello di un oggetto reale permette di risalire alla composizione chimica dell'oggetto stesso.

Cortocircuito

Collegamento tra due o più punti di un circuito, aventi diversa tensione, per mezzo di una resistenza o un'impedenza idealmente nulla. La conseguenza di questo collegamento è che la differenza di tensione tra i diversi punti viene pressoché annullata, mentre la *corrente di cortocircuito*, non avendo vincoli a causa del valore molto piccolo della resistenza di collegamento tra i due o più punti aventi tensioni diverse, può assumere qualsiasi valore, arbitrariamente elevato, e può quindi danneggiare il circuito stesso.

Costante solare

Indica la quantità di radiazione solare incidente sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre, su un piano perpendicolare alla direzione di provenienza dei raggi, per unità di tempo e di superficie. Il suo valore medio è di circa 1360 W/m^2 e può subire piccole variazioni a seconda delle stagioni, dell'ora del giorno e della latitudine, ossia della distanza tra la Terra e il Sole e dell'inclinazione dei raggi solari. Anche l'attività delle macchie solari può incidere sul valore della costante solare. L'energia media che raggiunge il suolo corrisponde all'incirca al 47% dell'energia totale incidente sull'atmosfera a causa di fenomeni di assorbimento, riflessione e rifrazione operati dall'atmosfera e dalle nubi.

Crescita epitassiale (o epitassia)

Dal greco $\epsilon\pi\iota$ (epi), «sopra» e $\tau\acute{\alpha}\xi\iota\varsigma$ (taxis), «ordinamento». È un processo che consente di depositare sottili strati di materiale cristallino su un substrato, anch'esso cristallino, che determinerà le proprietà strutturali e la tipologia di crescita degli strati successivi. Se il materiale epitassiale è lo stesso del substrato, il processo prende il nome di omoepitassia, altrimenti, per materiali chimicamente differenti, si parla di eteroepitassia. Generalmente lo spessore dello strato epitassiale può essere compreso tra una frazione di nanometro e qualche decina di micron.

D

Diodo

Elemento circuitale bipolare dotato di conducibilità idealmente unidirezionale. Superata una certa tensione di soglia, il diodo permette alla corrente elettrica di passare in un verso risentendo di una resistività da parte del diodo sostanzialmente nulla. Viceversa se una corrente elettrica tentasse di circolare in verso opposto incontrerebbe una resistività praticamente infinita. La caratteristica tensione-corrente del diodo è non-lineare ed è asimmetrica rispetto agli assi del piano cartesiano. Esistono varie tipologie di diodo, a seconda del fenomeno fisico su cui è basato il loro funzionamento. Nell'uso comune, i più diffusi sono i diodi a semiconduttore, i quali vengono applicati, ad esempio, nei fotorilevatori e nei LED (Light Emitting Diode).

Distribuzione di Planck

Anche nota come *legge di Planck*, è la distribuzione dell'intensità della radiazione di un corpo nero in funzione della lunghezza d'onda (o della frequenza) ad una data temperatura.

Donore

Detto anche *datore* o *donatore*. I donori sono atomi utilizzati per drogare semiconduttori e fornire ad essi elettroni di conduzione. Si utilizzano per formare delle zone negative (*zone n*) in cui il numero di elettroni è maggiore rispetto al numero di lacune. Ad esempio nel caso del silicio, il quale possiede quattro elettroni di valenza, degli elementi donori sono quelli appartenenti al gruppo V della tavola periodica, quindi fosforo (P) e arsenico (As), antimonio (Sb) e bismuto (Bi). Utilizzati in combinazione con atomi accettori permettono di formare delle giunzioni p-n.

Drogaggio

Aggiunta all'interno di un semiconduttore di atomi di altri elementi chimici. Scegliendo opportunamente le "impurezze" da aggiungere al reticolo originale (basta un atomo per ogni miliardo) si possono sbilanciare gli equilibri elettronici dei legami in zone diverse del materiale (*zone p* e *zone n*), che rimane comunque elettricamente neutro.

E

Effetto fotoelettrico

Fenomeno fisico per cui una superficie (generalmente di metallo) emette elettroni quando viene investita da una radiazione elettromagnetica di sufficiente energia (e corrispondente frequenza). L'energia minima dei fotoni per innescare il processo di emissione è detta *energia di soglia*, cui si associa una *frequenza di soglia*, che dipende dal materiale da investire.

