

Progetto Luce

Come catturare l'energia della luce
solare

Luce - Energia

- Tutta l'energia disponibile sulla terra ci proviene dal sole
- Il sole emette energia come un corpo nero
- Solo una parte di questa energia è nella regione del "visibile"
- La conversione di questa energia in corrente elettrica è la speranza del nuovo millennio

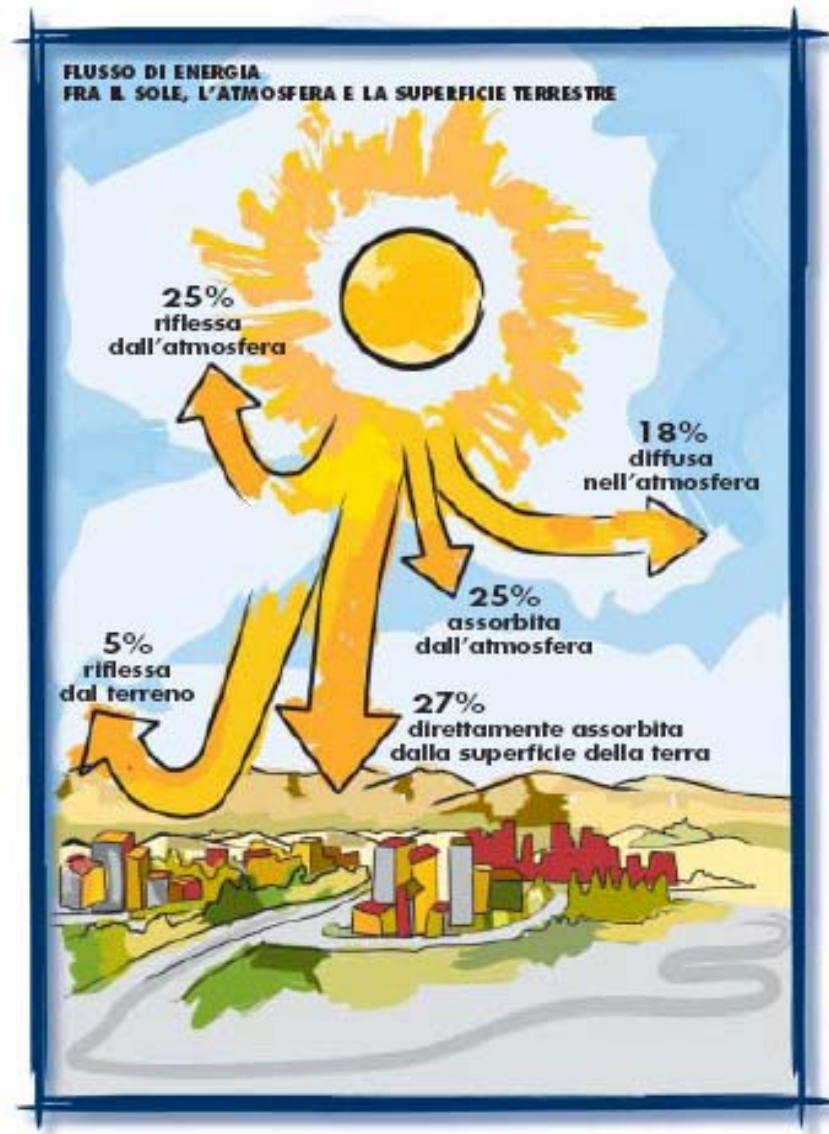
Energia del sole sulla terra

- Il sole emette nello spazio un flusso di energia pari 64 MW per m²
- L'energia irradiata dal sole si propaga nello spazio, e dopo aver attraversato l'atmosfera arriva al suolo con una intensità media pari a 165000 TW/ giorno
- Ovvero circa 10.000 volte il consumo globale giornaliero

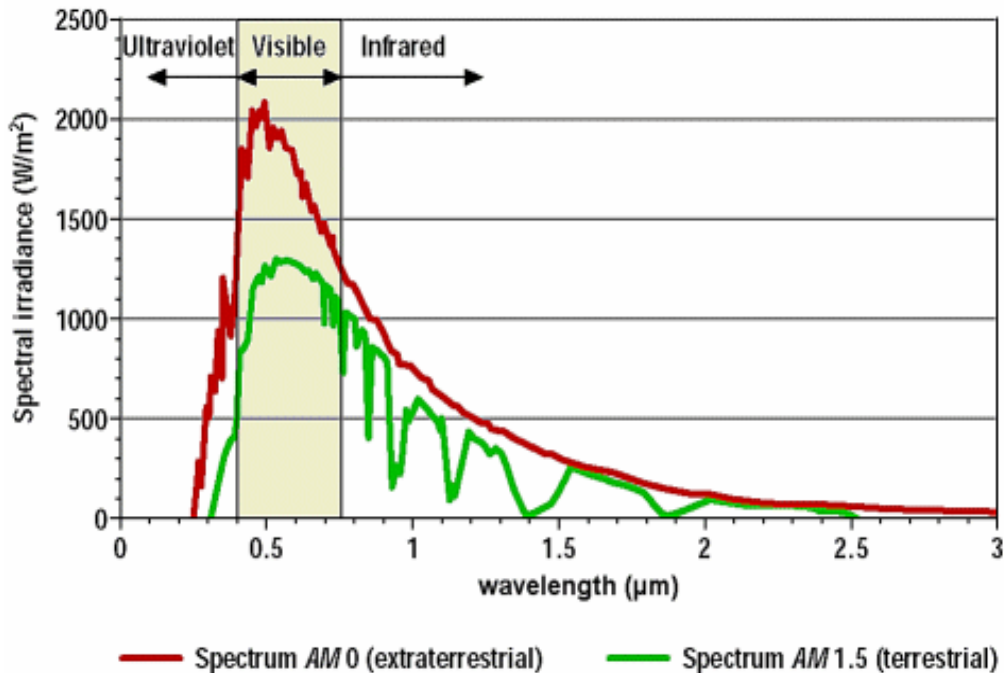
Per esempio:

In una giornata

- 3,6 kW/m² della pianura padana,
- 4,7 del Centro Sud e
- 5,4 della Sicilia.

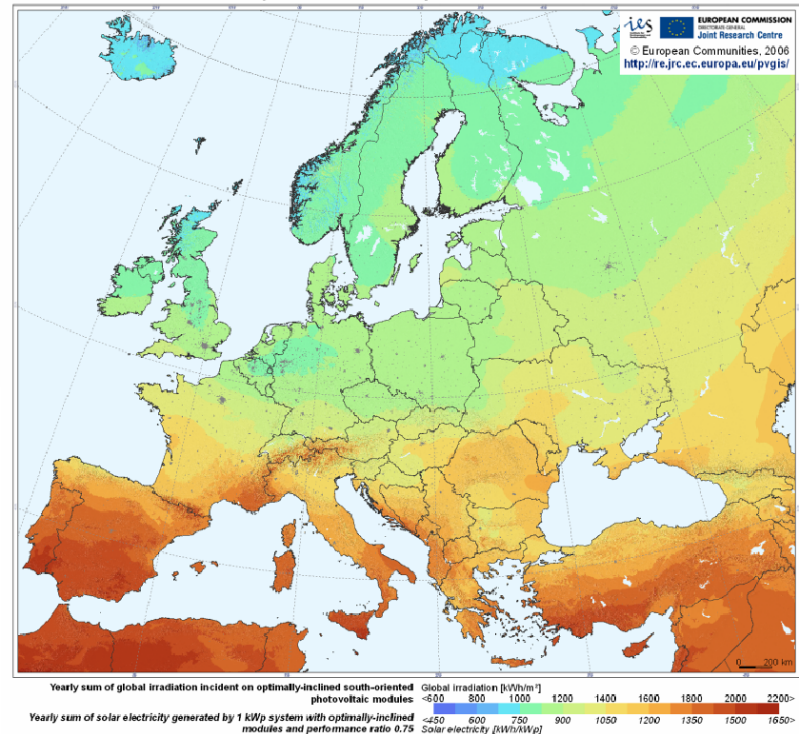


Lo spettro elettromagnetico del sole



AM 0 spessore di atmosfera attraversato zero
AM 1,5 spessore di atmosfera attraversato a 42°
(longitudine dell'Italia)

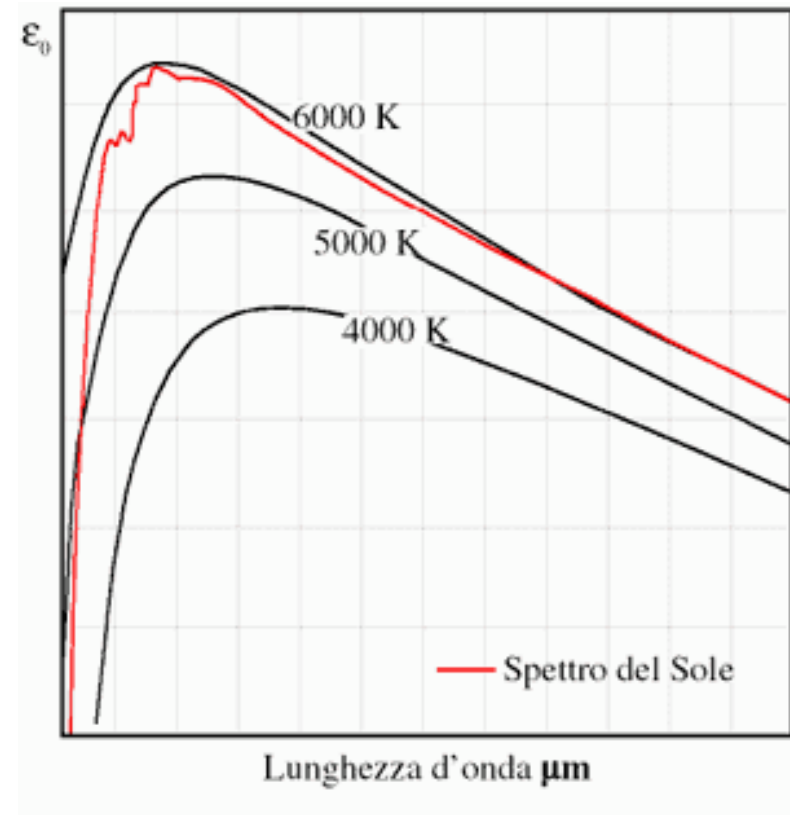
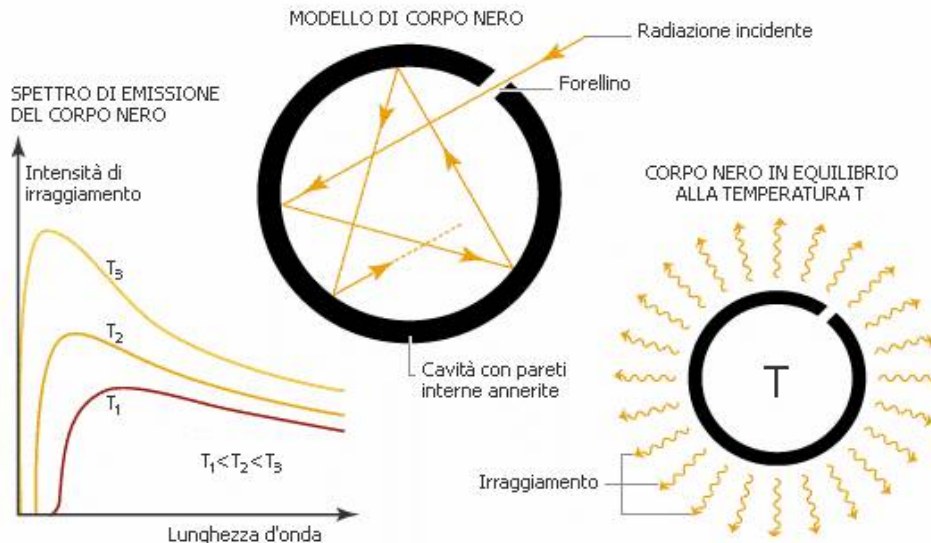
Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



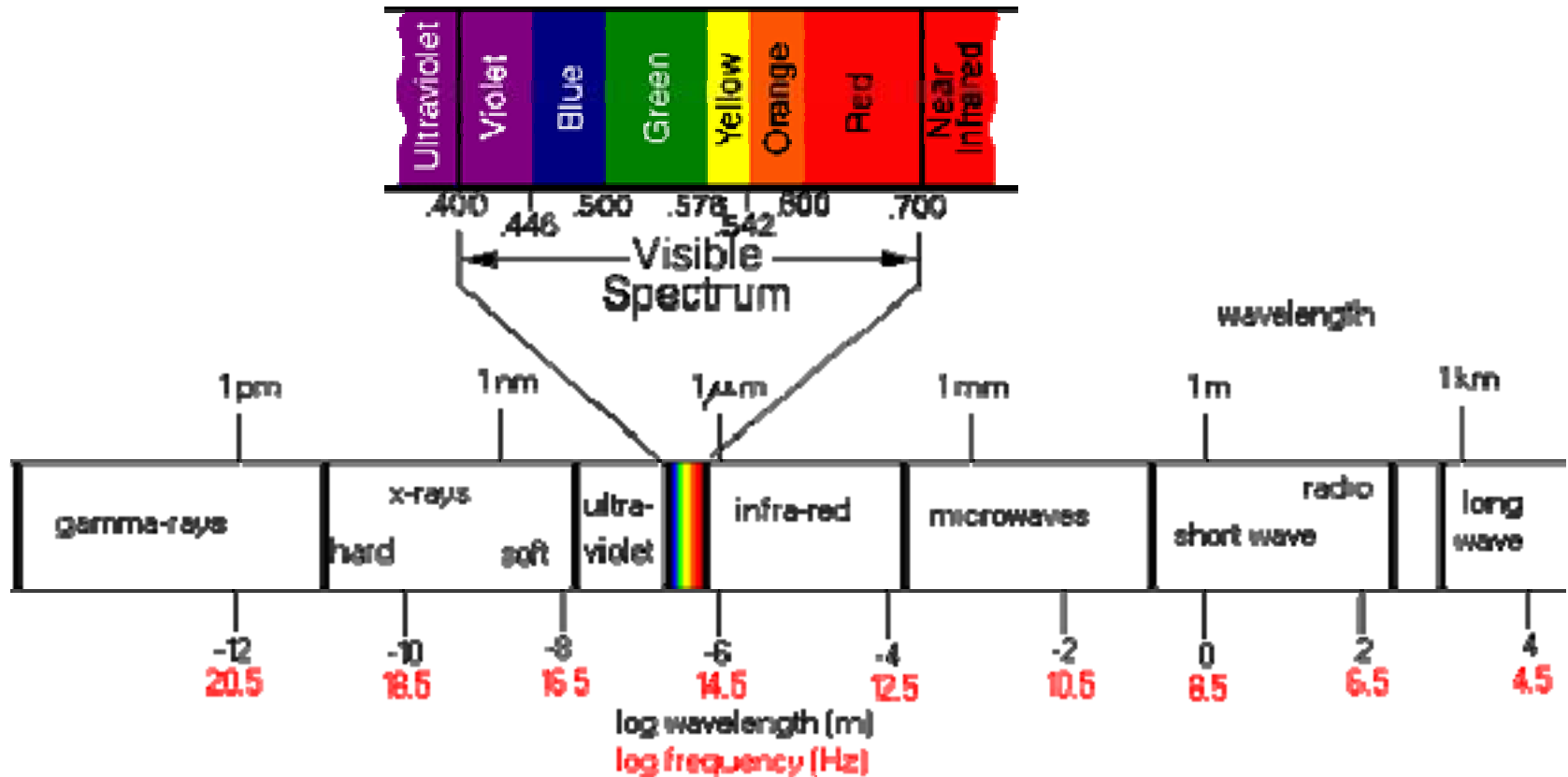
Che tipo di sorgente è il Sole

- Il sole emette la sua energia come fosse un **corpo nero** tenuto alla temperatura di circa 6000 K.

