

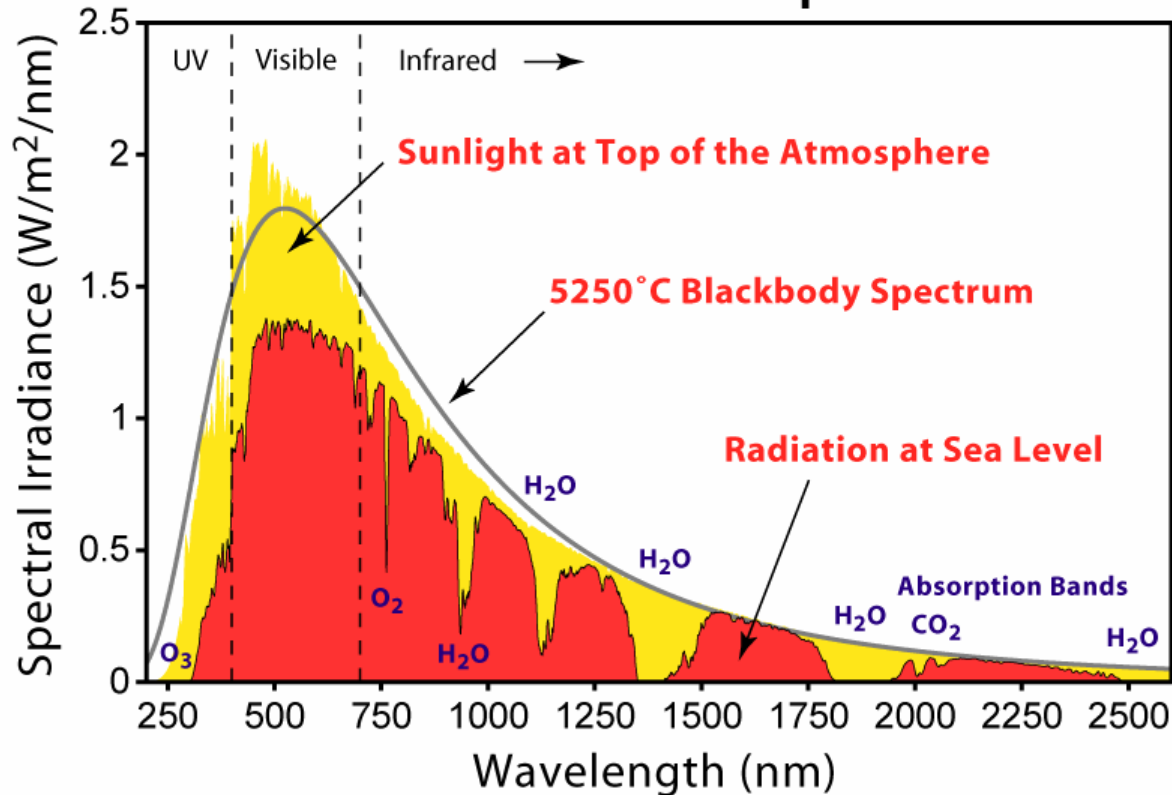
Fotovoltaico (photovoltaic PV)



Impianto SERPA SOLAR da 11 MW, Alentejo, Portogallo

Energia Solare

Solar Radiation Spectrum



$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$E = h\nu$$

Il sole fornisce alla terra luce solare che oltre l'atmosfera (sunlight at top of the atmosphere) ha una densità di potenza di 1366 W/m²; comunque a causa di alcuni effetti geometrici e di riflessione della superficie terrestre la luce effettivamente disponibile è di circa 1000 W/m²

L' energia solare è rinnovabile, pulita, presente in grande quantità.

La tecnologia che sfrutta questa energia è chiamata **fotovoltaica**:

da **foton** = luce e **voltaico** che riguarda l'elettricità.

Si definisce:

“**Irraggiamento**” la potenza istantanea che colpisce una superficie, espressa in KW/m²; è spesso chiamata anche semplicemente radiazione.

“**Insolazione**” l'energia, cioè l'integrale dell'irraggiamento in un certo tempo e riferito ad una certa superficie. Si utilizza spesso il suo valore medio giornaliero e si misura in KWh/m² giorno. Per i dati di progettazione si riporta spesso il valore di insolazione anche in KWh/m² anno.

ENERGIA SOLARE

L'irraggiamento solare al suolo, radiazione globale (G), è la somma di tre componenti, diretta, diffusa e di albedo.

La radiazione diretta (I) è data dalla radiazione ai confini dell'atmosfera detratto la quota assorbita e diffusa dall'atmosfera durante l'attraversamento dei raggi solari.

La radiazione diffusa (D), considerata in prima approssimazione isotropa, è dovuta alla diffusione della radiazione solare da parte delle particelle gassose o solide presenti nell'atmosfera [dal 15 – 25% del totale in una giornata serena al 100% in caso di cielo totalmente coperto].

La componente di albedo (R) è infine dovuta alla radiazione riflessa sulla superficie interessata da parte di altre superfici, del suolo o di altri corpi direttamente visibili (edifici, montagne, etc..). Essa è spesso determinata sperimentalmente.

La radiazione globale (G) è definita da: $G = I + D + R$

Il fotovoltaico si basa principalmente sulla scienza e sulla tecnologia dei semiconduttori.

Esiste comunque una categoria molto promettente di PV che si fonda sul principio della fotosintesi.

Il silicio e i semiconduttori IV

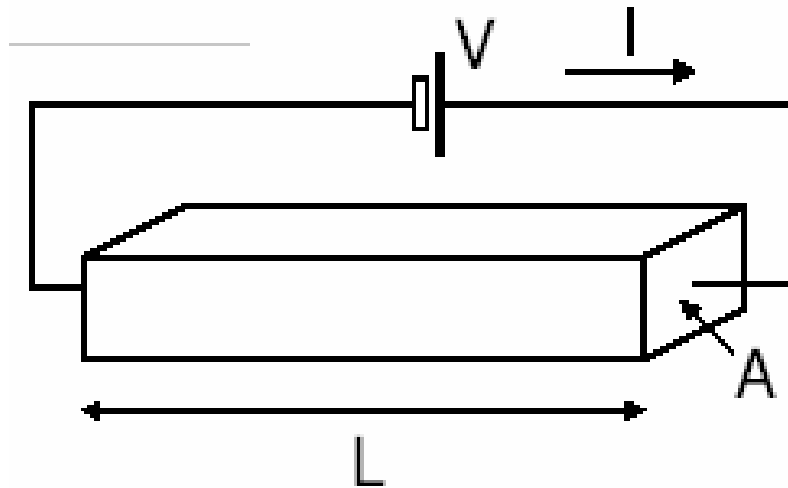
I semiconduttori III-V e II-VI

Semiconduttori ossidi

Semiconduttori nanometrici

Semiconduttori polimerici

Conduttori, isolanti e semiconduttori



Resistenza

$$R = \frac{V}{I} [\Omega]$$

Resistività

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} [\Omega \cdot \text{cm}]$$

Classificazione:

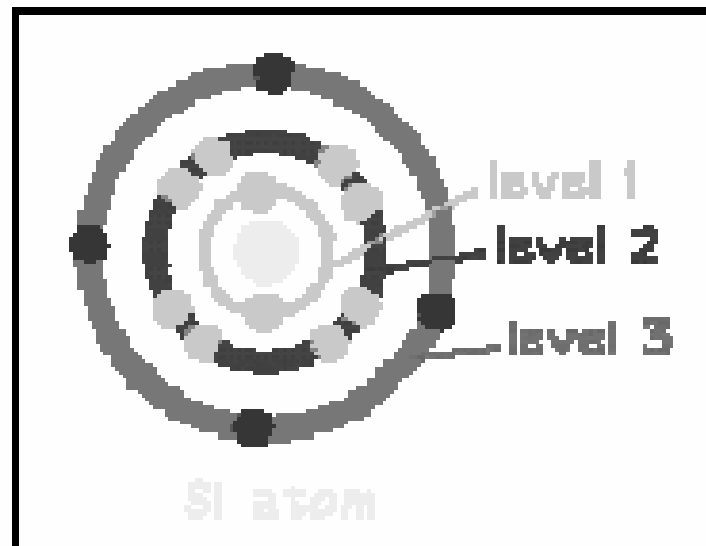
ISOLANTI $\rho > 10^5 [\Omega \text{cm}]$

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

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

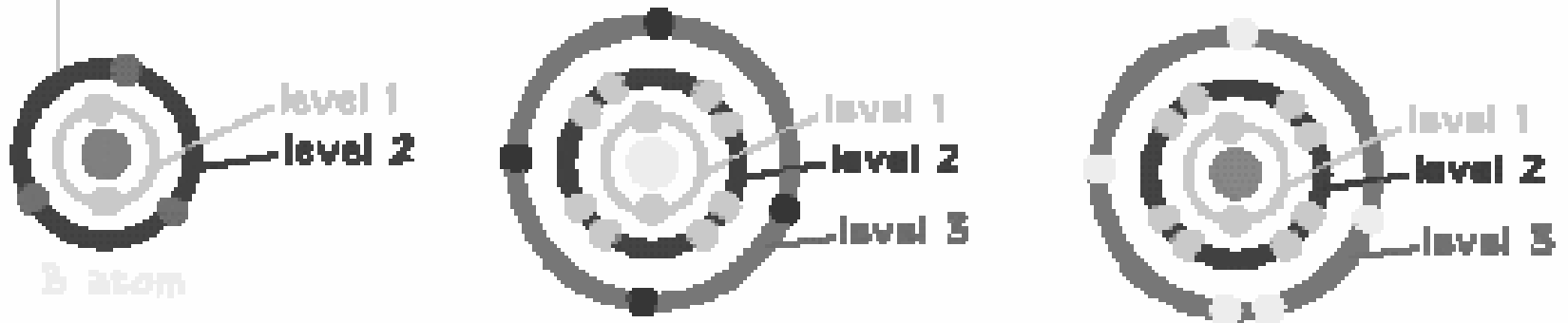
Proprietà del silicio

Il Silicio (come pure il Germanio) forma reticoli cristallini le cui proprietà elettriche possono essere modificate sostanzialmente con una limitata sostituzione di atomi (drogaggio)



Elettroni di valenza

Gli elettroni nello strato esterno di un atomo sono detti elettroni di valenza. Tali elettroni hanno effetto sulle reazioni chimiche dell'atomo e determinano le proprietà elettriche dell'elemento.