Effetto Seebeck

Effetto termoelettrico di conversione del calore in elettricità. In un conduttore costituito da metalli (o semiconduttori) differenti, disposti in maniera alternata, ponendo le saldature tra i metalli a temperature diverse si genera un flusso di corrente elettrica dalle saldature a temperatura minore a quelle a temperatura maggiore. Ogni materiale è dotato di un *potere termoelettrico* (o *coefficiente di Seebeck*) differente, che dipende dalla sua struttura cristallina e dalla sua temperatura e indica l'intensità con la quale il materiale manifesterà l'effetto Seebeck. Si basano su questo fenomeno le termocoppie, utilizzate per la misurazione della temperatura. Il fenomeno inverso è detto *effetto Peltier*.

Effetto termoelettrico

Fenomeno di conversione, che ha luogo nei metalli o nei semiconduttori, del calore in elettricità (effetto Seebeck) o dell'elettricità in calore (effetto Peltier ed effetto Thomson).

Efficienza quantica (QE, Quantum Efficiency)

Frazione di fotoni, calcolata in funzione di ogni lunghezza d'onda, in grado di generare in un semiconduttore una coppia elettrone-lacuna che, diffondendo nel semiconduttore e separata dal campo elettrico presente nella regione di svuotamento, induce una corrente per effetto fotovoltaico.

Elettrone

Particella elementare con carica elettrica $-1,60 \cdot 10^{-19}$ C e massa a riposo $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, costituente fondamentale dell'atomo, insieme al protone e al neutrone che ne costituiscono il nucleo. Tutte le cariche elettriche presenti in natura sono multipli, positivi o negativi, della carica negativa dell'elettrone. Il numero di elettroni in un atomo neutro è pari al numero atomico (numero di protoni, carichi positivamente). Se i due numeri differiscono, l'atomo risulta carico e prende il nome di ione. Agli elettroni si deve il comportamento chimico degli atomi e la loro conducibilità elettrica.

Energy gap (banda proibita)

Intervallo di energie all'interno del quale nessun elettrone può esistere. Le energie di questo intervallo proibito sono comprese tra l'energia minima della banda di conduzione e l'energia massima della banda di valenza.

Energy PayBack Time

Tempo di funzionamento del dispositivo (in anni) necessario affinché l'energia da esso prodotta sia uguale a quella usata per costruirlo e renderlo operativo nel luogo in cui viene usato.

Energy storage (immagazzinamento di energia)

Sistema che permette di accumulare energia per utilizzarla in un momento successivo. I macchinari che operano tale procedimento sono talvolta chiamati accumulatori. Un esempio di energy storage viene dalle dighe: immagazzinano l'energia dell'acqua sotto forma di energia potenziale, portandola ad una certa quota, e la liberano quando la domanda energetica è più consistente. Altro esempio molto comune viene dalle pile: in questo caso l'energia immagazzinata è elettrochimica.

F**Fattore di riempimento (FF, Fill Factor)**

Fattore definito come il rapporto percentuale tra la massima potenza effettiva del dispositivo fotovoltaico e la sua massima potenza teorica (data dal prodotto della tensione di circuito aperto per la corrente di cortocircuito). È un parametro fondamentale per valutare le prestazioni delle celle. In genere, per i dispositivi al silicio presenti in commercio, il Fattore di riempimento si aggira attorno al 75%, mentre alcune tecnologie d'avanguardia come le celle a tripla giunzione possiedono un Fattore di riempimento anche dell'87%.

Fonte rinnovabile

Sorgente di energia in grado di rigenerarsi nel tempo. I tempi con i quali una fonte energetica si rinnova coprono uno spettro temporale molto ampio. L'energia solare o eolica sono, ad esempio, sempre presenti mentre il carbone e il petrolio che oggi vengono estratti hanno avuto bisogno di alcuni milioni di anni per formarsi. Il termine "rinnovabile" deve quindi essere inteso su di un tempo-scala confrontabile con la durata della vita di un essere umano. Si definiscono quindi come rinnovabili fonti energetiche quali il Sole, il vento, l'idroelettrico, le maree, le biomasse, il gradiente geotermico terrestre.

Fonte non rinnovabile

Sorgente di energia avente un periodo di formazione di molto superiore a quello di consumo attuale (ad esempio le fonti fossili come petrolio, carbone e gas naturale), oppure è una sorgente che, presente in riserve esauribili sulla scala dei tempi umana, è limitata nel futuro.