Si chiama corpo nero una cavità tenuta ad una temperatura costante.



Le onde elettromagnetiche e la Luce



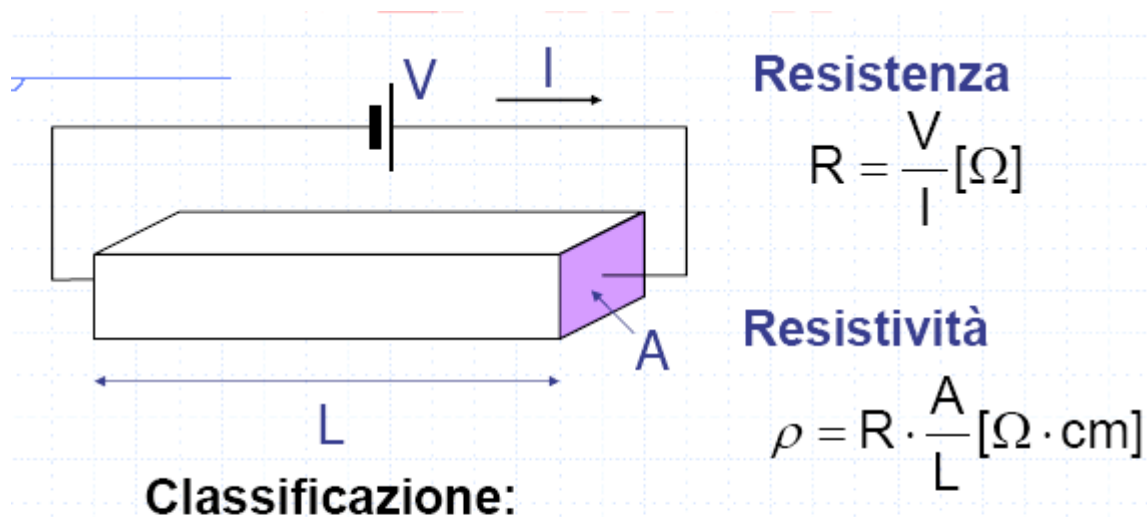
L'effetto fotovoltaico

- **1839**: viene scoperto l'effetto fotovoltaico: Alexandre Becquerel (padre di Henri), scopre che è possibile generare una corrente elettrica in materiali esposti alla luce
- **1883**: La prima cella solare viene costruita da Charles Fritts. Una cella al selenio (semiconduttore) ricoperta da un sottile strato d'oro forma una giunzione la cui efficienza non supera 1%.
- **1946**: Russel Ohl brevetta la moderna cella solare.
- **1954**: Nasce la tecnologia: sperimentando con i semiconduttori ai Laboratori Bell si scopre che il silicio drogato con certe impurezze è molto sensibile alla luce.

Quali materiali si possono usare

- La conversione fotovoltaica è possibile solo nei **semiconduttori**.
- Nel caso degli **isolanti**, la radiazione incidente non è in grado di staccare un elettrone dall'orbita attorno al nucleo.
- Mentre nei **conduttori**, l'agitazione termica, dovuta alla temperatura ambiente, è sufficiente alla creazione e distruzione di coppie elettrone-lacuna.
- Solo i semiconduttori hanno una **energy-gap** piccola, ma sufficiente a realizzare l'effetto rettificatore necessario al funzionamento di una cella fotovoltaica

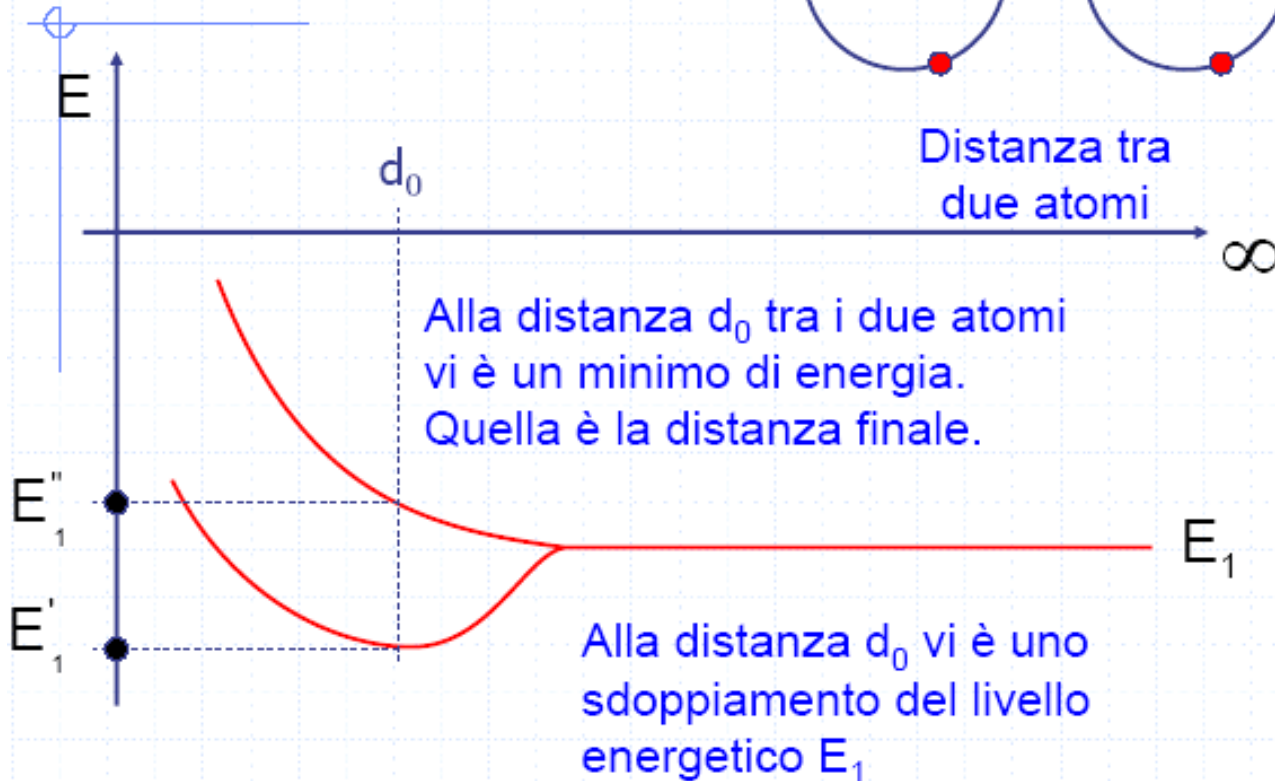
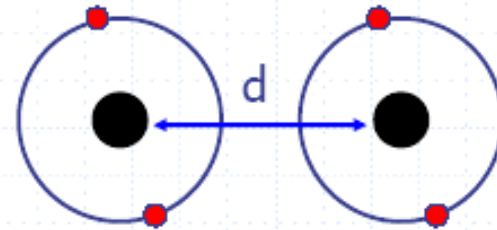
Classificazione dei Materiali



ISOLANTI	$\rho > 10^5 [\Omega\text{cm}]$
SEMICONDUTTORI	$10^{-3} < \rho < 10^5 [\Omega\text{cm}]$
CONDUTTORI	$\rho < 10^{-3} [\Omega\text{cm}]$

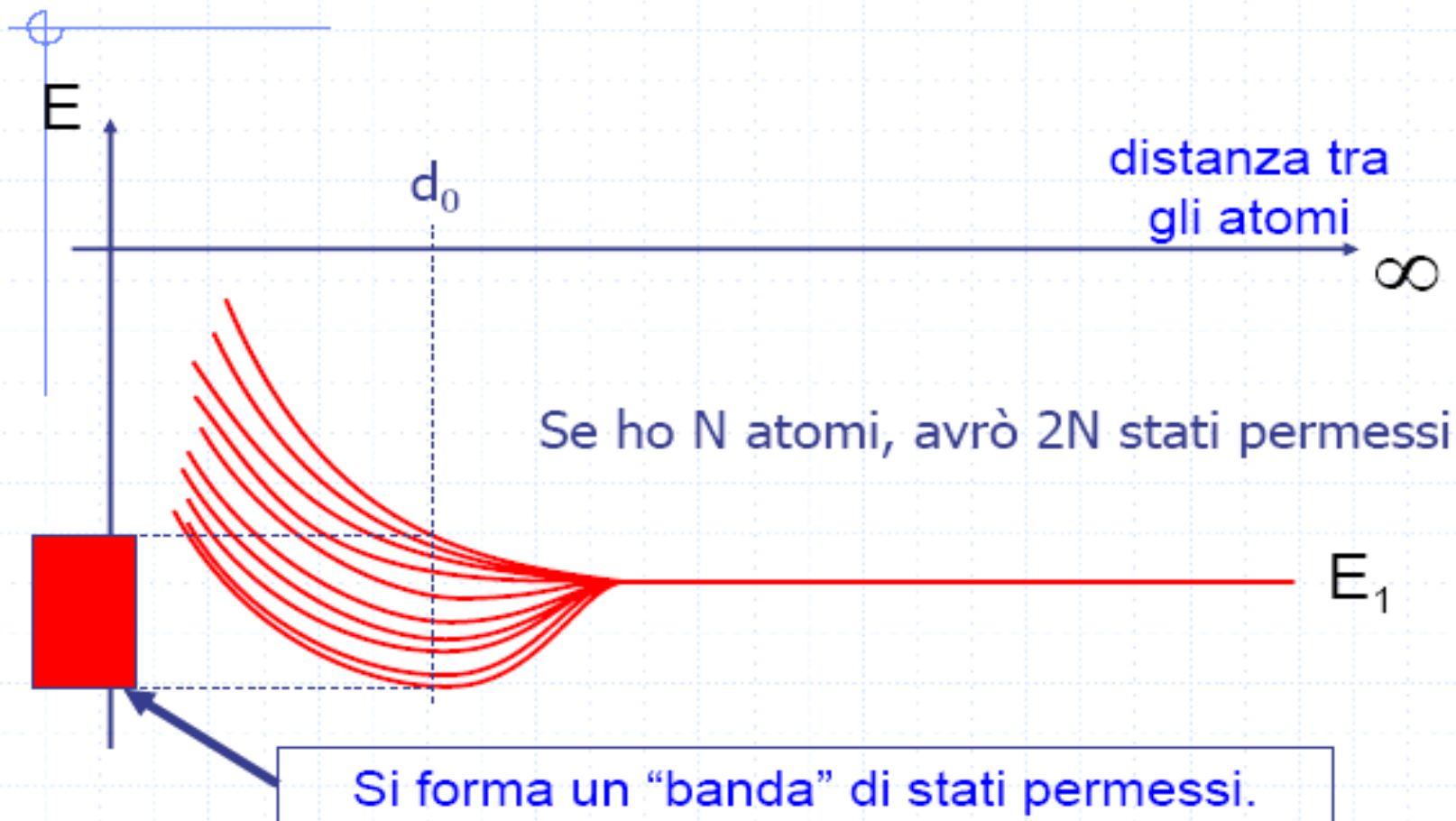
Come si forma la energy-gap?