**Atomo di
Boro
3e valenza**

**Atomo di
Silicio
4e valenza**

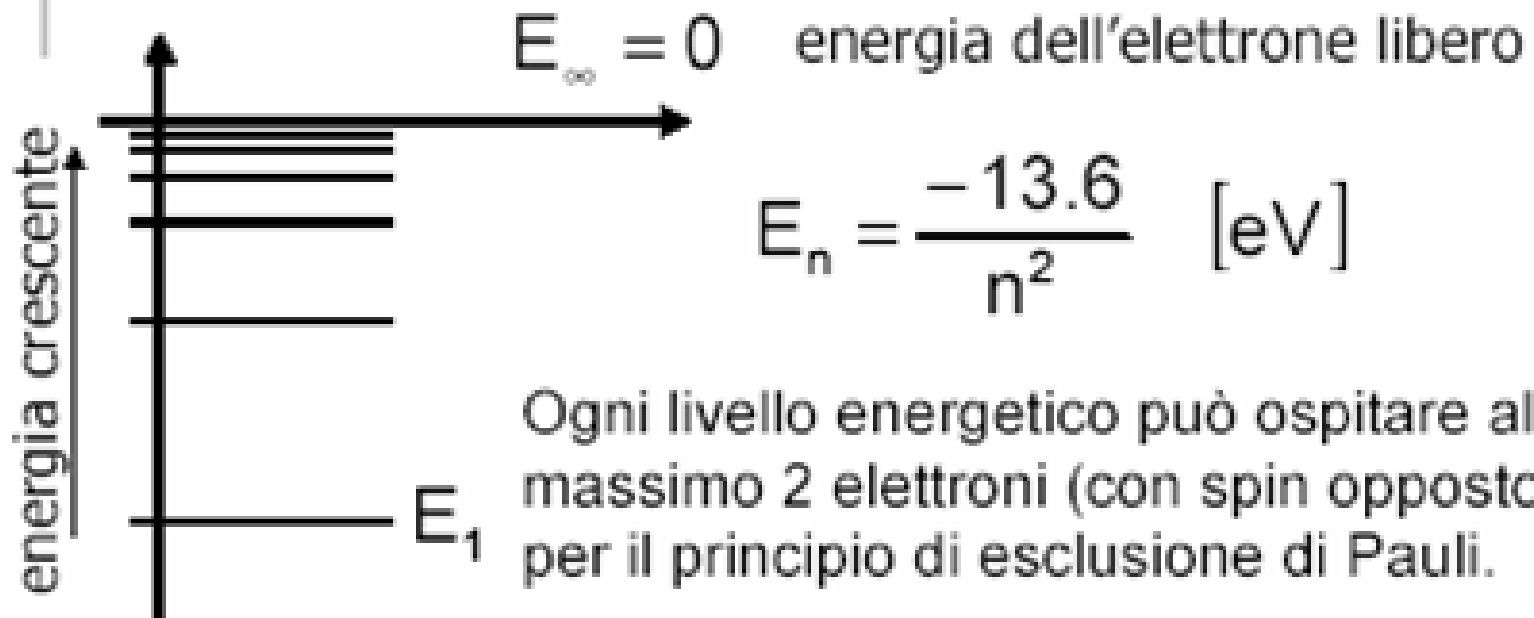
**Atomo di
Fosforo
5e valenza**

Modello a bande

Atomo Idrogenoide

L'Atomo idrogenoide e' un atomo a cui sono stati tolti tutti gli elettroni tranne uno.

Secondo la meccanica quantistica, i livelli energetici permessi agli elettroni sono:

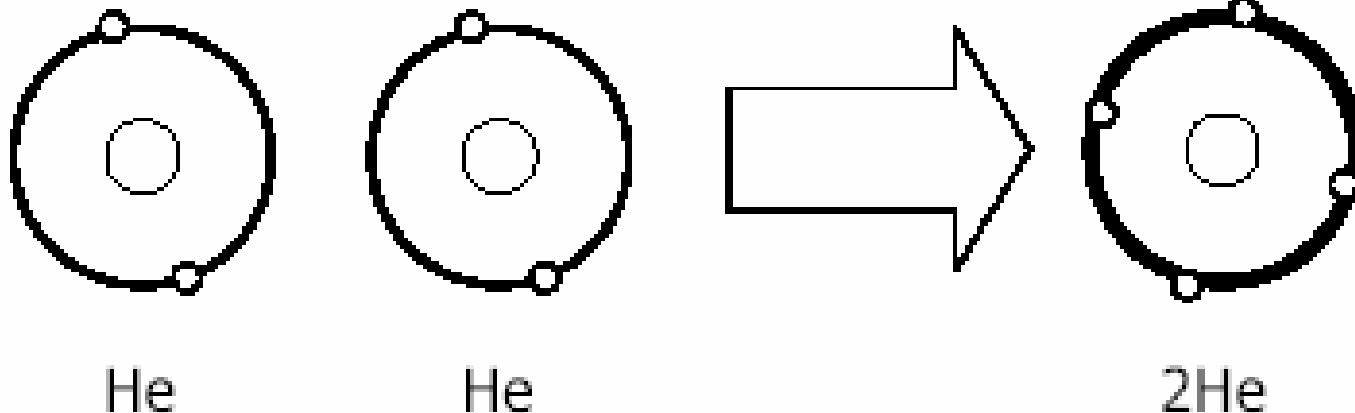


Modello a banda

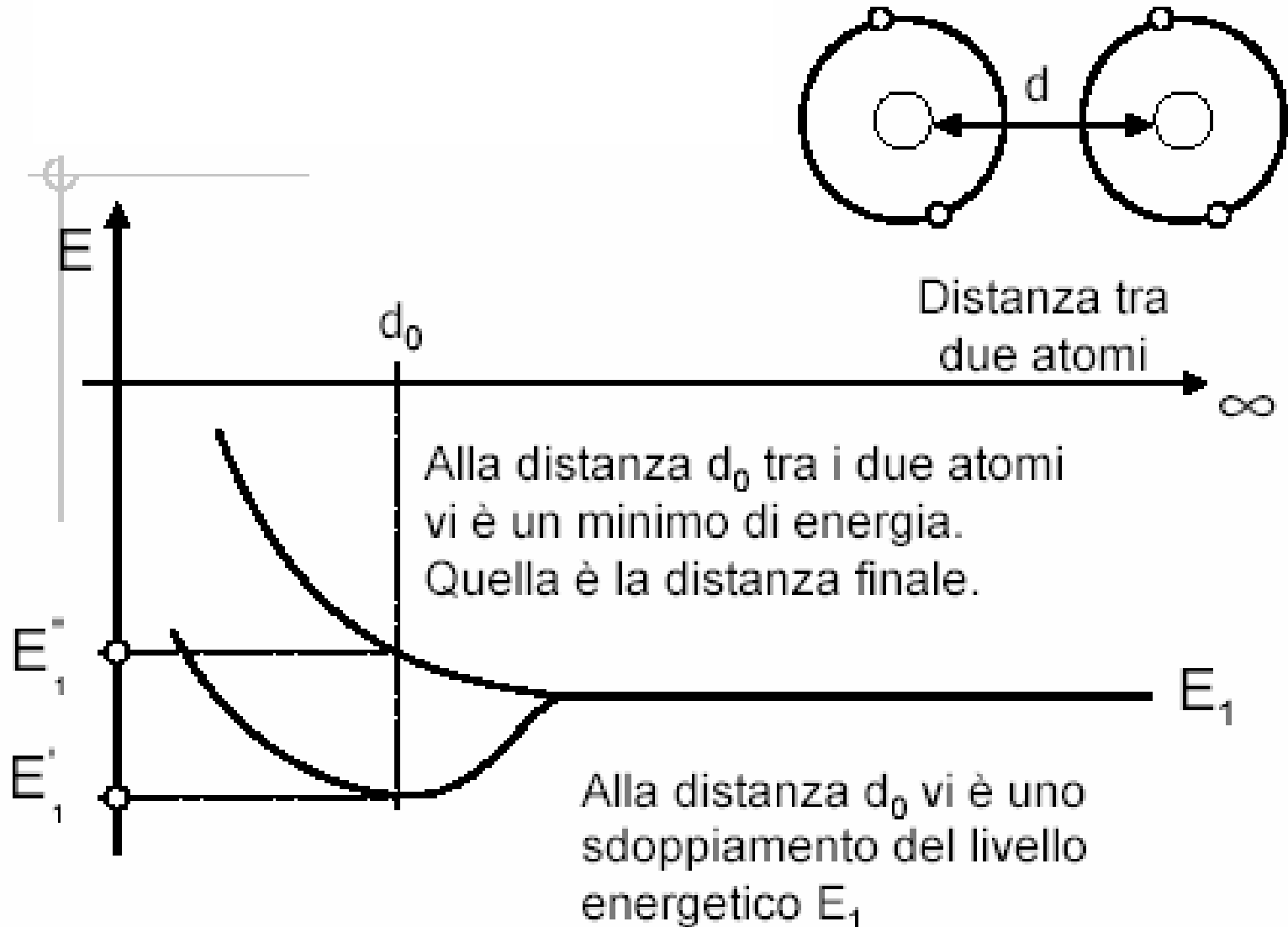
Pensiamo di avvicinare due atomi di He ($2e$, $2p$, $2n$).

Si avrà interazione tra gli atomi e la relazione: $E_n = \frac{-13.6}{n^2}$ [eV] non vale più.