Fotone

Dal greco φῶς, φωτός (phòs, photòs), «luce». Particella elementare, priva di massa (a riposo) e di carica elettrica. È il quanto di energia, ossia l'unità fondamentale di energia elettromagnetica. I fotoni possiedono un valore di energia proporzionale alla loro frequenza e si propagano ad una velocità inversamente proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo nel quale viaggiano. Nel vuoto, il quale ha indice di rifrazione unitario, i fotoni si propagano alla velocità della luce.

G

Giunzione p-n

Interfaccia tra due zone di un semiconduttore, sottoposte a drogaggi differenti, di tipo *p* e di tipo *n*. La *zona n* (negativa) è caratterizzata da un eccesso di elettroni, mentre nella *zona p* (positiva) vi è un sovrannumero di lacune. Tra i due strati se ne viene a creare un terzo, neutro e sottilissimo, detto regione di svuotamento o di transizione, all'interno del quale avvengono i fenomeni di ricombinazione elettrone-lacuna e gli spostamenti di cariche. La giunzione *p-n* costituisce l'elemento fondamentale della cella fotovoltaica e di altri dispositivi a semiconduttore, come i diodi a giunzione, i transistor e i LED.

Grid parity (parità di griglia)

Insieme delle condizioni economiche che si realizzano nel momento in cui il costo dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili uguaglia quello dell'energia prodotta a partire da fonti non rinnovabili tradizionali. Il raggiungimento di questa condizione per le energie pulite può essere favorito da specifiche politiche ambientali incentivanti. Nel caso del fotovoltaico, dipende anche dall'avanzamento tecnologico, che permette un graduale calo nei costi di produzione dei pannelli e un aumento nel loro rendimento, e dalle condizioni di irraggiamento del paese che si prende in esame. In Italia, ad esempio, la grid parity sarà raggiunta prima nelle regioni meridionali.

I

Impiantazione ionica

Processo di drogaggio in cui degli ioni accelerati ad alta velocità vengono impiantati in un semiconduttore per modificarne le proprietà fisiche in prossimità della sua superficie. È una tecnica vantaggiosa perché necessita di temperature inferiori rispetto ad altri processi di drogaggio, permette una definizione molto precisa della zona drogata e non produce reazioni chimiche potenzialmente inquinanti, ma ha lo svantaggio di danneggiare il reticolo cristallino del semiconduttore nel bombardamento ionico. Il risultato dell'impiantazione ionica dipende dalla quantità di ioni impiantati, dalla loro massa e dalla profondità del drogaggio.

Inverter (invertitore)

È un dispositivo elettrico che converte la corrente continua in corrente alternata. Vengono comunemente chiamati inverter anche i raddrizzatori-invertitori, dispositivi in grado di variare anche la tensione e/o la fase della corrente in entrata. Nel caso di un impianto fotovoltaico, l'inverter, collegato alla rete elettrica, è provvisto di sistemi software e hardware in grado di ottimizzarne il rendimento "inseguendo" il punto di massima potenza della caratteristica curva tensione-corrente del pannello, minimizzando così le perdite di potenza dovute a condizioni meteorologiche o di insolazione sfavorevoli. Questo sistema prende il nome di MPPT (dall'inglese Maximum Power Point Tracker).

K

kWp (chilowatt-picco)

Unità di misura della potenza di un dispositivo fotovoltaico. Corrisponde alla potenza che il dispositivo eroga quando si trova in specifiche condizioni di funzionamento: intensità di luce solare incidente uguale a 1 kW/m^2 e temperatura del modulo uguale a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

kWh (chilowatt-ora)

Unità di misura dell'energia corrispondente ad una potenza di 1000 W assorbita (o prodotta) per un tempo di un'ora. Per maggiori informazioni si vedano le appendici A e B.

L**Lacuna**

Spazio vuoto nel semiconduttore lasciato dal distacco di un elettrone dal suo atomo. Essendo la lacuna una "assenza" di carica negativa, viene considerata per convenzione come una carica positiva. Lo spostamento degli elettroni, di lacuna in lacuna, può essere descritto come un moto di lacune con verso opposto a quello degli elettroni e concorde con il verso della corrente elettrica.

Legame covalente

Legame che si crea quando due atomi condividono una o più coppie (doppietti) di elettroni per raggiungere una configurazione elettronica esterna stabile (ottetto). Se gli atomi condividono un solo doppietto elettronico, si parla di legame singolo, altrimenti il legame è multiplo. Tra atomi dello stesso elemento si stabilisce un *legame covalente puro*, o *omopolare* (es. molecola di idrogeno H_2). Tra atomi di elementi diversi accade che gli elettroni di legame risultino maggiormente attratti dall'atomo più elettronegativo, così che la molecola che si viene a creare presenta uno squilibrio nella distribuzione di carica, ossia crea un dipolo elettrico (es. molecola di acqua H_2O). In questo caso si ha un *legame covalente polare*.