Modello a Bande

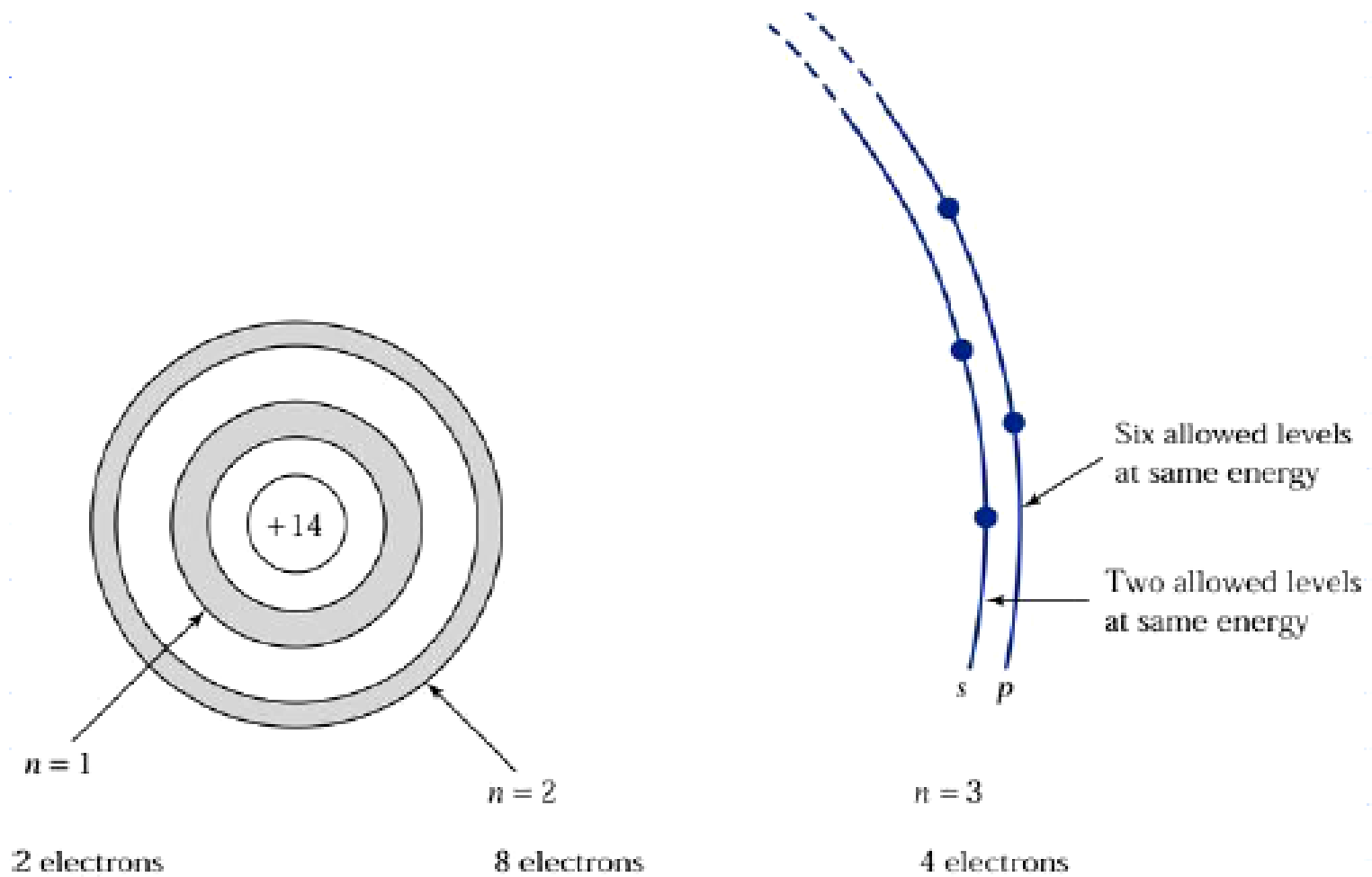


Modello a Bande

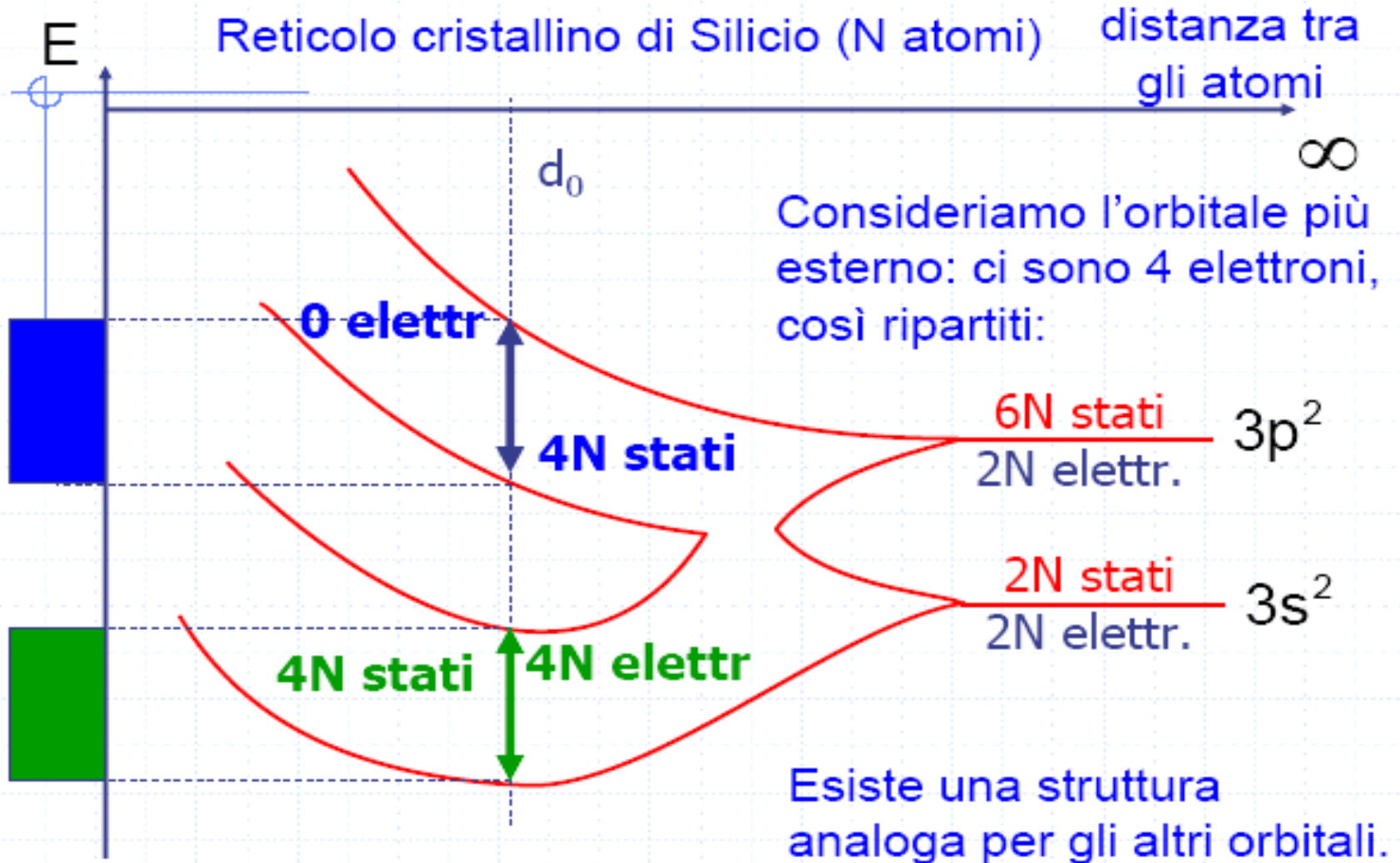
Avviciniamo ora N atomi:



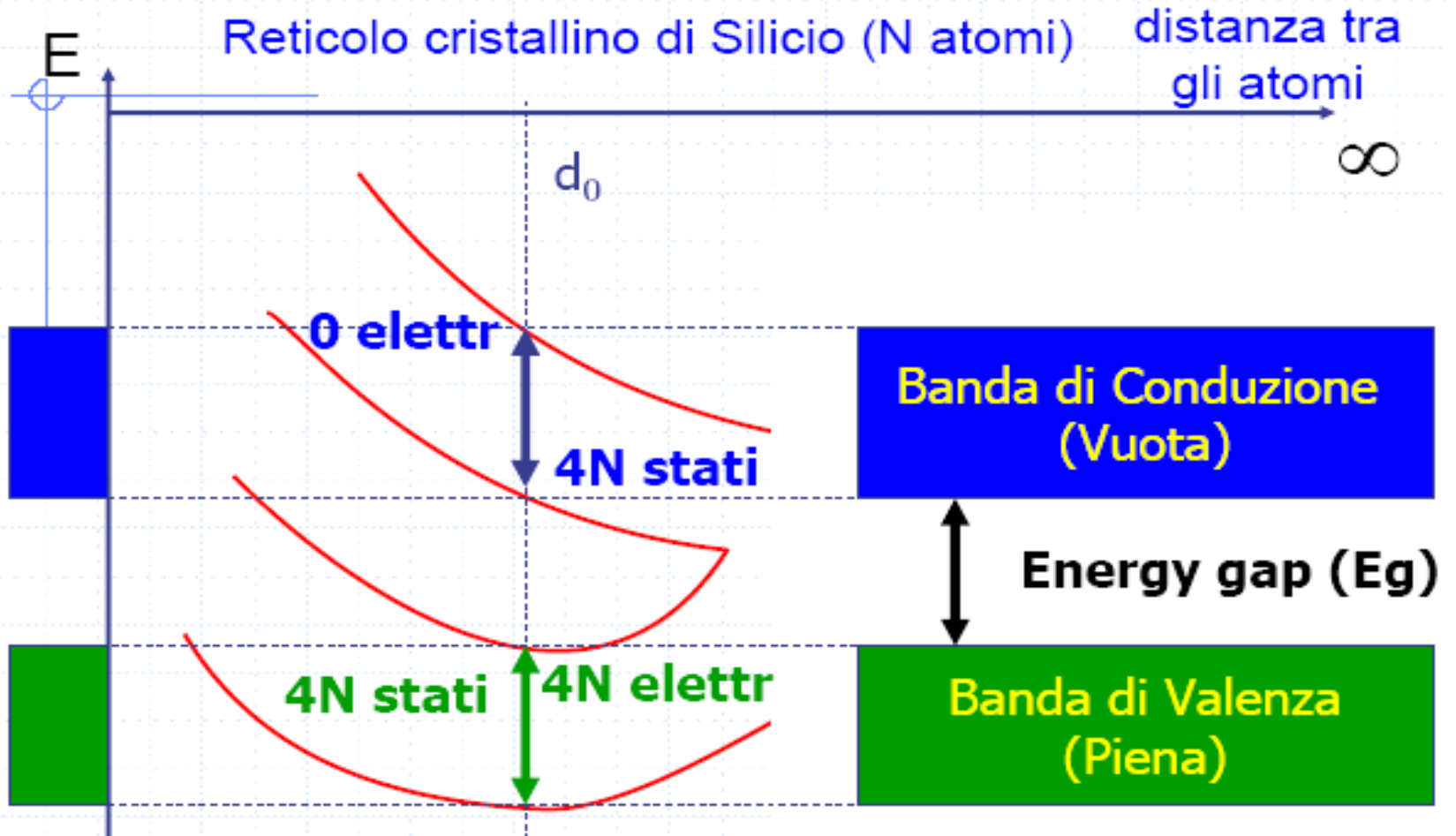
Orbite elettroniche nel caso del Si



Formazione delle Bande nel Silicio (1)



Formazione delle Bande nel Silicio (2)



Rappresentazione schematica delle bande

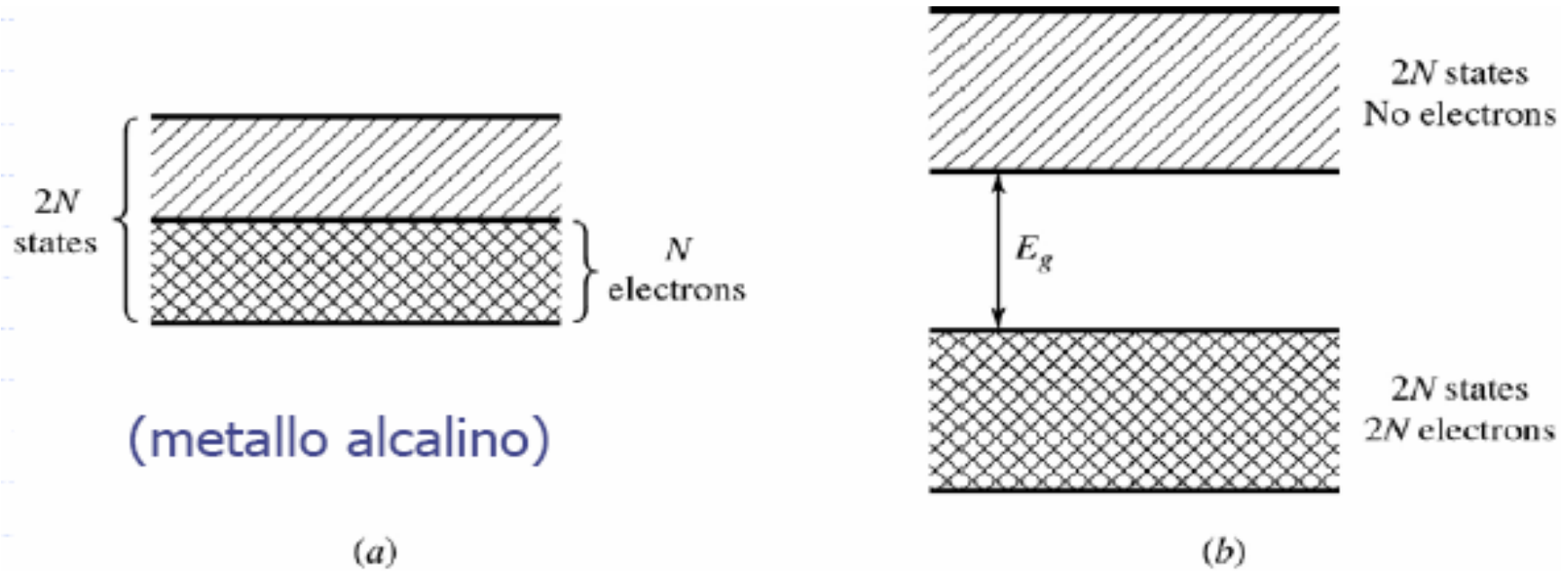
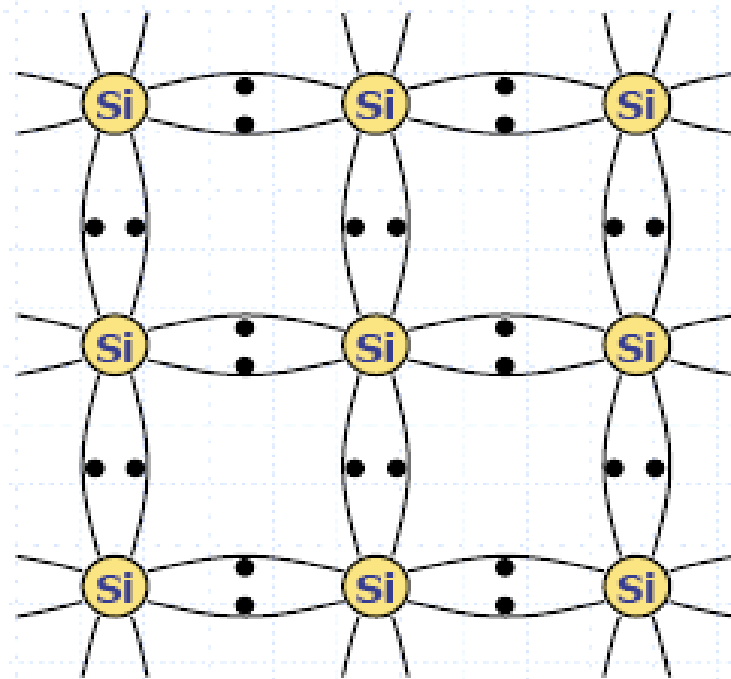