Quando i due atomi si uniscono a formare un unico sistema, ci saranno 4 elettroni da sistemare nel livello E_1 . Per soddisfare il principio di esclusione di Pauli, il livello E_1 si sdoppia:

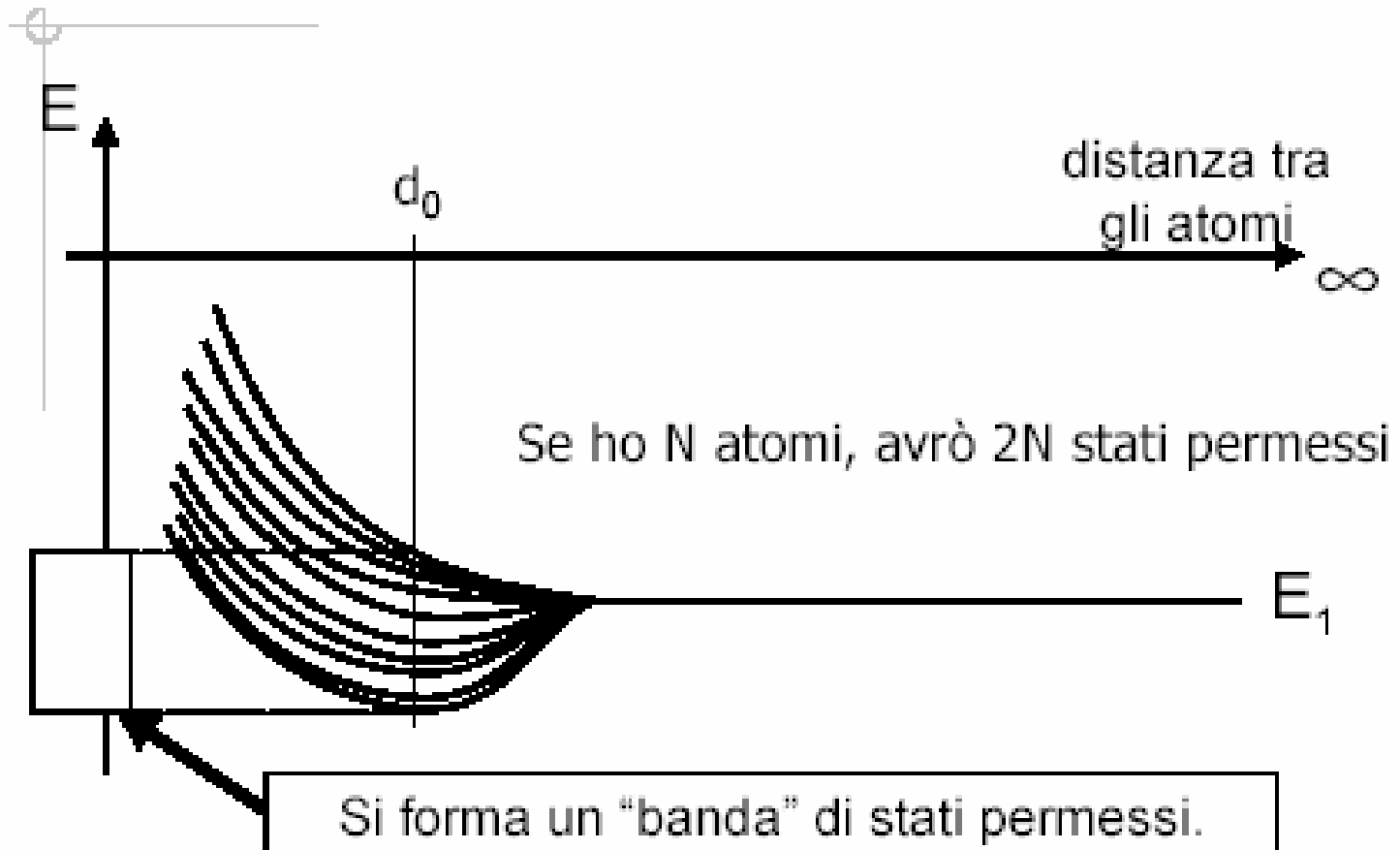


Modello a bande

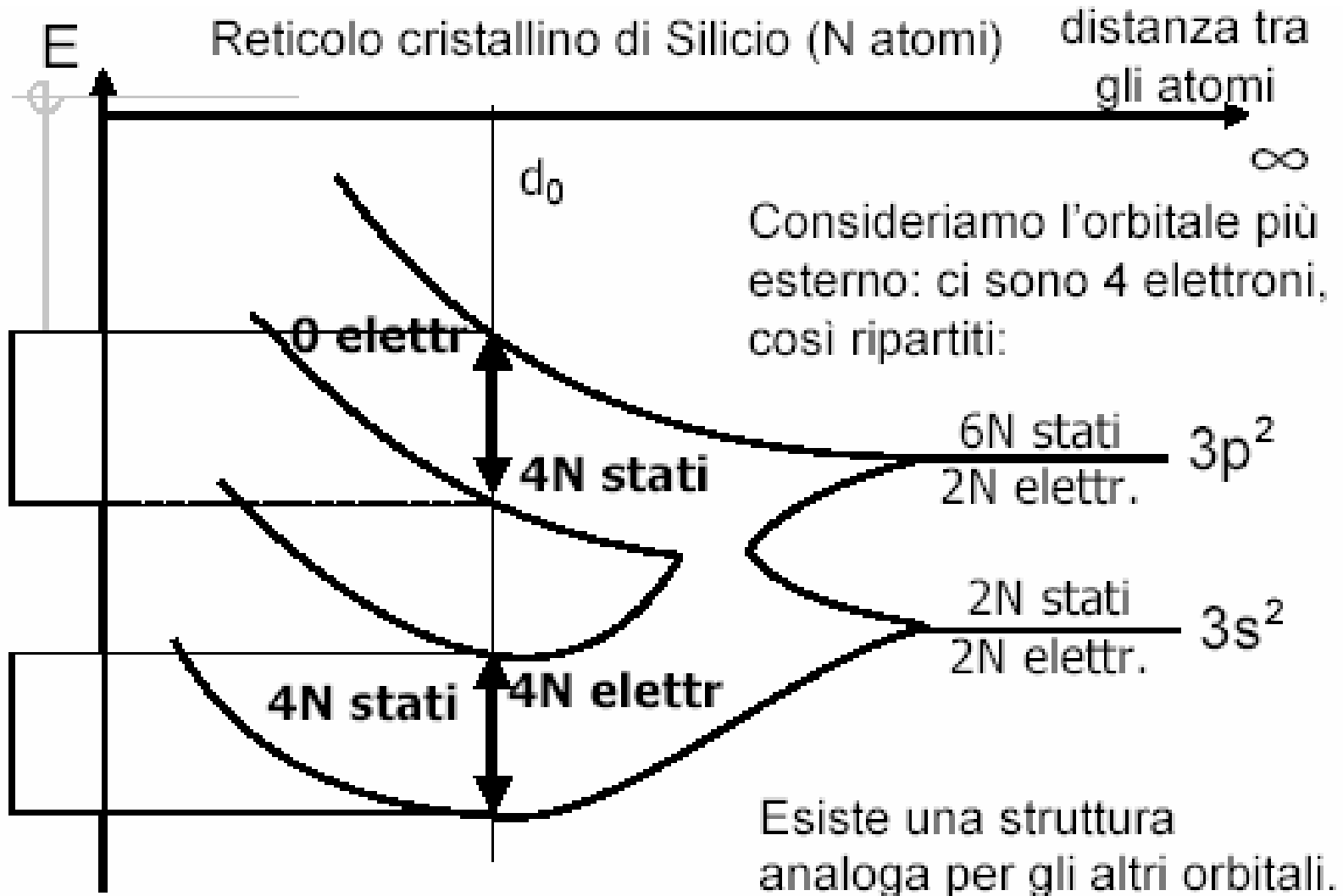


Modello a bande

Avviciniamo ora N atomi:



Modello a bande

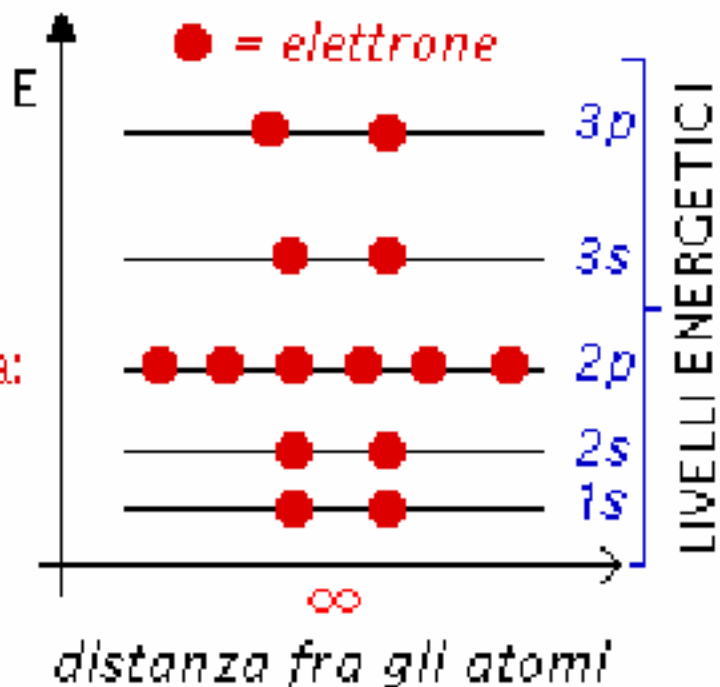


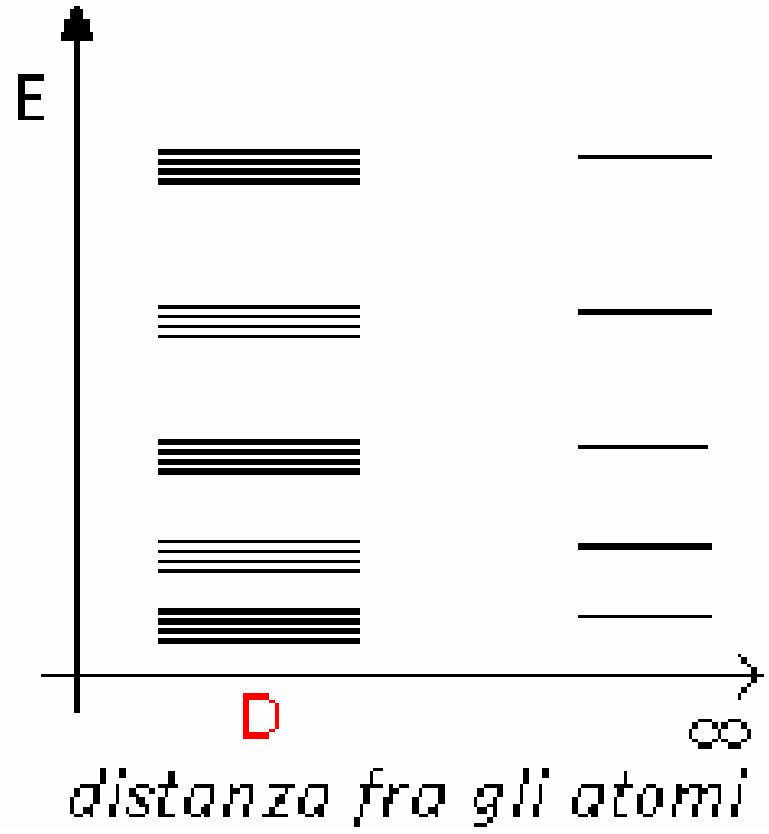
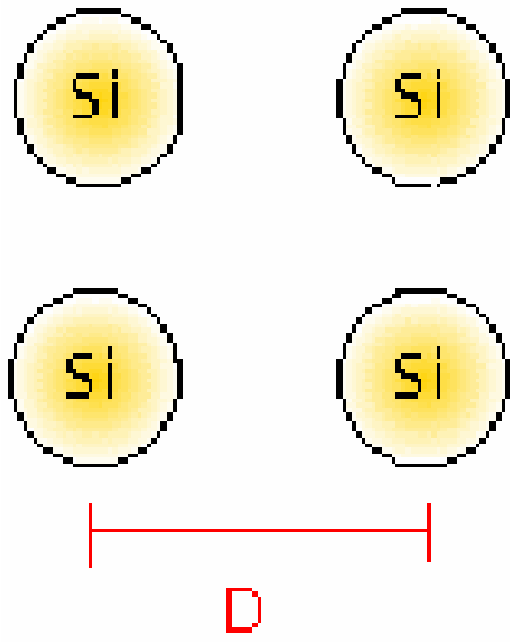


Atomo di Silicio
ISOLATO

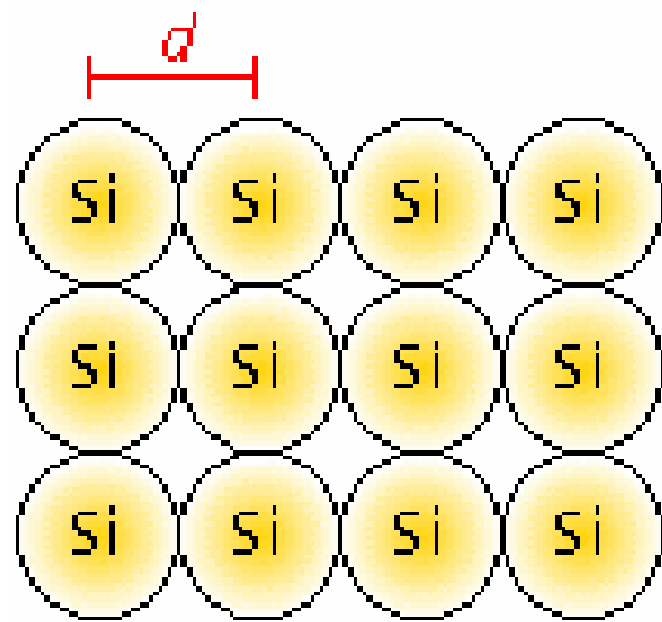
Configurazione elettronica:

numero e⁻ nell'orbitale
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
orbitale