Luce bianca

Radiazione elettromagnetica composta dalla sovrapposizione di tutte le componenti spettrali della luce visibile, corrispondenti a tutti i colori che siamo in grado di vedere. La luce bianca si può scomporre mediante un prisma nelle sue componenti spettrali, che osserviamo come il caratteristico insieme di colori dell'arcobaleno. La luce solare è bianca.

O**Onda elettromagnetica**

Perturbazione simultanea del campo elettrico e di quello magnetico che oscillano in fase su piani ortogonali tra loro e rispetto alla direzione di propagazione dell'onda, che viaggia nello spazio (anche vuoto), trasportando energia, ma non materia. È caratterizzata dalla frequenza ν e dalla lunghezza d'onda λ e la sua velocità dipende dall'indice di rifrazione del mezzo in cui si propaga.

R**Radiazione**

Emissione di energia da parte di un corpo. La propagazione di tale energia avviene sotto forma di radiazione ondulatoria (es. radiazione sonora, radiazione elettromagnetica o gamma) o radiazione corpuscolare (es. radiazione alfa, radiazione beta).

Radiazione cosmica di fondo

Detta anche *radiazione fossile* e spesso abbreviata con l'acronimo inglese CMB (*cosmic microwave background*), si ritiene essere il residuo della radiazione elettromagnetica prodotta dal Big Bang. È una radiazione di corpo nero, che permea in maniera omogenea e isotropa l'universo (salvo piccolissime variazioni), nella regione delle microonde, ad una temperatura di 2,73 K. La radiazione cosmica di fondo ha una distribuzione spettrale che, più di ogni altro corpo, approssima la distribuzione spettrale di un corpo nero ideale. La sua scoperta, nel 1964, ad opera degli astronomi americani A. A. Penzias e R. W. Wilson, valse loro il premio Nobel nel 1978.

Radiazione elettromagnetica

Particolare forma di radiazione che si può classificare come radiazione ondulatoria (onde elettromagnetiche) o radiazione corpuscolare (fotoni) a seconda del particolare fenomeno oggetto di studio.

Radiazione diffusa

Parte della *radiazione globale* che arriva sulla superficie terrestre per effetto dell'atmosfera (nubi, gas...) ed ha vari angoli di incidenza. Si misura con un solarimetro posto in ombra rispetto alla *radiazione diretta*.

Radiazione diretta

Parte della *radiazione globale* che uno strumento riceve osservando direttamente il Sole. Si misura, in W/m^2 , con un solarimetro detto pireliometro.

Radiazione globale orizzontale (GHI, Global Horizontal Irradiation)

È la radiazione solare incidente su un metro quadro di superficie terrestre orizzontale. È data dalla somma di due diverse componenti: *radiazione diretta* e *radiazione diffusa*; si misura, in W/m^2 , con un solarimetro detto piranometro.

Radiazione riflessa

Detta anche *radiazione d'albedo*, è quella parte della *radiazione globale* che viene riflessa dal terreno o da altre superfici (specchi d'acqua, ghiacciai...). Si misura con un solarimetro rivolto verso il basso.

Regione di svuotamento (o regione di carica spaziale)

Spazio isolante che si forma in prossimità di una giunzione *p-n*, la zona di contatto tra due semiconduttori diversi. Per effetto dell'energia termica delle particelle, gli elettroni liberi del semiconduttore di tipo *n* tendono a migrare verso il semiconduttore di tipo *p*; l'inverso avviene per le lacune del tipo *p* che si spostano verso la zona *n*. A ridosso della giunzione, elettroni e lacune si ricombinano ionizzando positivamente uno strato di tipo *n* e negativamente uno strato di tipo *p*. Si crea così un campo elettrico che si oppone alla diffusione dei portatori liberi, e la zona raggiunge l'equilibrio termico: la diffusione termica e la deriva dei portatori sono bilanciate e la zona è isolante.

S**Smart grid (rete intelligente)**

È un sistema di distribuzione e trasporto dell'energia elettrica che permette di integrare diverse forme di produzione, dalle più tradizionali alle rinnovabili, dai grandi impianti agli impianti domestici. La smart grid opera attraverso software che monitorano in tempo reale l'intera rete, consentendo di evitare sprechi attraverso una gestione ottimale della produzione in base alla richiesta di consumo. Il concetto di smart grid è simile a quello della rete internet dove gli utenti sono connessi in maniera "orizzontale" anziché "verticale".