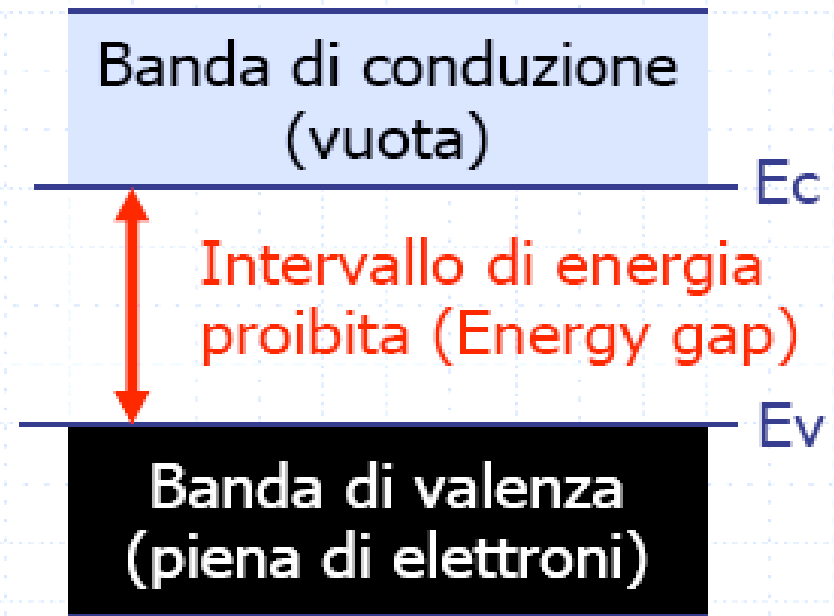
Diagramma a Bande di Energia : (a) N elettroni riempiono metà dei $2N$ stati permessi, come può avvenire in un metallo.

(b) Una energy gap E_g separa una banda completamente vuota da una banda di $2N$ stati completamente riempita da $2N$ elettroni, è rappresentativa di un isolante.

Modello a bande del Silicio intrinseco

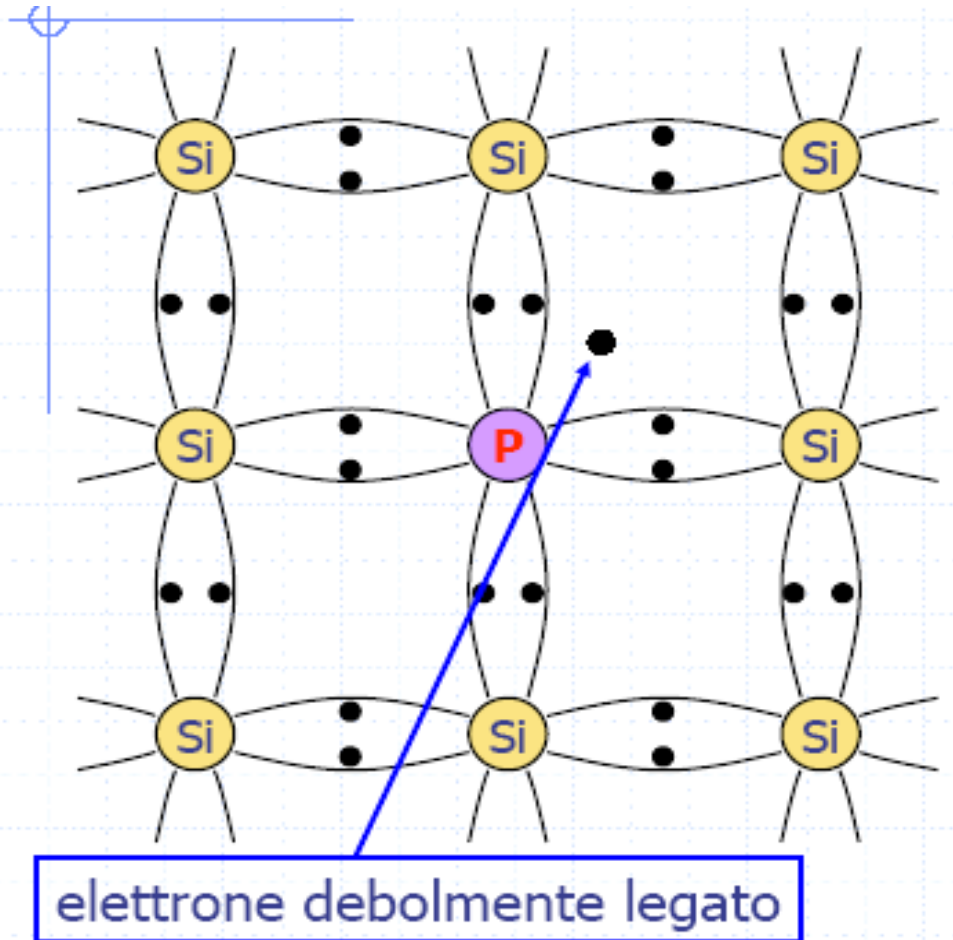


Modello a bande di energia



In queste condizioni, applicando una piccola differenza di potenziale, non ci sarà movimento di elettroni in quanto questi sono saldamente vincolati agli atomi!

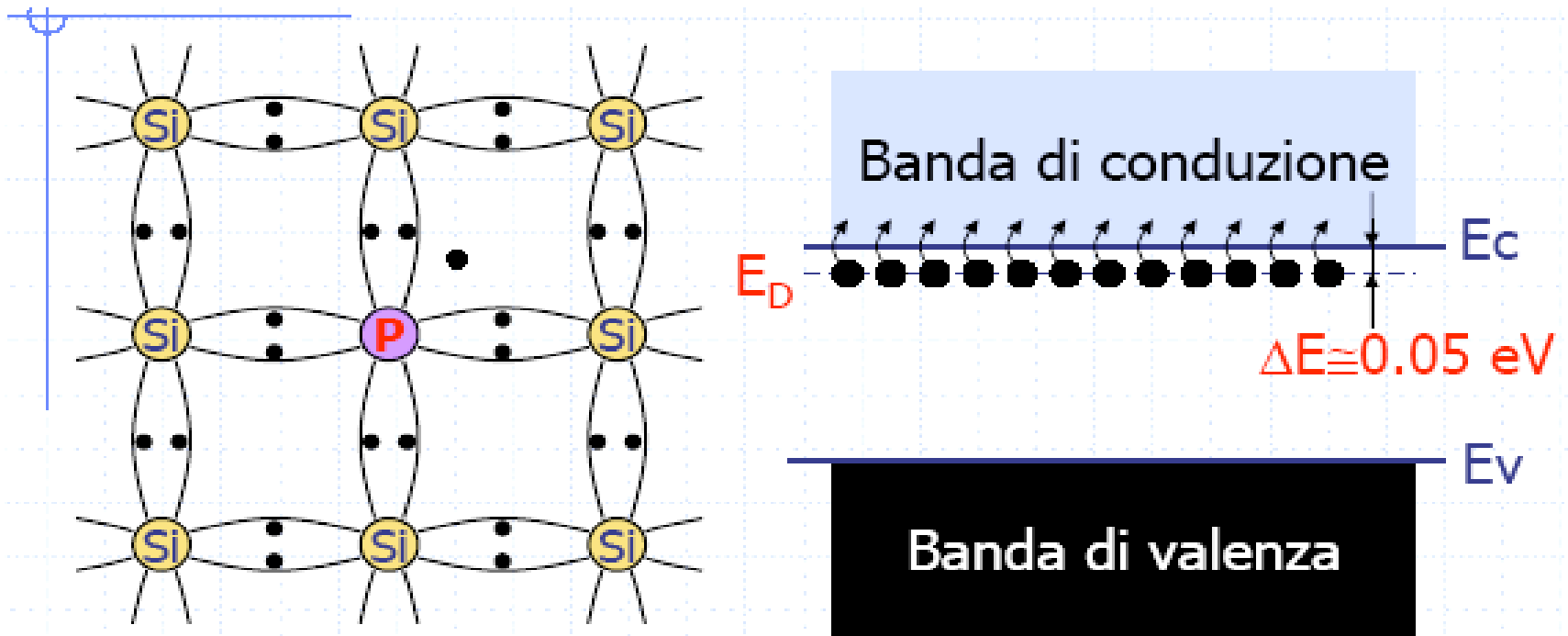
Silicio drogato n



L'aggiunta di impurezze pentavalenti (P, Sb, As) **introduce elettroni liberi** che non partecipano ai legami covalenti, e aumentano la conduttività del semiconduttore. C'è un eccesso di elettroni, ma non di lacune.

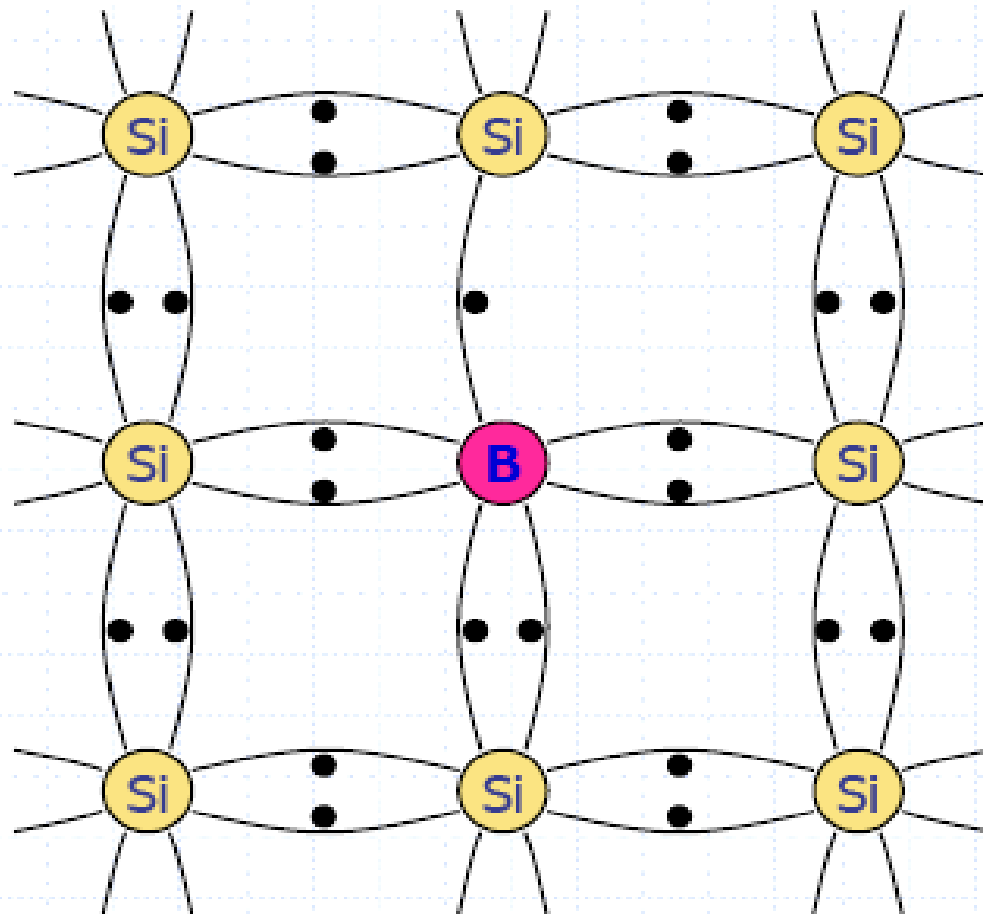
Gli atomi del V gruppo sono detti: “**donatori**”

Livelli energetici del Si-n



A $T=300 \text{ K}$ tutti i donatori sono ionizzati. Se introduco $N_D \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ (con $N_D \gg n_i$) donatori allora $n \cong N_D$

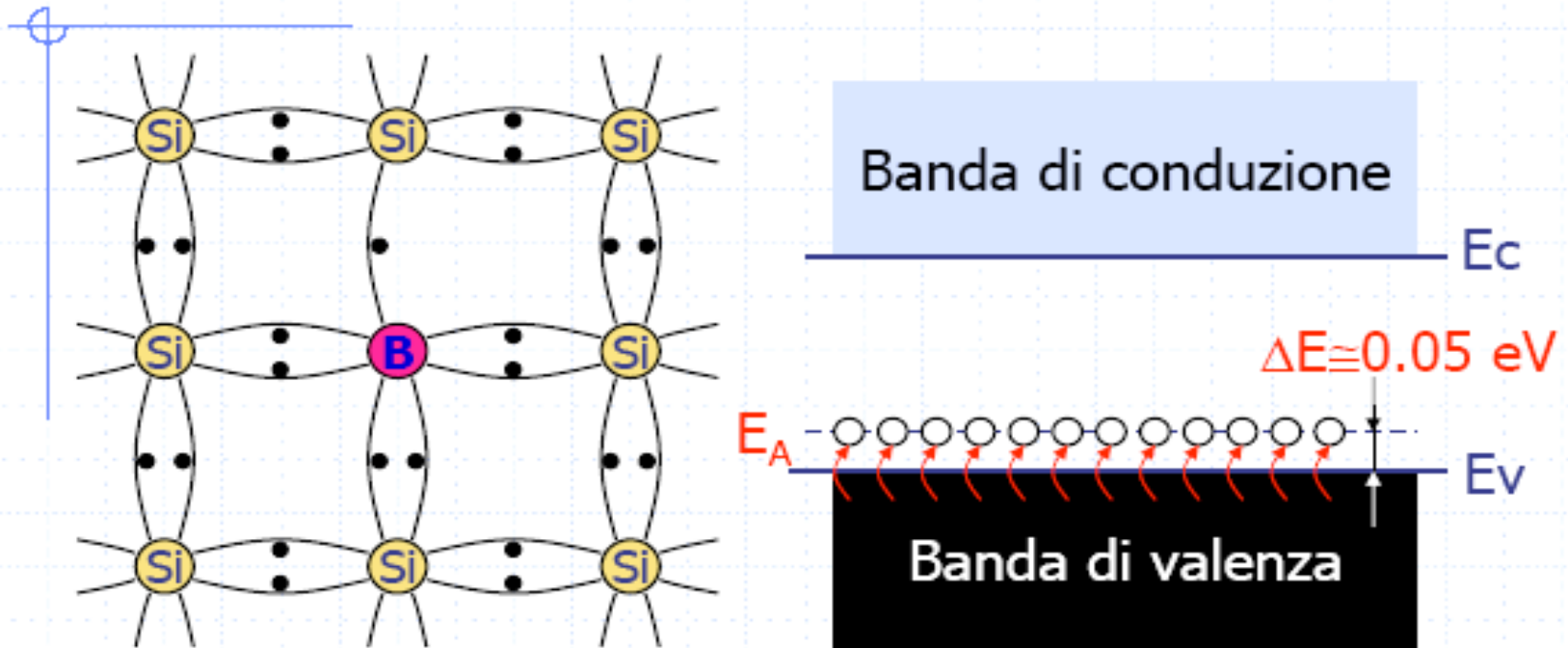
Silicio drogato p



L'aggiunta di impurezze trivalenti (B, Al, Ga) **crea una assenza di elettroni di valenza (formazione di lacune)**. Anche questo drogaggio aumenta la conduttività del Si.