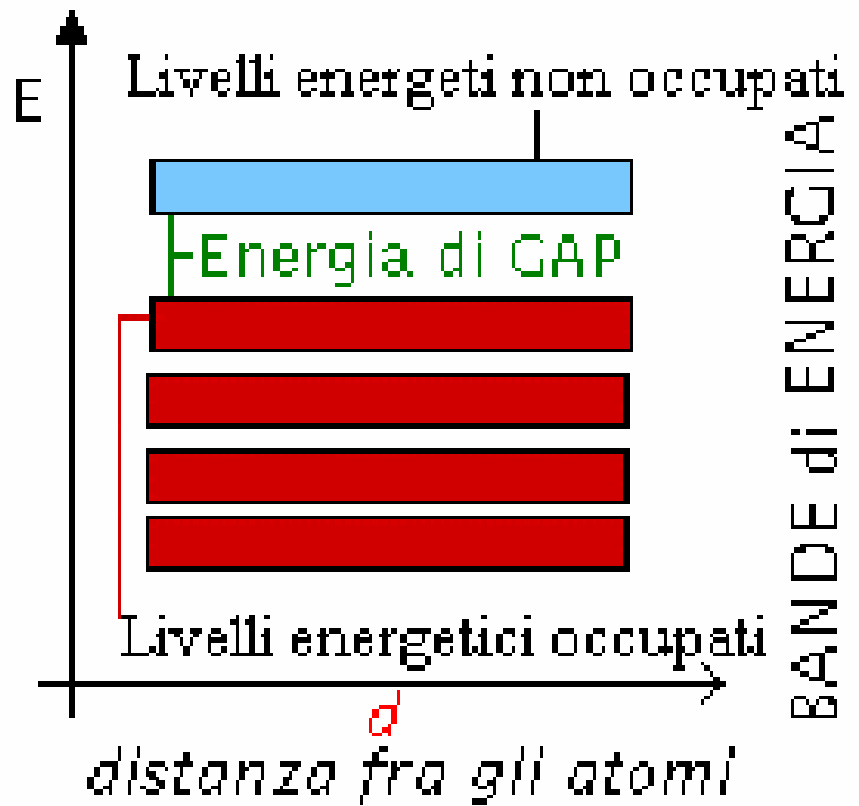




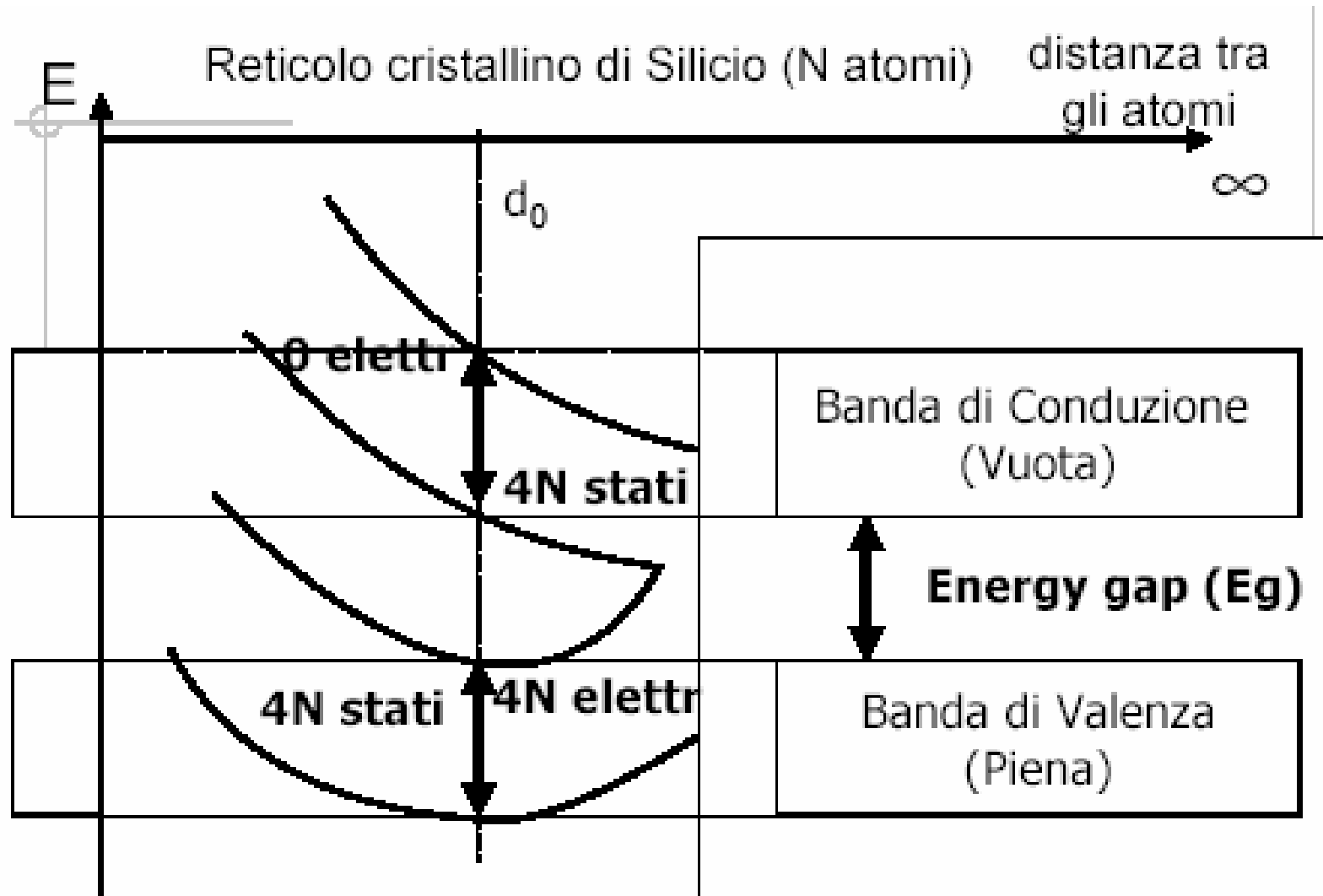
LIVELLI ENERGETICI



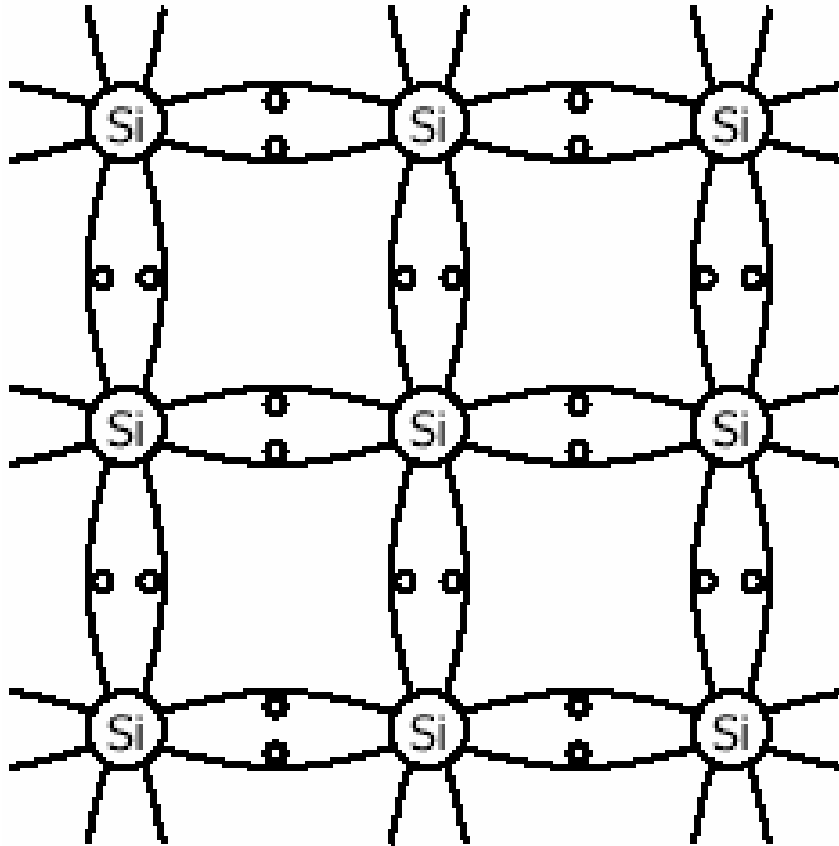
Cristallo di Silicio



Modello a bande



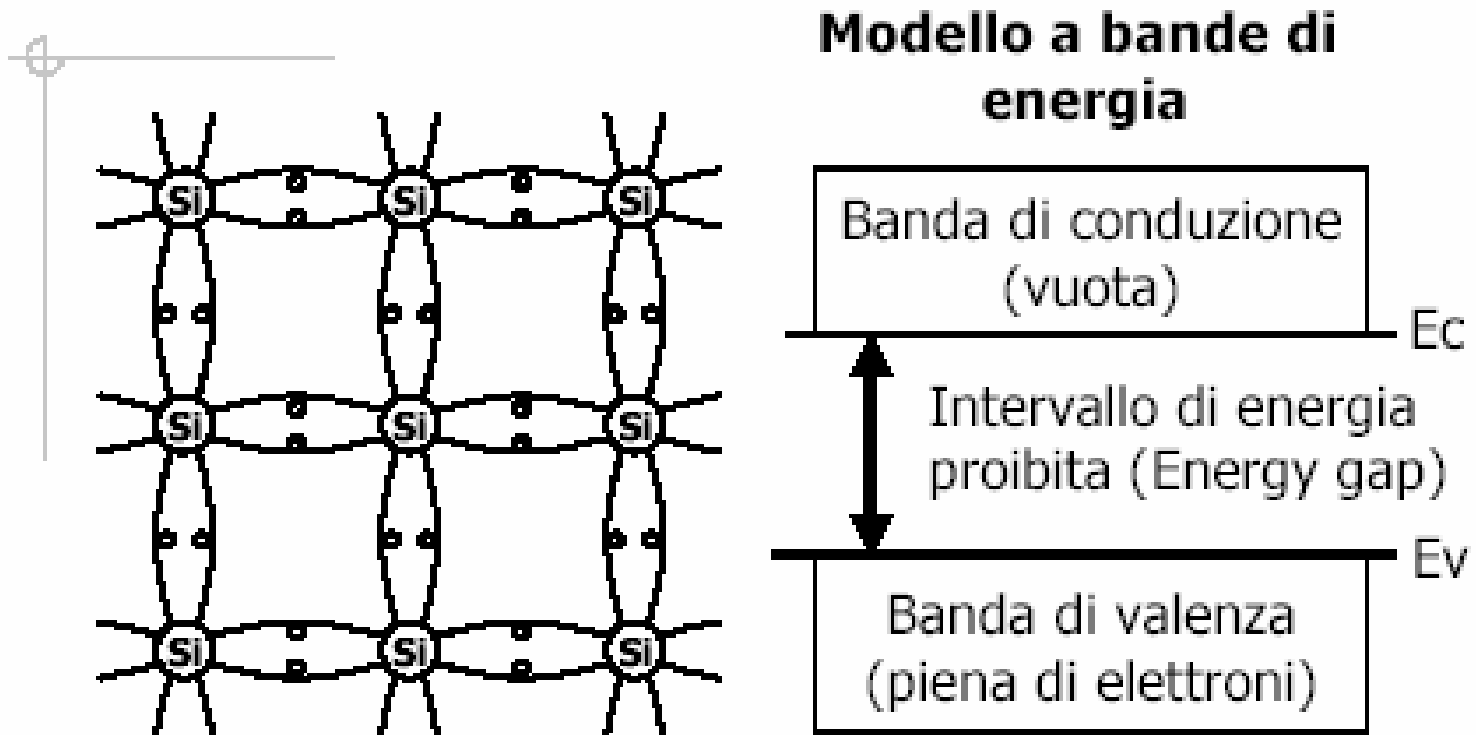
Cristallo di Silicio a $T = 0$ K



In un cristallo di silicio (o germanio) i 4 elettroni di valenza sono posti in comune tra atomi contigui nel cristallo.

In questo modo ogni atomo completa l'orbitale esterno (con 8 elettroni)

Cristallo di Silicio a $T = 0$ K

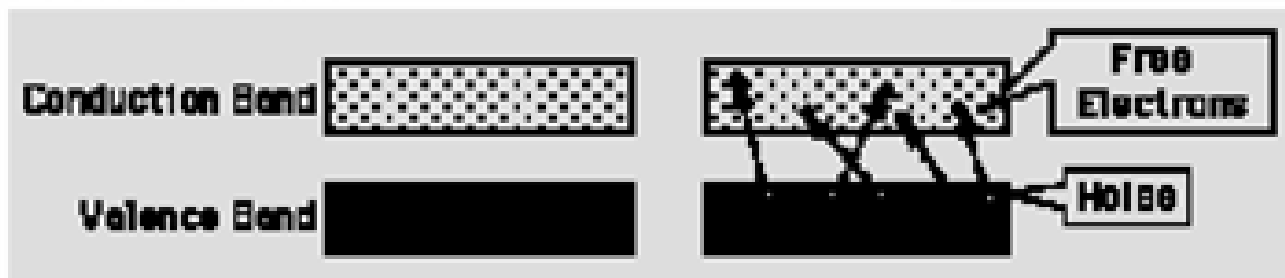
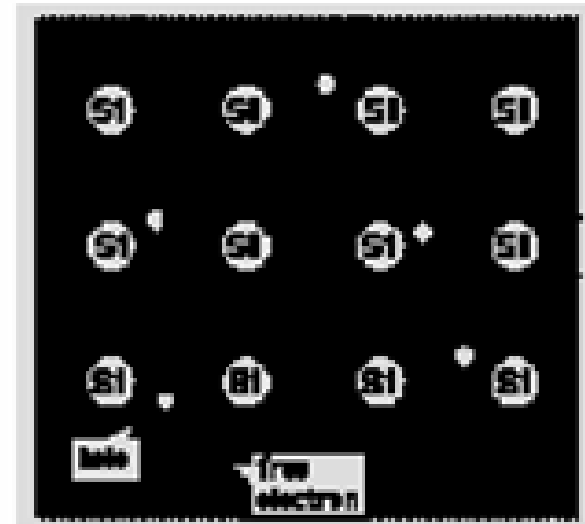


In queste condizioni, applicando una piccola differenza di potenziale, non ci sarà movimento di elettroni in quanto questi sono saldamente vincolati agli atomi!

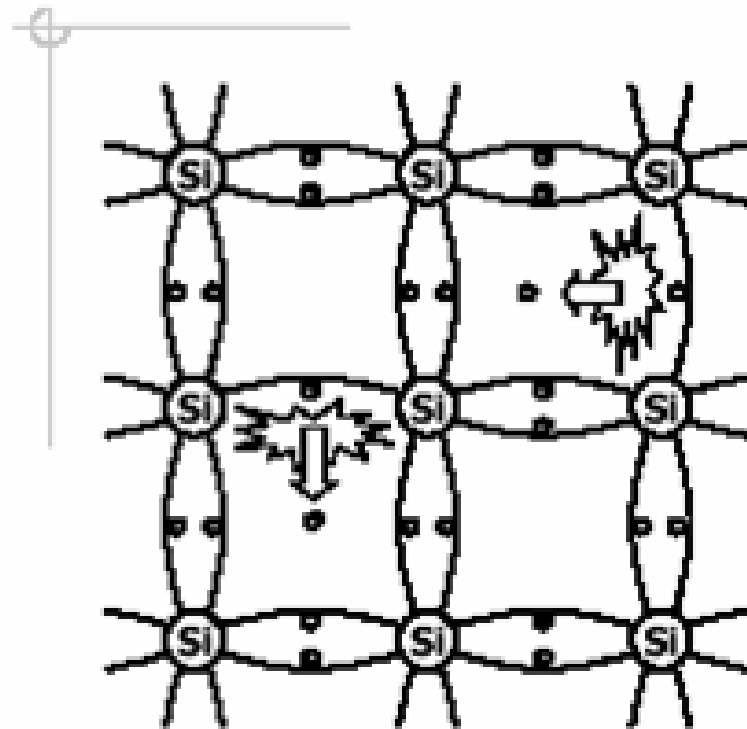
Semiconduttori intrinseci

In un cristallo di Si (o altri) a temperatura al di sopra dello zero assoluto, si ha una probabilità non nulla che un elettrone acquisisca energia sufficiente a rompere il legame covalente, finendo così in banda di conduzione.