Solarimetro

Strumento in grado di misurare la radiazione solare nelle sue diverse componenti. In particolare, il solarimetro che misura la radiazione globale prende il nome di *piranometro*. Quando il sensore del piranometro viene posto in ombra rispetto al disco solare, questo strumento misura la radiazione diffusa e prende il nome di *piranometro a banda ombreggiata*. Per misurare la sola radiazione diretta, invece, si utilizza un solarimetro detto *pireliometro*. Il solarimetro è in grado di misurare la radiazione solare media o istantanea, e di apprezzarne le variazioni nel tempo. Tipicamente un solarimetro per funzionare sfrutta l'effetto termoelettrico di conversione del calore in energia elettrica.

Sovraccompensazione

Processo attraverso il quale è possibile invertire le caratteristiche di un semiconduttore già drogato dal tipo *p* al tipo *n*, o viceversa, attraverso l'aggiunta successiva di impurità droganti che diano luogo ad un eccesso di elettroni o lacune, variando la concentrazione di atomi accettori o donori.

Spettro elettromagnetico

Insieme di tutte le possibili frequenze che la radiazione elettromagnetica può assumere. Lo spettro elettromagnetico di un oggetto è invece la distribuzione dell'intensità della radiazione elettromagnetica in funzione della frequenza (o della lunghezza d'onda).

Spettro solare AM

Spettro della radiazione solare in funzione del parametro *Air Mass* (AM). È un parametro che indica il rapporto tra il percorso effettivo dei raggi solari attraverso l'atmosfera ed il minimo valore di tale percorso, che si ha quando il Sole è allo zenit (90° rispetto all'orizzonte). L'indice AM si esprime matematicamente in maniera approssimata come $AM = \gamma \sin \alpha$, con α angolo di elevazione del Sole rispetto all'orizzonte dell'osservatore.

T

Tensione di circuito aperto

Un circuito si definisce aperto se in esso non circola corrente a causa della presenza di un'interruzione della linea o, analogamente, se in quel punto della linea è presente una resistenza idealmente infinita. La tensione misurata ai capi del bipolo dell'interruzione è detta tensione di circuito aperto.

Transistor

Abbreviazione del termine inglese *transfer-resistor*. È un dispositivo elettronico a semiconduttori in grado di controllare il segnale in uscita in base al segnale in ingresso. Il suo funzionamento si basa sul differente drogaggio di zone di semiconduttore poste a contatto, che formano così delle giunzioni *p-n* in successione. Il transistor viene generalmente utilizzato come amplificatore di segnali elettrici o come interruttore elettronico.

V

Vettore energetico

Composto in grado di veicolare l'energia da una forma ad un'altra. L'energia veicolata può essere in grado di indurre processi termici, chimici o fisici. Esempi di vettori energetici sono idrogeno, petrolio, carbone, gas naturale, legna, batterie, acqua immagazzinata nelle dighe, molle...

W

Wth (watt termico)

Unità di misura della potenza di un collettore solare. $1 \text{ Wth} \approx 0,39 \text{ W}$ elettrici.

Z

Zenit

Dall'arabo *samt al-ra's*, «direzione della testa». Indica l'intersezione della verticale rispetto all'osservatore (perpendicolare al piano dell'orizzonte) con la sfera celeste. Zenit e Nadir – il punto diametralmente opposto sulla sfera celeste – sono i poli del sistema altazimutale, un sistema di coordinate astronomiche relativo all'osservatore. Lo zenit astronomico è definito dalla gravità locale del punto in cui si trova l'osservatore ed il punto sulla sfera celeste individuato dal prolungamento all'infinito della direzione del filo a piombo; lo zenit geocentrico è il punto sulla sfera celeste individuato dal prolungamento della direzione congiungente il centro della Terra con l'osservatore.

© 2011, Società Italiana di Fisica, Proprietà letteraria riservata

Giornale di Fisica, Vol. 53, Suppl. 1
Associato all'Unione Stampa Periodica Italiana

Questo numero è stato prodotto e realizzato dall'ufficio editoriale del *Giornale di Fisica*, Bologna
e stampato a Bologna da Tipografia Monograf
nel mese di marzo 2012

Direttore Responsabile: LUISA CIFARELLI

Autorizzazione del Tribunale di Bologna 2651 del 19 Luglio 1956