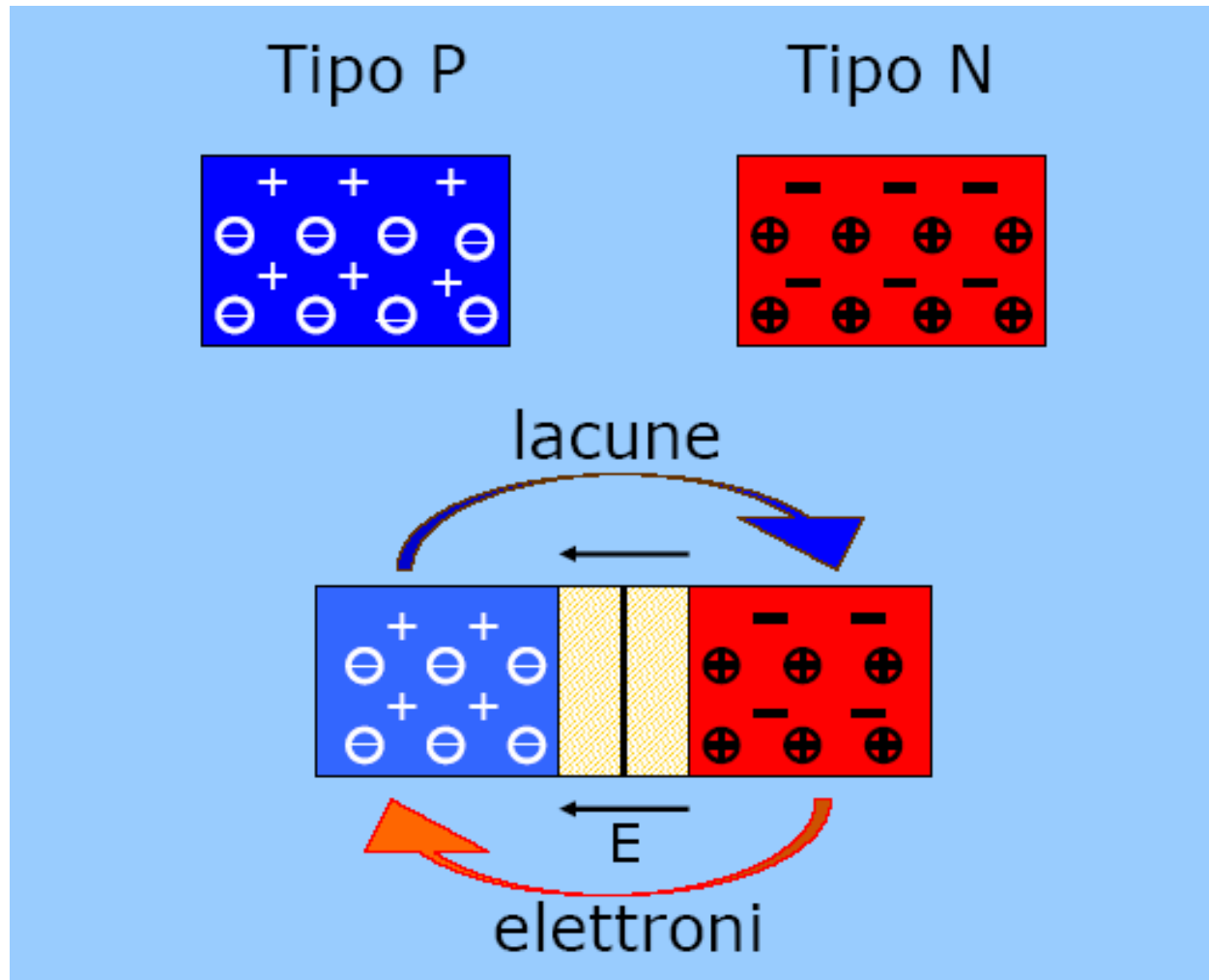
Gli atomi del **III** gruppo vengono detti: **“accettori”**

Livelli energetici del Si-p



A $T=300 \text{ K}$ tutti gli accettori sono ionizzati. Se introduco $N_A \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ (con $N_A \gg n_i$) donatori allora $p \cong N_A$

Modello della giunzione p-n



La giunzione p-n

- Per realizzare l'effetto rettificatore è però necessario creare un campo elettrico interno al dispositivo
- Si deve realizzare un eccesso di **anioni** (atomi caricati negativamente) in una parte del semiconduttore ed un eccesso di **cationi** (atomi caricati positivamente).
- Questa situazione si ottiene mediante drogaggio del semiconduttore e viene realizzato inserendo atomi del terzo gruppo come ad esempio il **boro** e atomi del quinto gruppo, **fosforo**.
- In questo modo si realizza una interfaccia fra due strutture; una di tipo p (con un eccesso di lacune) ed una di tipo n (con un eccesso di elettroni): la “**giunzione p-n**”

Valori elettronici della giunzione p-n

Giunzione tipo p - tipo n

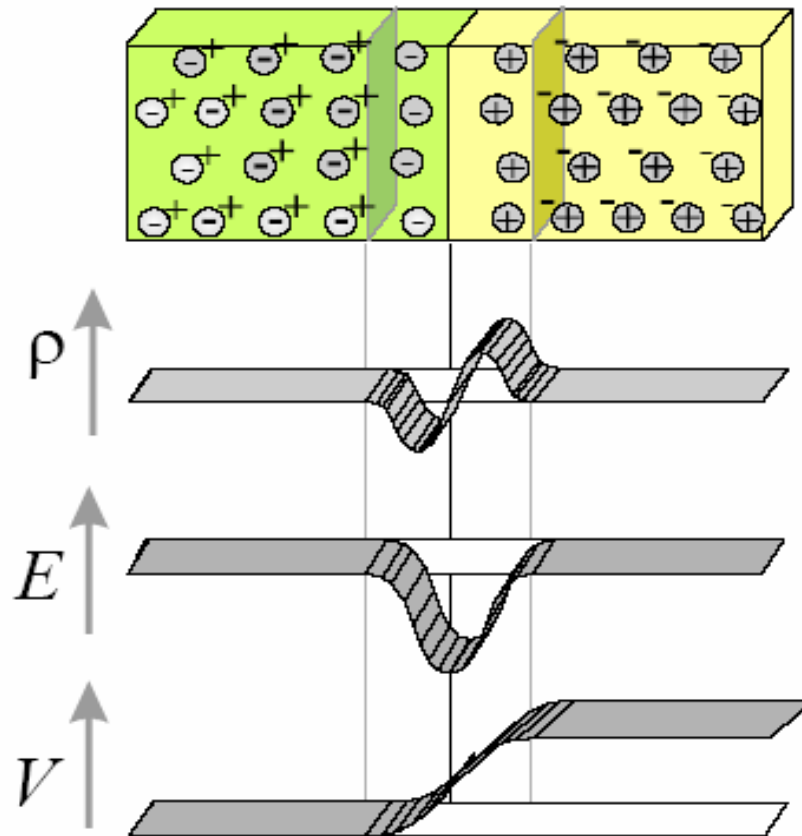


Diagramma schematico di una giunzione p-n, comprendente la densità di carica, l'intensità del campo elettrico e l'andamento della differenza di potenziale

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

Equazione di Poisson

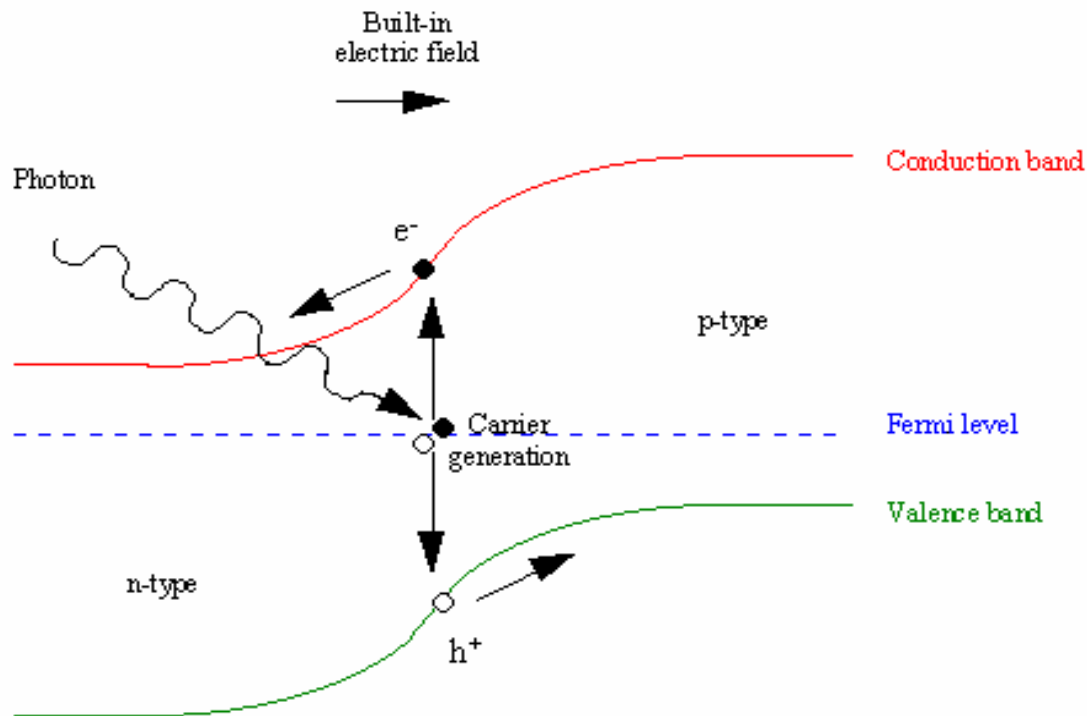
$$E = -\frac{dV}{dx} = \int \frac{\rho}{\epsilon} dx$$