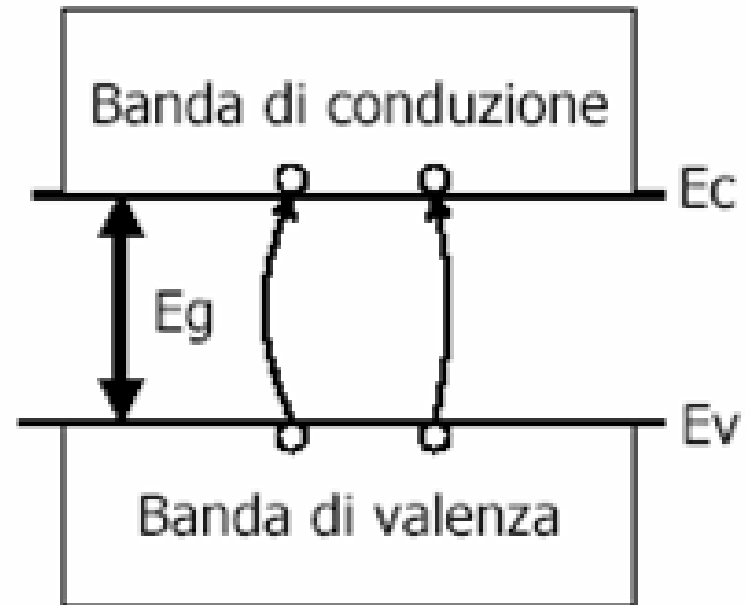
L'elettrone abbandona l'atomo relativo (che diventa uno ione carico positivamente) lasciandosi dietro un legame incompleto detto *lacuna*.



Cristallo di Silicio



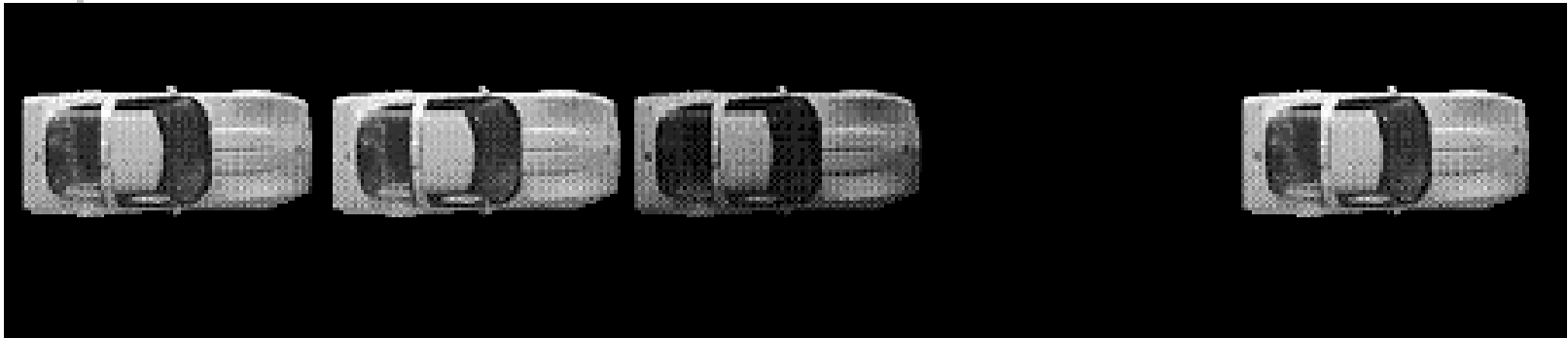
Modello a bande di energia



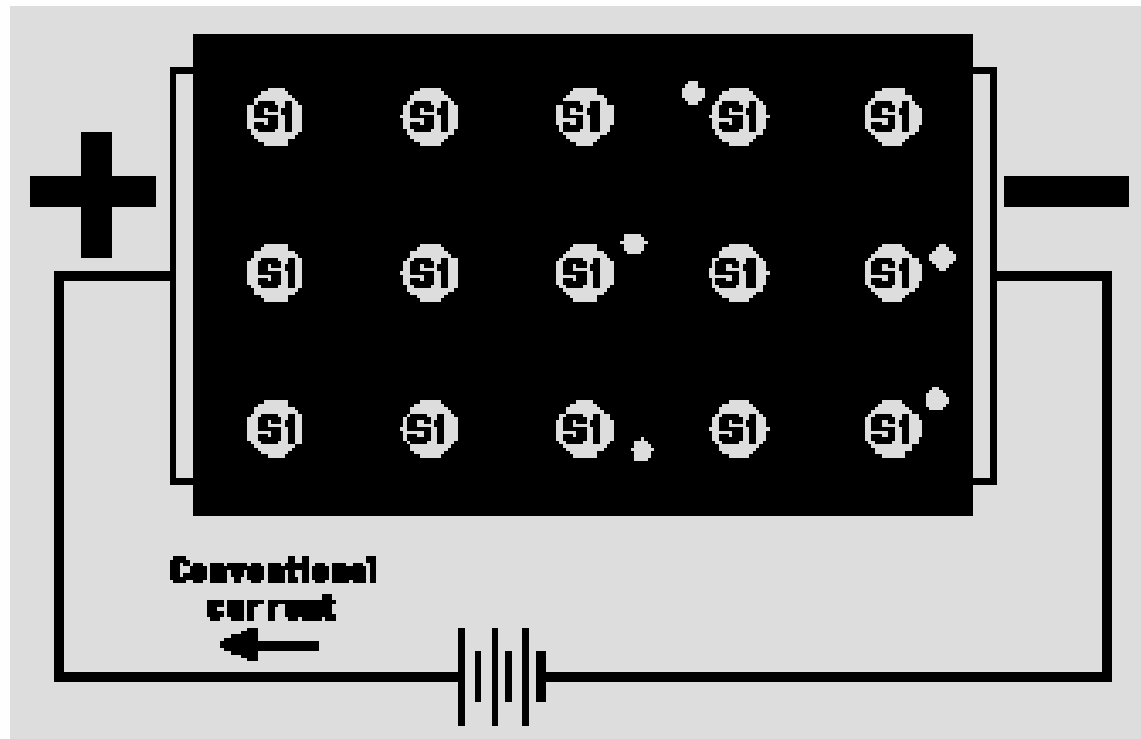
Per rompere il legame covalente (e originare una coppia elettrone/lacuna) serve una quantità minima di energia pari a E_g .

La lacuna ovvero la carica positiva

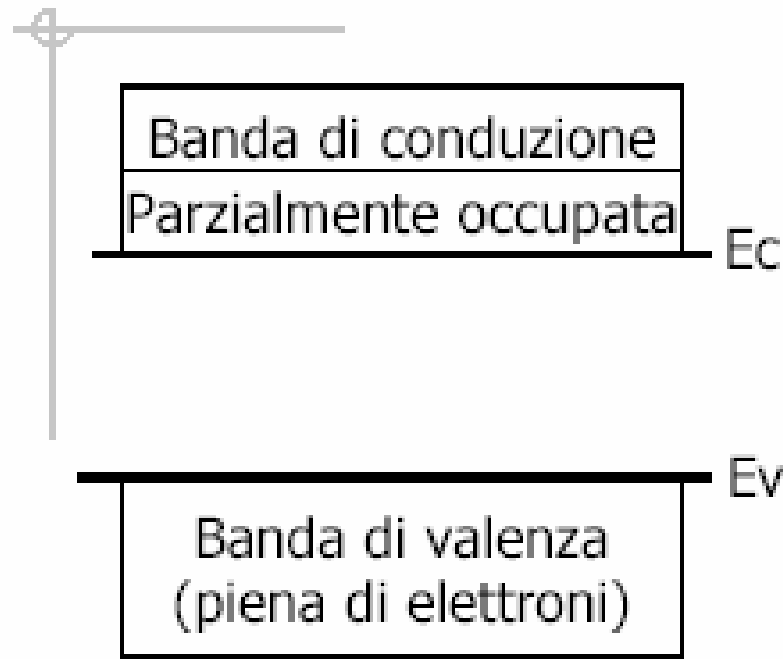
Le lacune si comportano come una carica positiva!



In presenza di una tensione applicata, sia elettroni liberi che lacune contribuiscono ad una piccola corrente.



Metalli



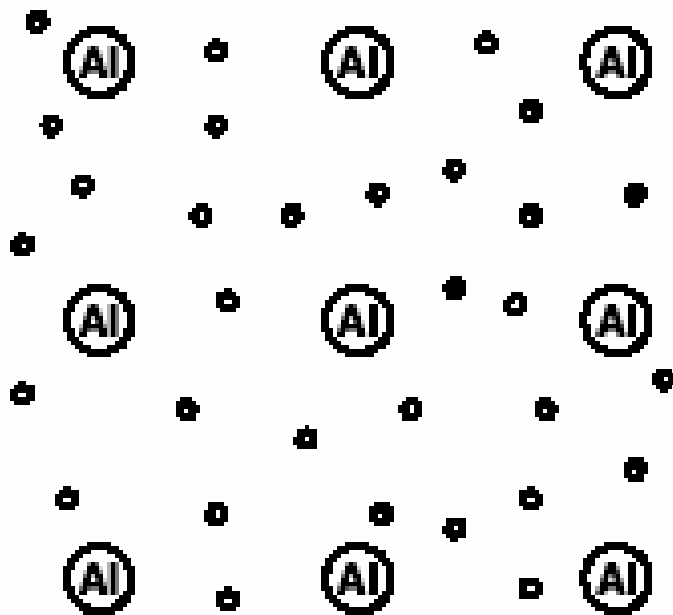
Per avere conduzione (movimento di cariche) ci devono essere livelli energetici liberi e la possibilità di raggiungerli.

Nei metalli, gli elettroni dell'orbitale più esterno sono debolmente legati agli atomi e sono liberi di muoversi nel reticolo.

Se si applica una piccola differenza di potenziale, si ha circolazione di corrente.

Equivalente idraulico: bottiglia mezza piena che, se inclinata, comporta spostamento di liquido! La bottiglia piena (o vuota), se inclinata, non comporta alcun spostamento di liquido.

Metalli

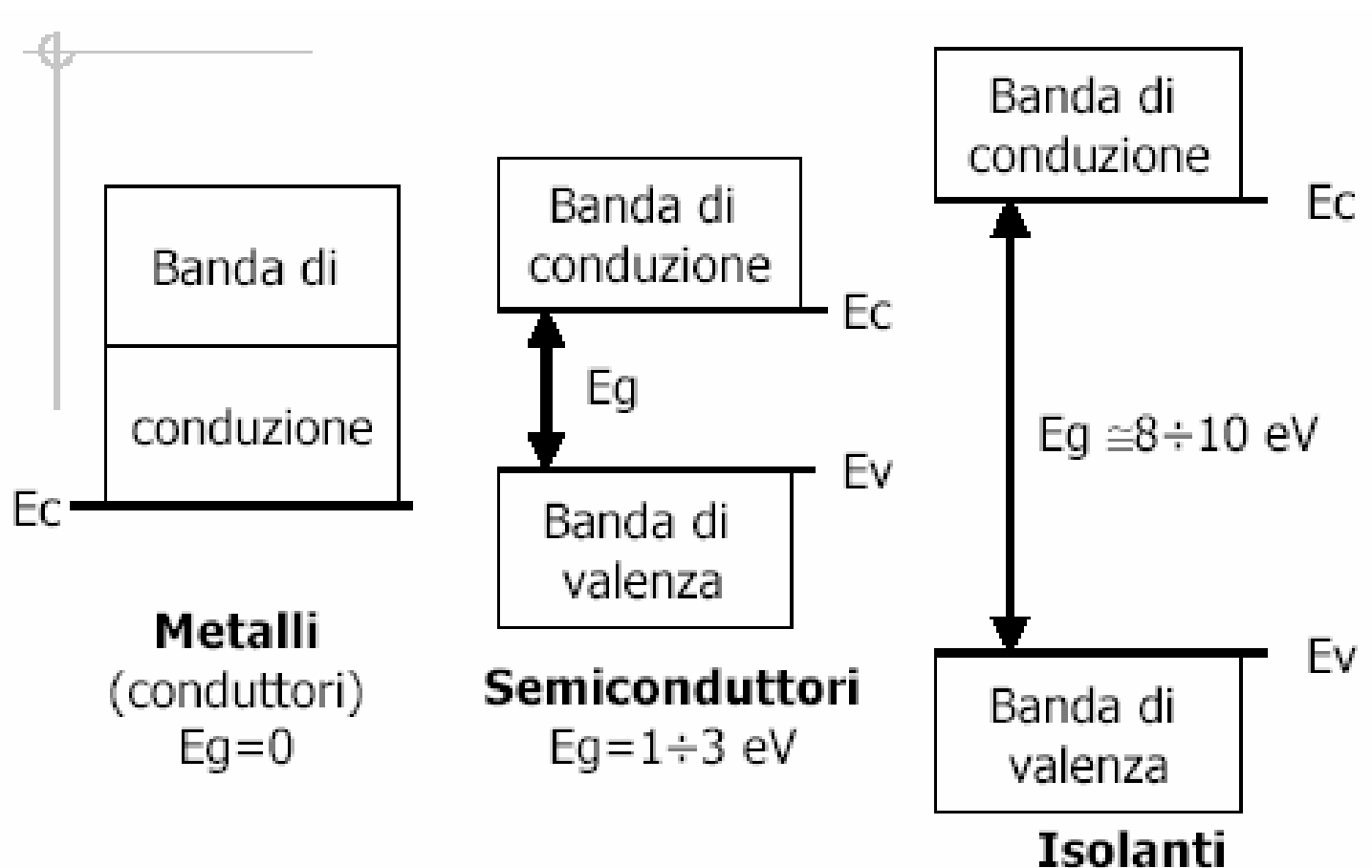


Gli elettroni dell'orbitale più esterno sono debolmente legati agli atomi.

Concetto di gas elettronico.

Se si applica una piccola differenza di potenziale, si ha circolazione di corrente.

Conduttori, semiconduttori e isolanti



Semiconduttori intrinseci

A temperatura ambiente (25° C) la densità di elettroni presenti in un semiconduttore intrinseco (n_i) che statisticamente (in un equilibrio dinamico) si trovano in banda di conduzione è dell'ordine di

1.45×10^{10} elettroni/cm³.

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

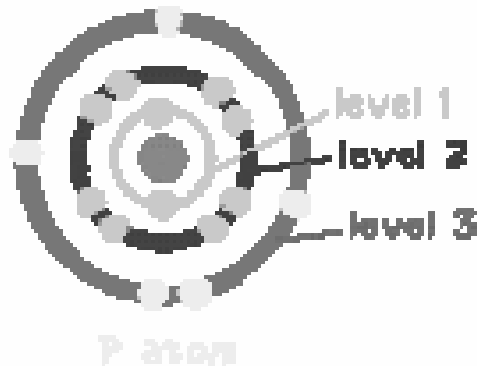
La densità di atomi nel cristallo è dell'ordine di 10^{22} atomi/cm³, per cui all'incirca un atomo ogni 10^{12} perde un elettrone di valenza.

Per il bilanciamento delle cariche, si ha anche che

$$n = p = n_i$$

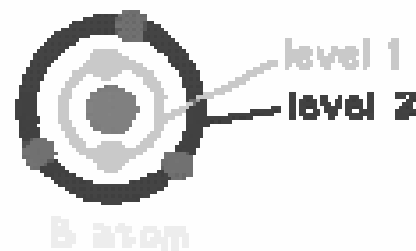
Semiconduttori drogati

L'aggiunta di una piccola percentuale di atomi di altri elementi nel cristallo comporta forti cambiamenti nelle proprietà elettriche del cristallo, che viene detto drogato.



FOSFORO

(5 elettroni di valenza)
fornisce 1 elettrone
aggiuntivo (**donatore**).
Drogaggio di tipo n



BORO

(3 elettroni di valenza)
fornisce 1 lacuna
aggiuntiva (**accettore**).
Drogaggio di tipo p

Periodic Table of the Elements

	IA																0	
1	1 H																2 He	
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	+Ac	104 Rf	105 Ha	106	107	108	109	110								

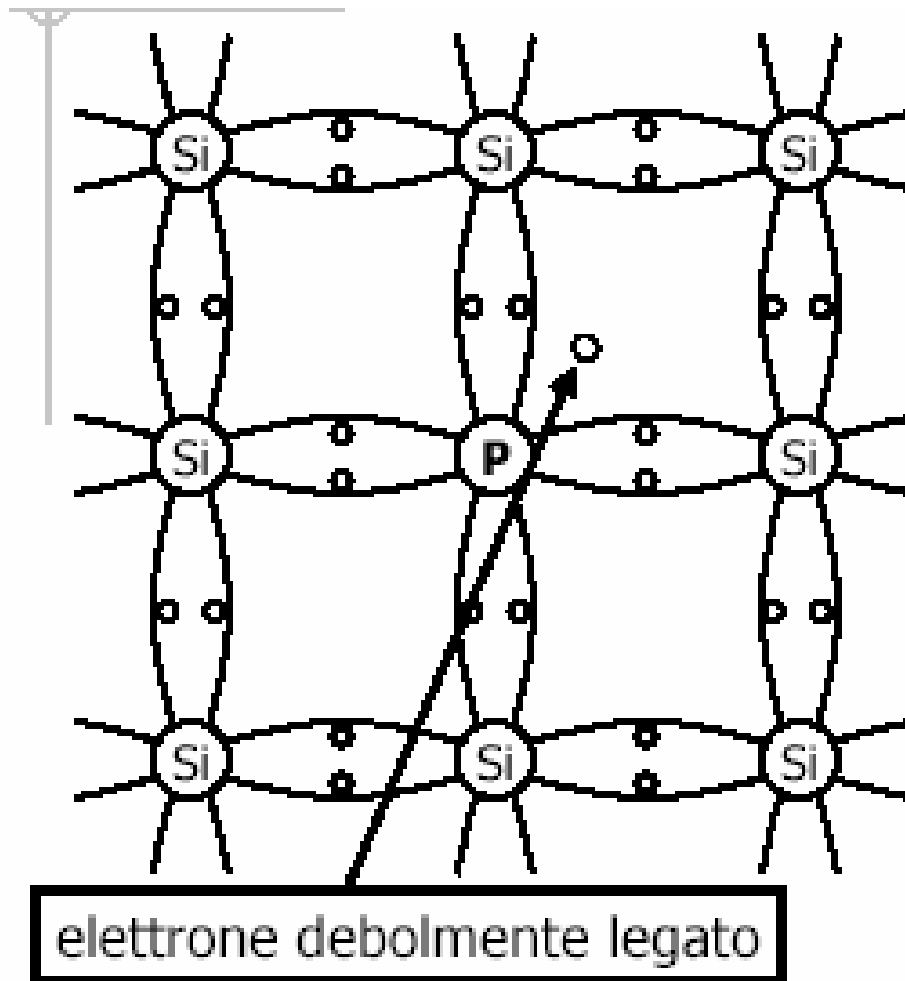
* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