Campo Elettrico

$$V = -\int E dx$$

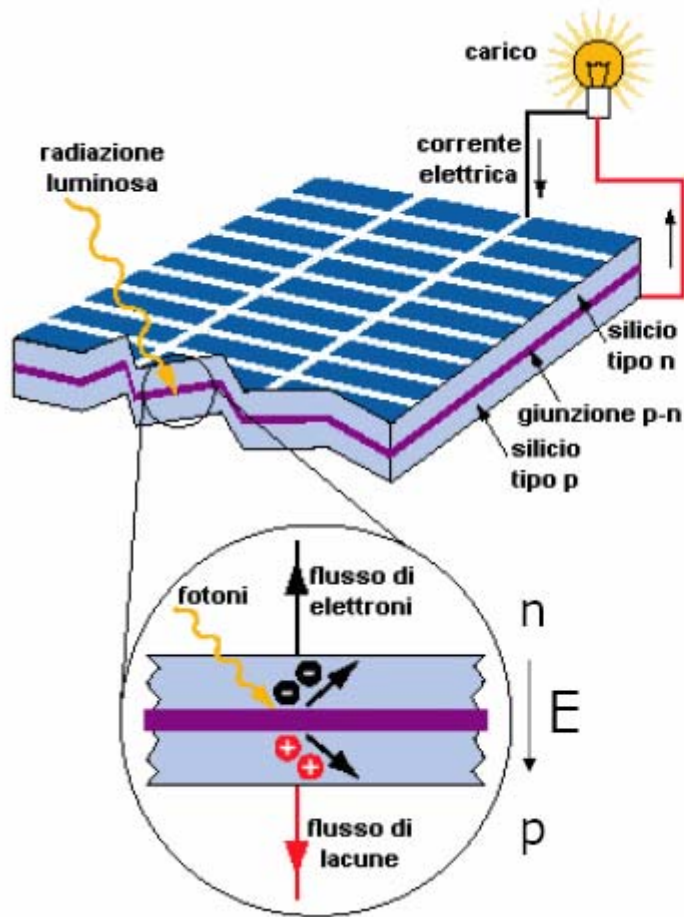
Potenziale

Illuminando una giunzione p-n



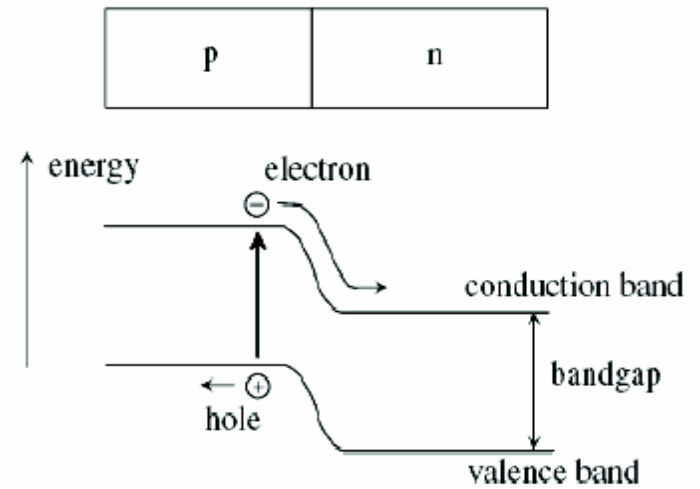
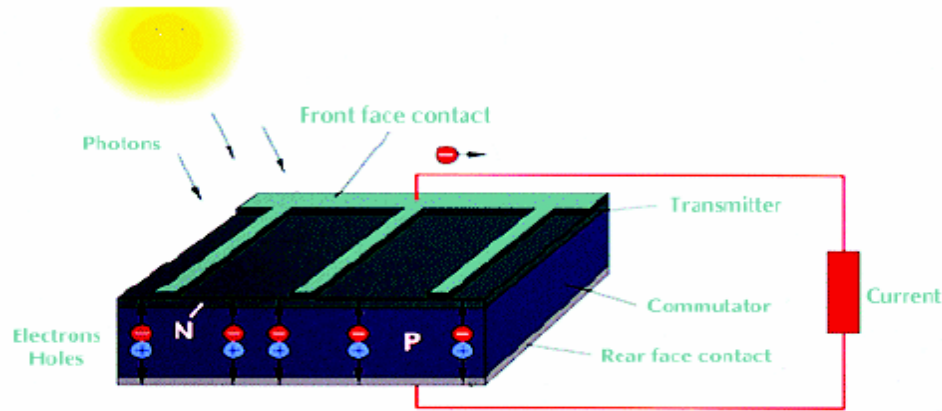
Quando un fotone viene assorbito, si crea una coppia elettrone - lacuna che il campo elettrico proprio provvede a separare, in seguito i portatori sono raccolti ai due elettrodi.

Conversione fotovoltaica



- Illuminando la giunzione P-N si generano *coppie e-h* nelle zone N e P
 - E separa e da h in eccesso spingendoli in direzioni opposte
- alterazione equilibrio**
- Mediante un collegamento esterno si genera un *flusso ordinato di cariche* che ristabilisce l'equilibrio
- corrente elettrica**

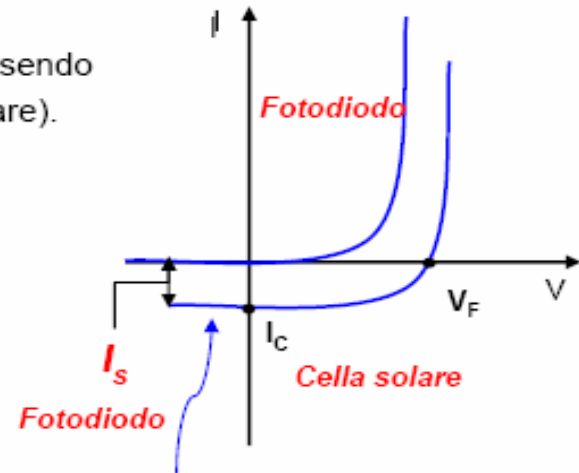
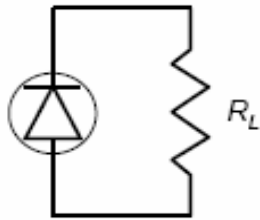
Modello a bande per la giunzione p-n



Diodo sotto radiazione solare

Fotodiodo /Cella solare

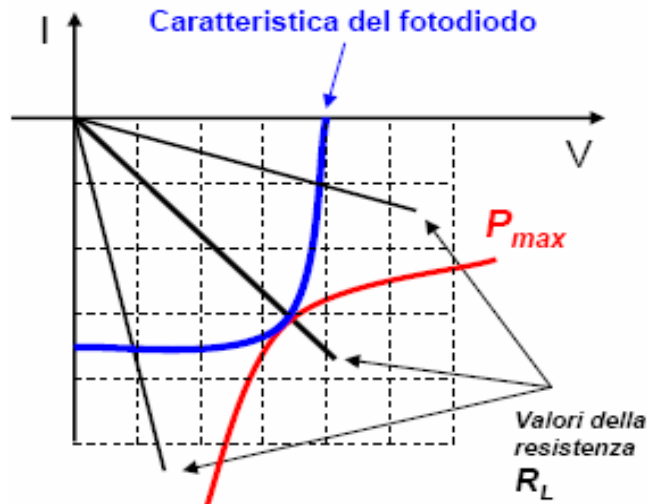
Se la giunzione illuminata la si utilizza nel quarto quadrante, essendo negativo il prodotto $I V$, si produce energia elettrica (cella solare).



$$I = I_s + I_o (1 - \exp(V / \eta V_T))$$

$I_C \Rightarrow$ corrente di cortocircuito. E' proporzionale all'intensità dell'illuminazione

$V_F \Rightarrow$ potenziale fotovoltaico. Corrisponde all'abbassamento del potenziale di contatto dovuto alla creazione delle coppie elettrone-lacuna generate dalla radiazione incidente.



$$V_{max} = \eta V_T \ln \left(1 + \frac{I_s}{I_o} \right)$$

nel silicio
 $V_F \cong 0.5 \div 0.6$

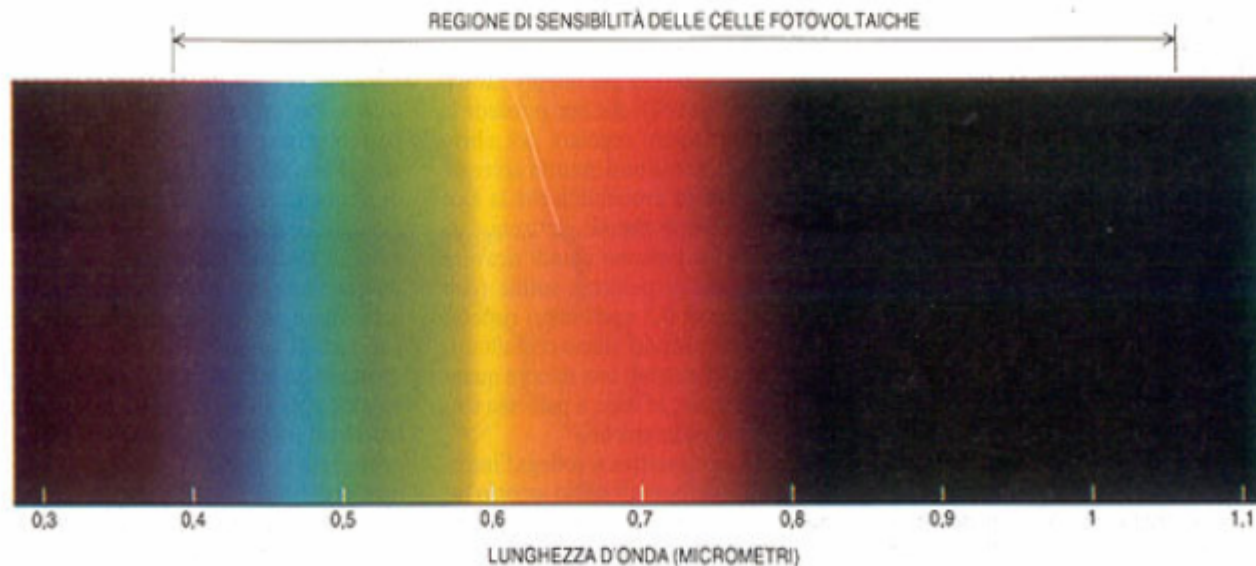
Energia di attivazione FV

- Non tutta la radiazione luminosa che colpisce la cella fotovoltaica è in grado di generare una coppia $e^- - h^+$
- I fotoni incidenti devono avere una certa energia, maggiore dell' **energia di banda**
- Essa dipende dai vari materiali
(per il Silicio $E = 1.1 \text{ eV}$)

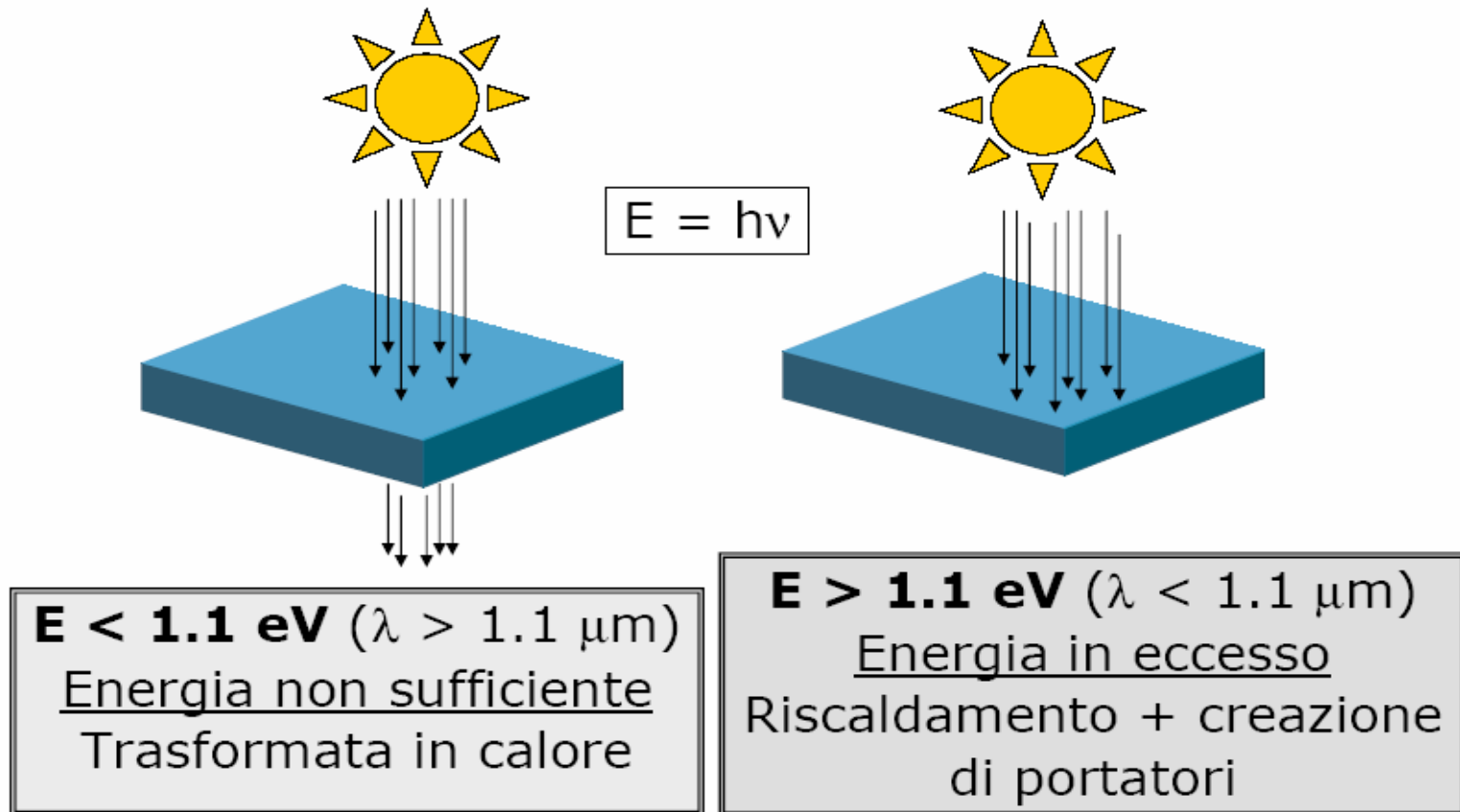
1 eV è l'energia acquistata da un elettrone quando passa attraverso una d.d.p. di 1 Volt

Sensibilità delle celle fotovoltaiche

- Di tutti i fotoni provenienti dal sole vengono sfruttati quelli con $E > 1.1 \text{ eV}$, ovvero con $\lambda < 1.1 \mu\text{m}$



Gli infrarossi

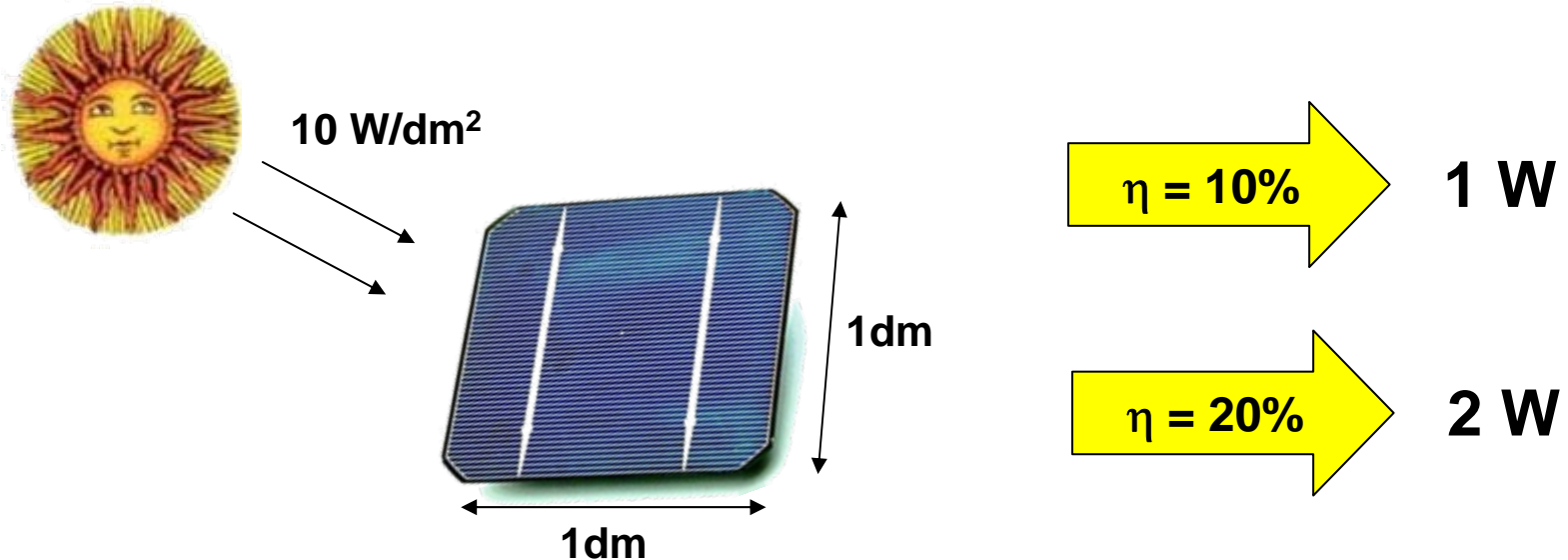


Efficienza

Il parametro più importanti di una cella fotovoltaica è l'efficienza definita come

$$\text{EFFICIENZA} = \eta = \frac{\text{Potenza elettrica ottenuta dalla cella}}{\text{Potenza della radiazione solare incidente}}$$

Esempio:

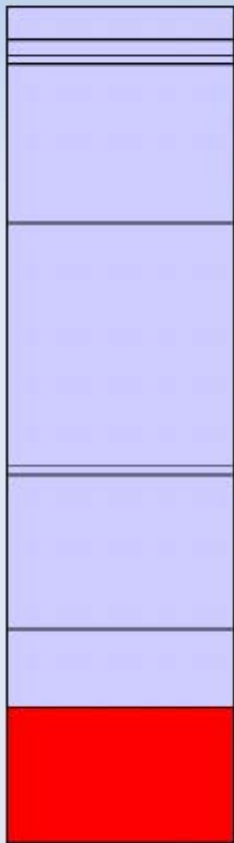


E' dunque importante massimizzare l'efficienza

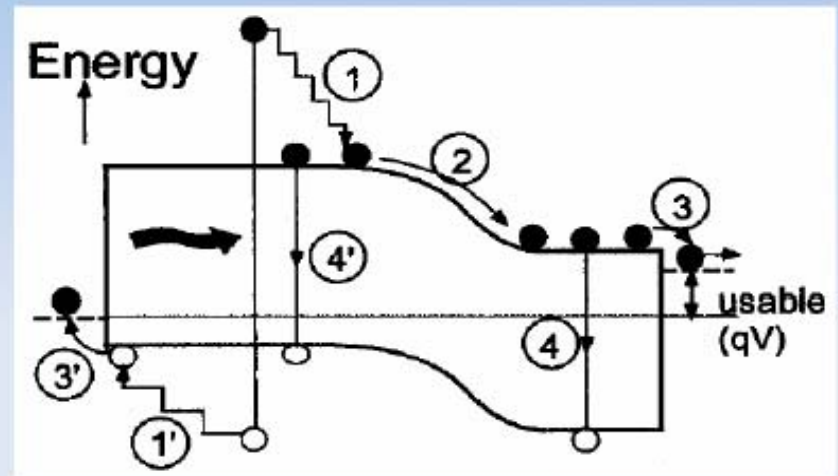
Efficienza delle celle fotovoltaiche

Il limite termodinamico dell'efficienza è molto alto $\eta_{th} = 93\%$

η/η_{th} in a realistic single junction cell

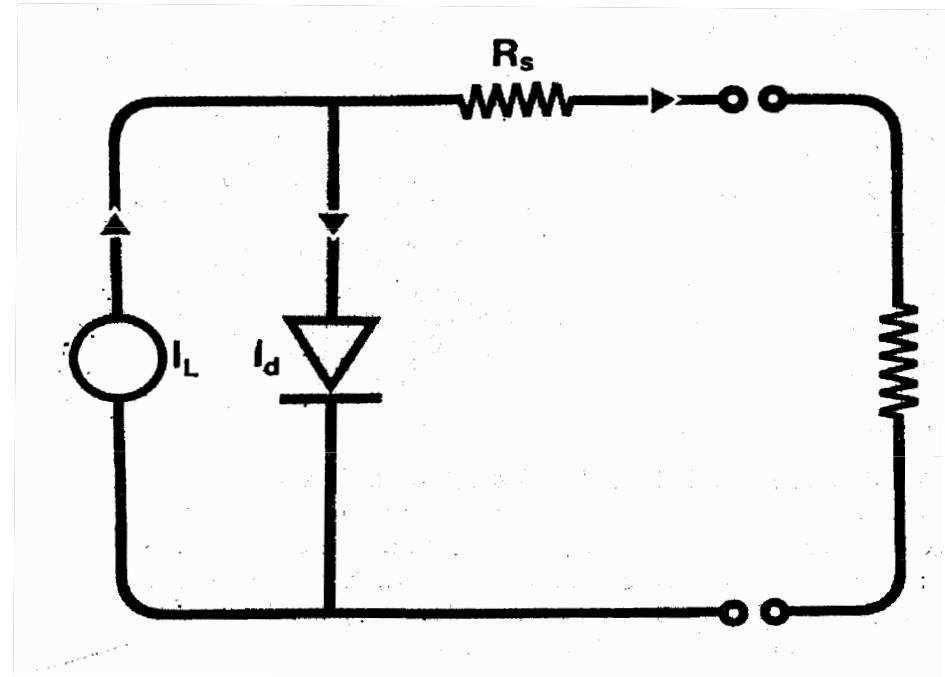
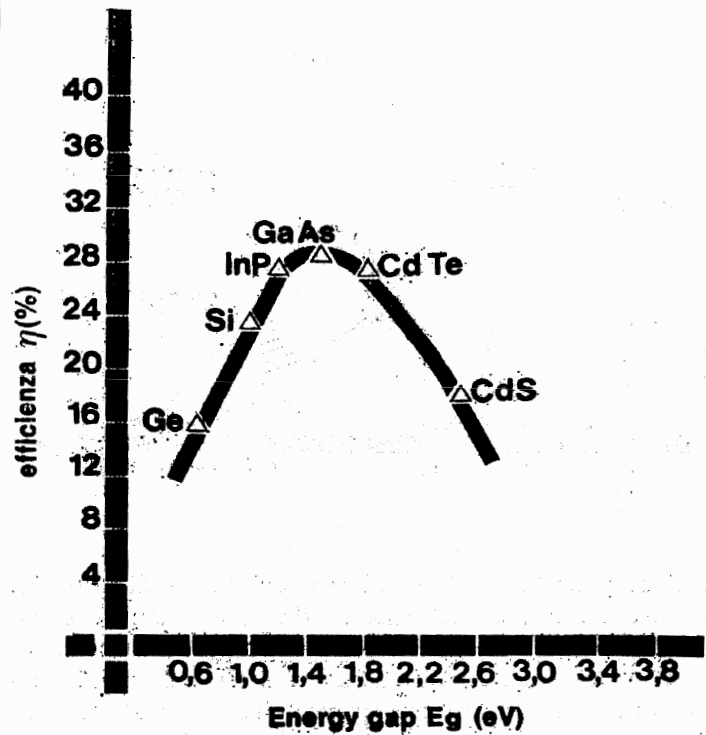


- -4% surface covered
- -2% surface reflect.
- -1% surface absorpt.
- -18.8% $h\nu < E_g$
- -29.2% $h\nu > E_g$
- -4.5% $\eta_Q = 0.9$
- -19.2% $E_g > qV_{oc}$
- -4.7% $ff = 0.78$
- 16.6% residual η/η_{th}



- (1) Thermalization for couples with $h\nu > E_g$
- (2) Diffusion
- (3) Contact losses
- (4) Recombination

PARAMETRI DELLE CELLE SOLARI



$$I = I_0 \left(e^{\frac{qv}{KT}} - 1 \right)$$

PARAMETRI DELLE CELLE SOLARI

Equazione delle celle solari:

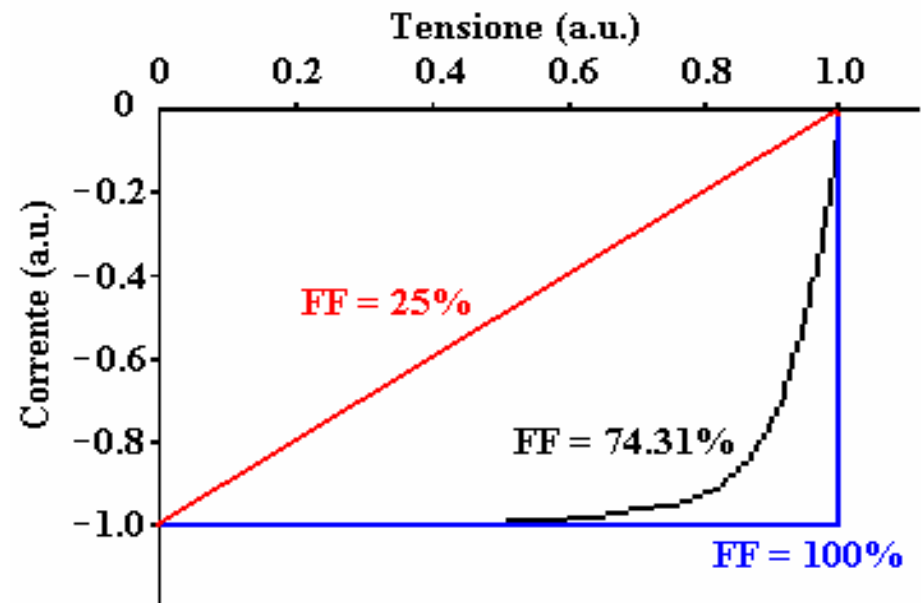
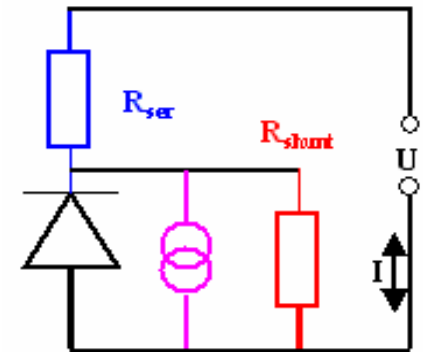
$$I(V) = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV - R_s I}{\gamma k T}\right) - 1 \right] - \frac{V - R_s I}{R_{sh}}$$

Fill Factor:

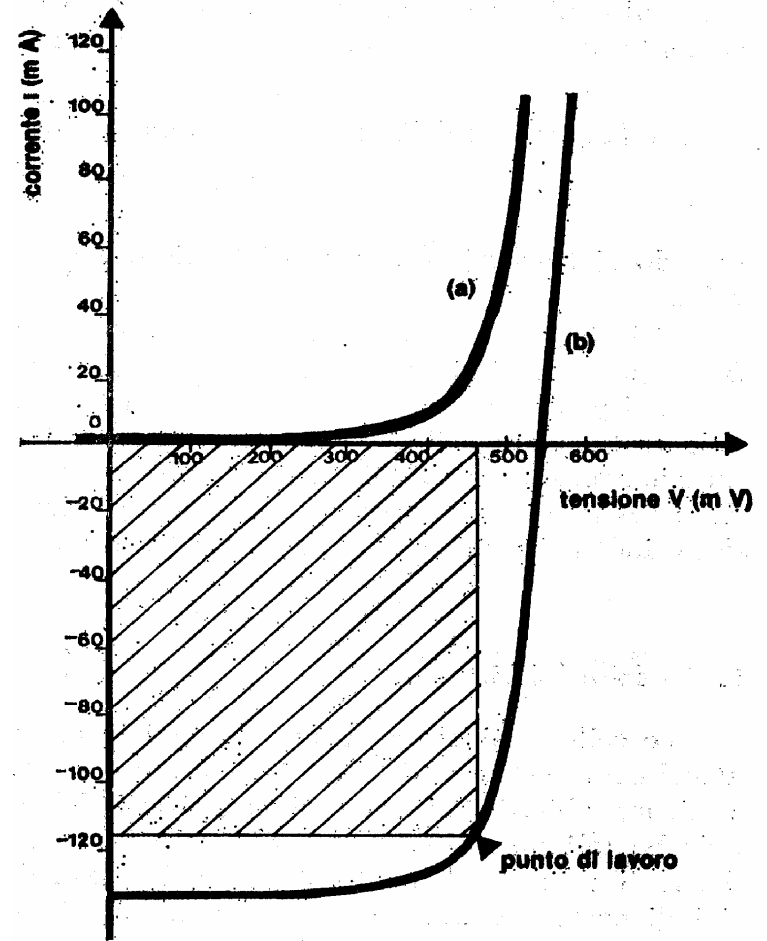
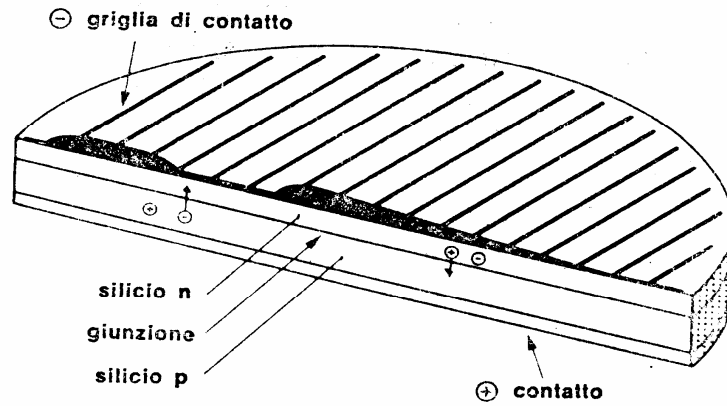
$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}}$$

Efficienza:

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_s}$$



Caratteristica I-V

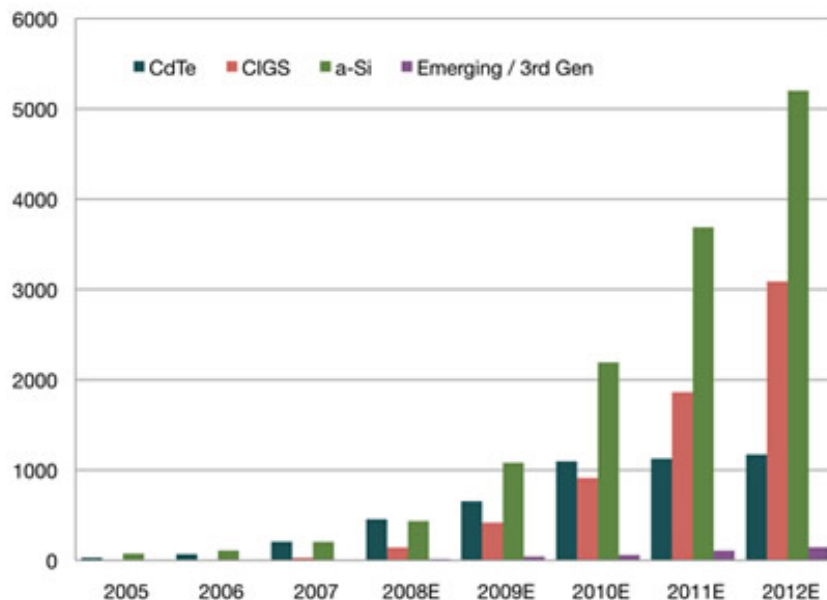


Mercato Mondiale Fotovoltaico

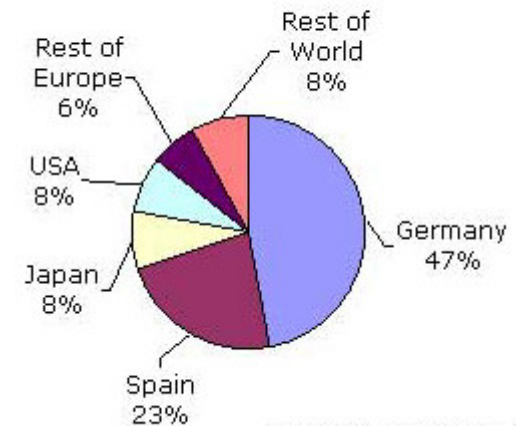
Prima generazione: Celle solari di silicio cristallino
Efficienza: 15%

α -Si 6.4%
CdTe 8-9%
CIGS 10%
Thin Film Si 12.2%

Historical and Projected Thin-Film Production (MW)

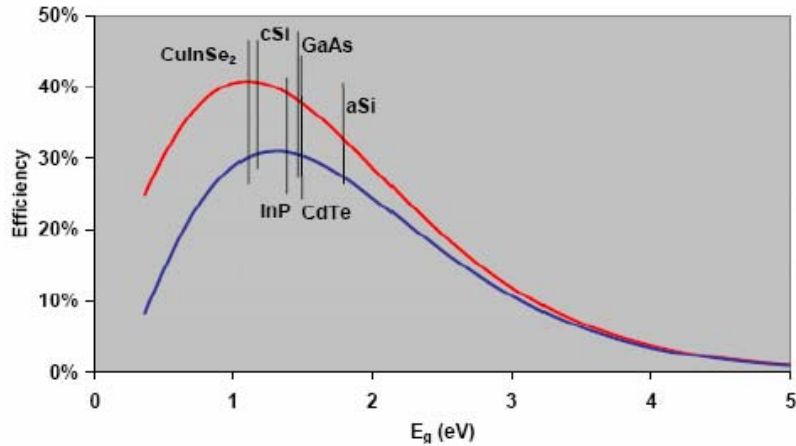


World Photovoltaic Market in 2007
2826 Megawatts



Copyright: Solarbuzz LLC

Shockley-Queisser ideal efficiency limits



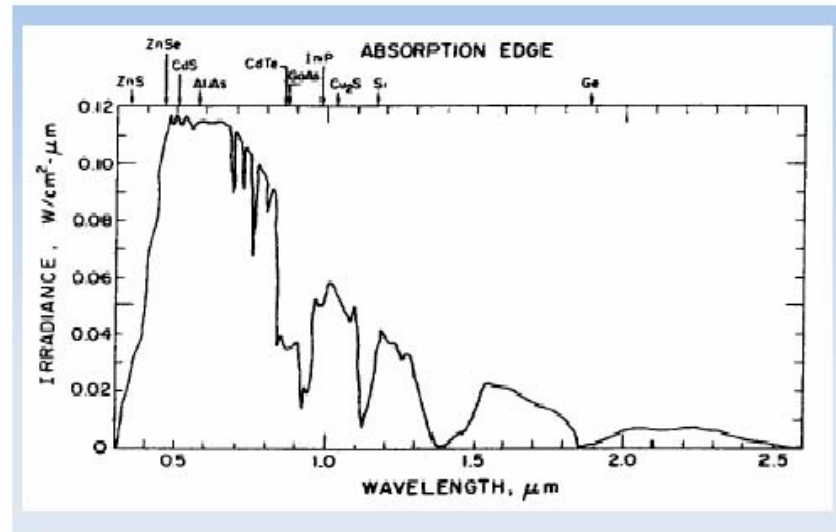
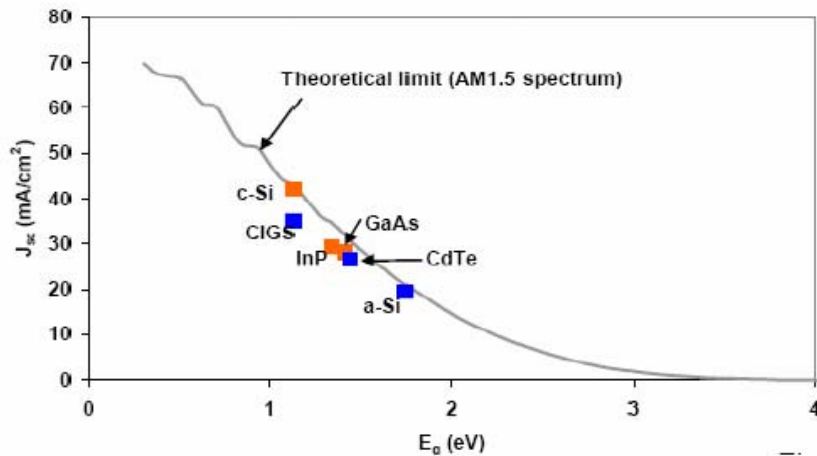
Limite Shockley-Quasser
(limite singolo materiale)

Efficiency: **30%**

Record Efficienza 24.7%

Green Group

The photogenerated current



First Generation: *Cristallo Singolo, Giunzione p-n a singolo strato*

Second Generation: *Celle solari a eterogiunzione*

Celle solari a giunzione multipla

Third generation: *Celle solari a polimeri*

Celle solari basate su nanoparticelle:

Celle solari a conversione up-down

Celle solari a bande diverse

Celle solari tandem

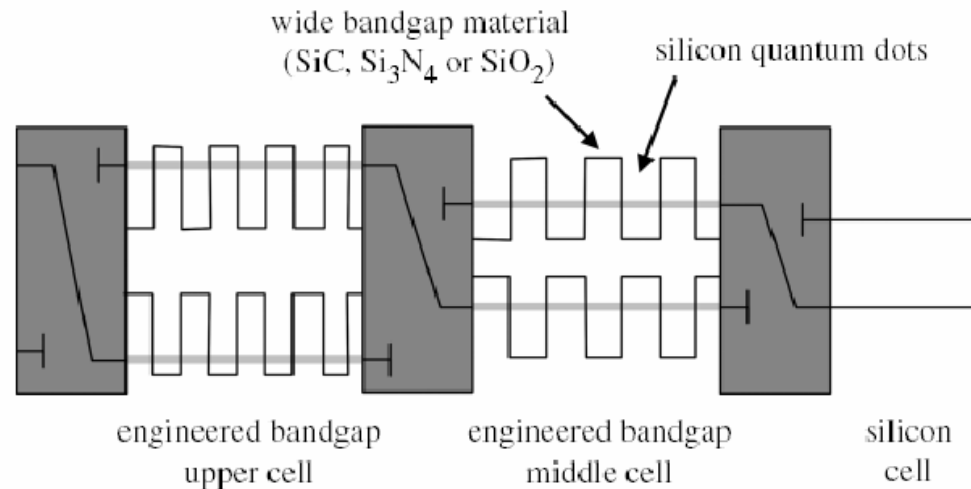
Celle solari a effetto plasmonico

Celle solari sensitizzate con dye:

Celle solari di Grätzel

Celle solari di McFarland-Tang

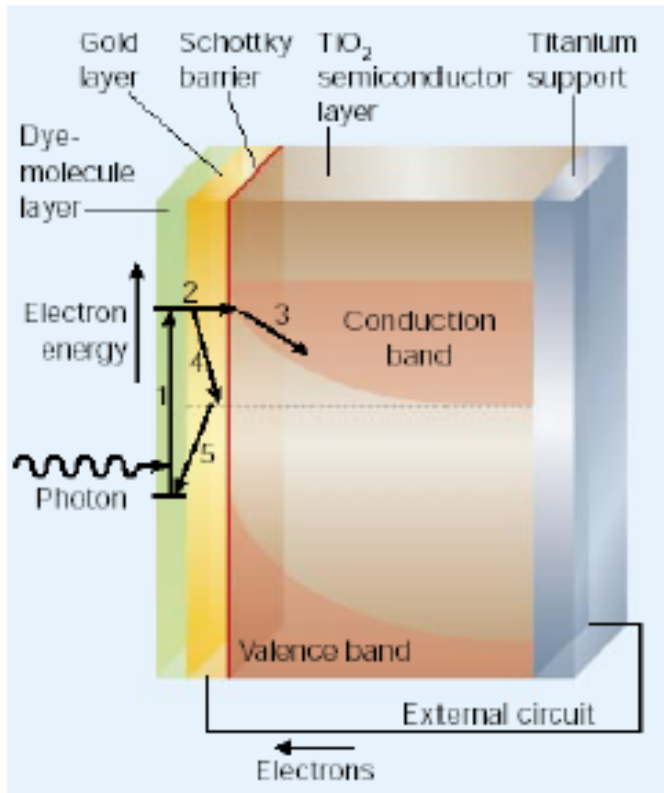
Celle solari tandem alle nanoparticelle



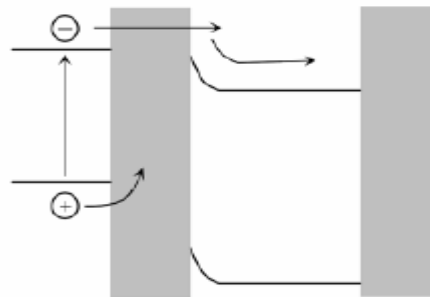
A schematic diagram of the bandgaps of a silicon quantum dot tandem solar cell. The upper cell is formed from a 'superlattice' of small quantum dots with a large effective bandgap. The middle cell is formed from larger quantum dots with a smaller effective bandgap, and the lower cell is ordinary bulk silicon.

Uso completo dello spettro solare: semiconduttori di diversa larghezza di banda. La luce blu può essere assorbita dai dot più piccoli e produrre una larga d.d.p, mentre la luce infrarossa passa attraverso la prima cella e è assorbita dai dot più grandi e produce una d.d.p minore. Efficienza massima: 70%

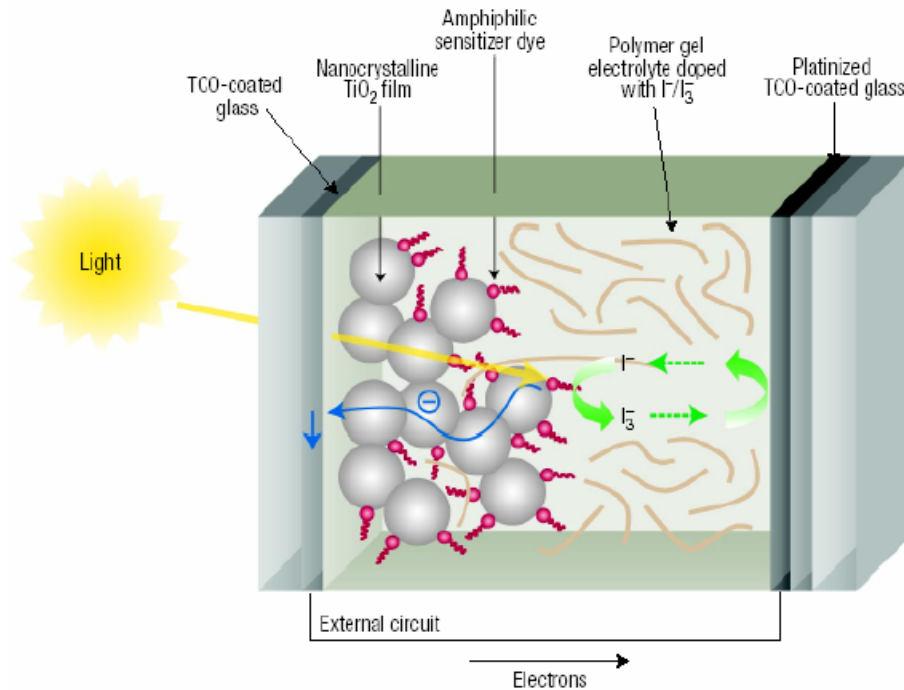
Celle solari a stato solido con dye



I fotoni che colpiscono lo strato di molecole dye sono eccitati (1) e si iniettano nello strato di oro (2). Dopo aver attraversato lo strato di oro superando la barriera di Schottky vengono a trovarsi nella banda di conduzione del TiO₂ (3). Quegli elettroni che non riescono ad attraversare la barriera di Schottky termalizzano (4). Un vantaggio di questo dispositivo è che gli elettroni del dye fotoeccitati sono costantemente riforniti dallo strato di oro (5)



Celle solari di Grätzel con dye



Le due funzioni di assorbimento della luce e del trasporto delle cariche sono separate. La luce è assorbita da un sensizzatore (dye) ancorato alla superficie di un semiconduttore a larga banda (nanoparticelle di TiO_2). La separazione delle cariche avviene all'interfaccia attraverso l'iniezione dell'elettrone fotoindotto dal dye nella banda di conduzione del semiconduttore. Le cariche poi sono trasportate al collettore.