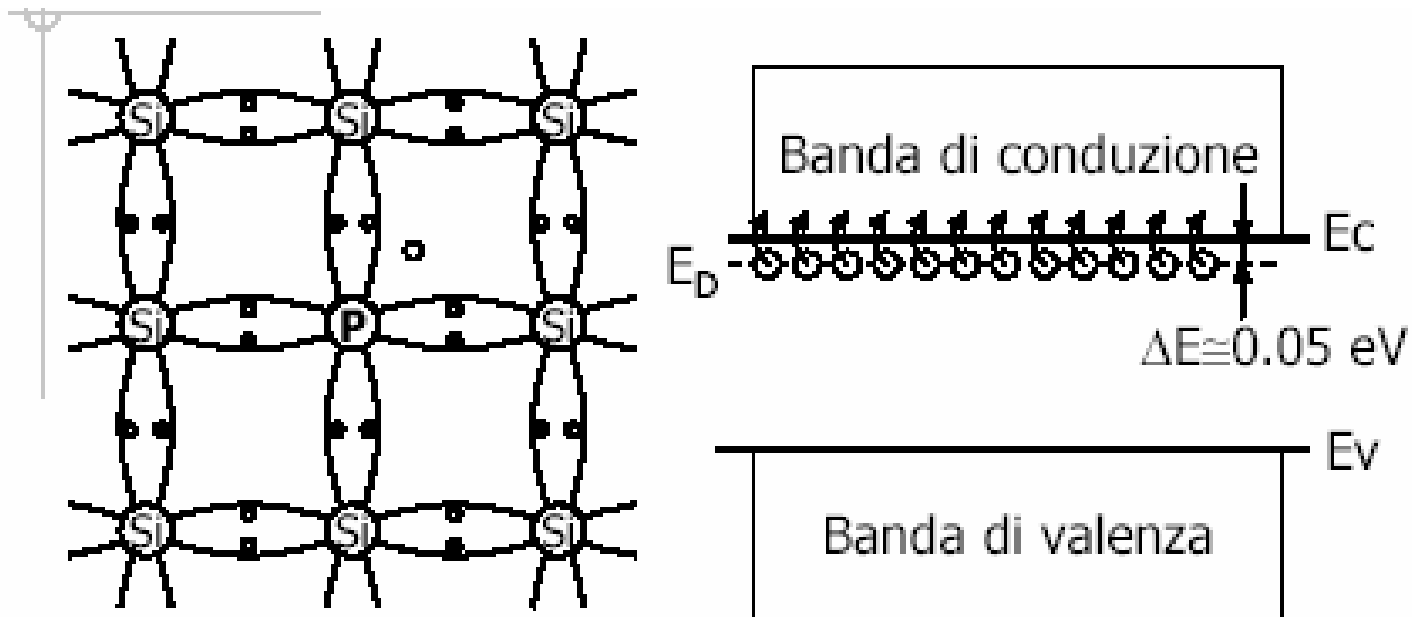
Tipo n



L'aggiunta di impurità pentavalenti (Sb, As, P) **introduce elettroni liberi** che non partecipano ai legami covalenti, e aumentano la conduttività del semiconduttore. (non si creano lacune),

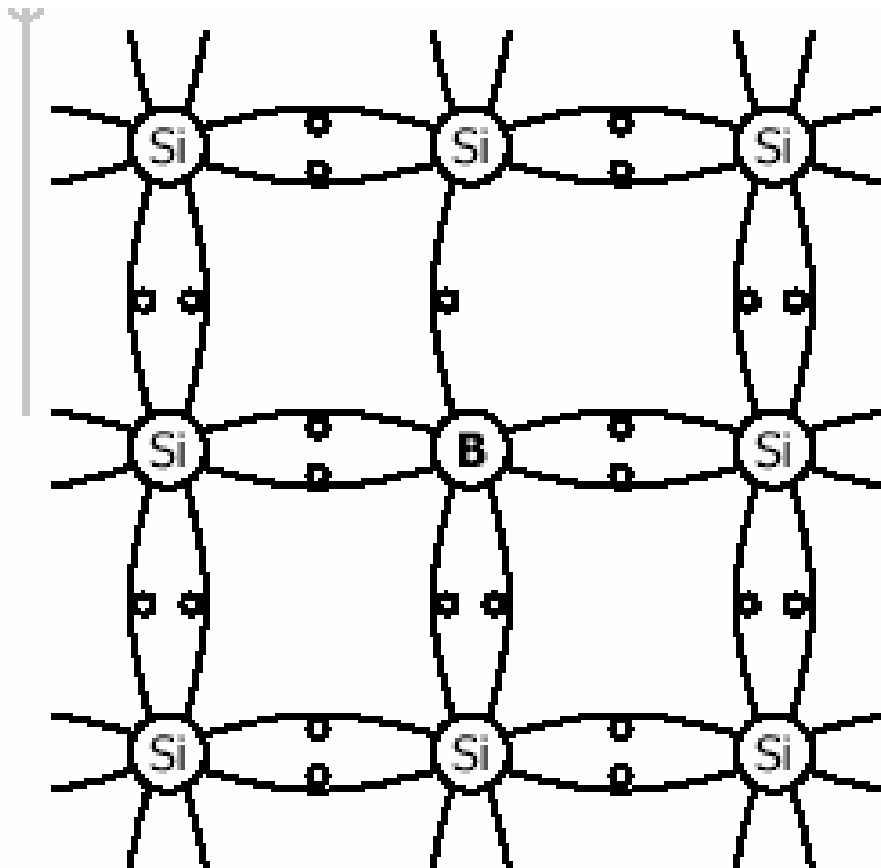
Gli atomi del **V** gruppo donano un elettrone e per questo vengono detti: "**donatori**"

Tipo n con atomi donatori



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 $n = n_i + N_D \approx N_D$

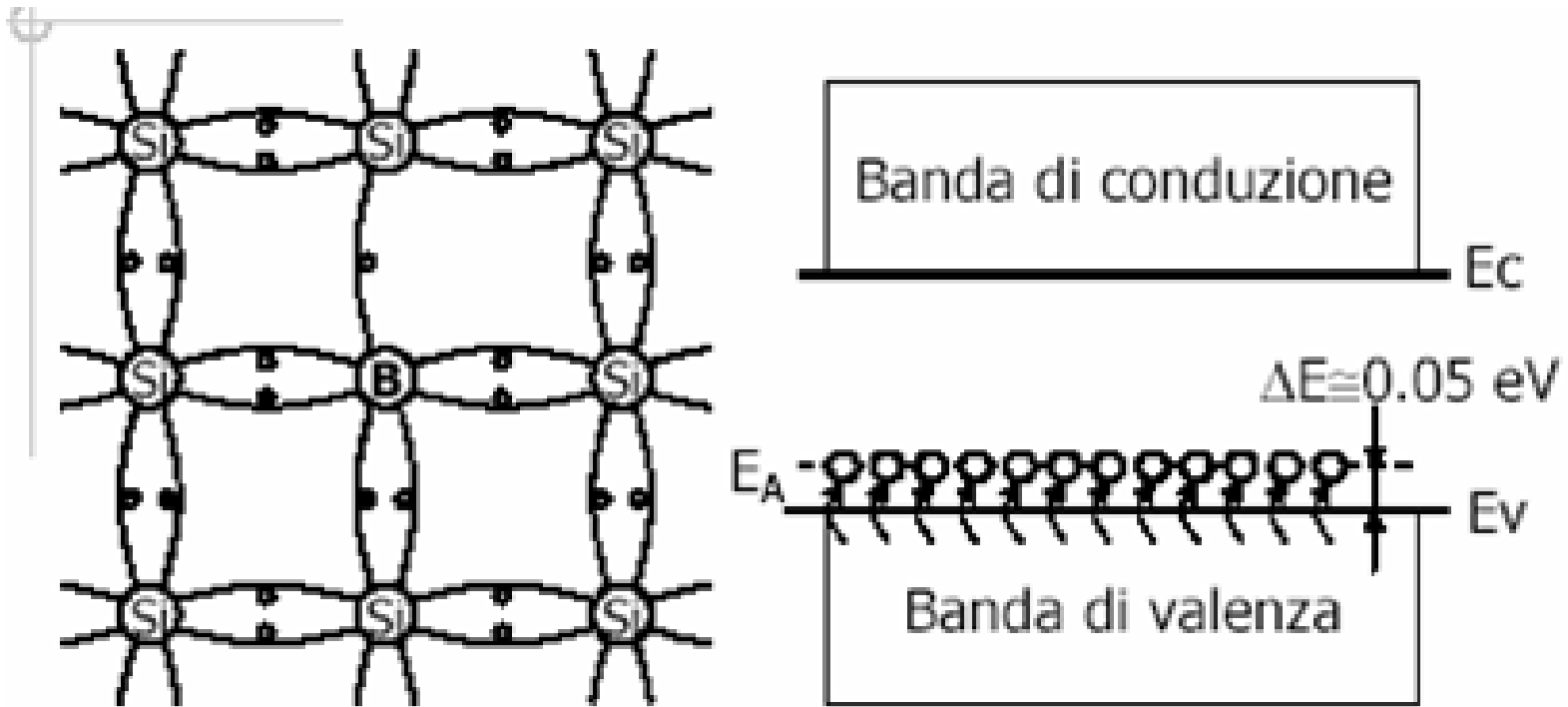
Tipo p con atomi accettori



L'aggiunta di impurità trivalenti (B, Al, Ga) **crea delle assenze di elettroni di valenza (lacune)** che aumentano la conduttività del semiconduttore.

Gli atomi del **III** gruppo accettano un elettrone e per questo vengono detti: "**accettori**"

Tipo p con atomi accettori



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 $p = p_i + N_A \cong N_A$

Generazione e ricombinazione

Definizione: electron/hole pair = EHP

Sia **G** il tasso di generazione delle EHP (numero di EHP che si generano nell'unità di tempo). In prima approssimazione, **G** dipende solo dalla temperatura: $G = f_1(T)$

Sia **R** il processo complementare di G: cioè il tasso di ricombinazione (processo mediante il quale un elettrone libero si lega ad un legame covalente "vacante").

In prima approssimazione, **R** può avvenire solo in presenza di elettroni e lacune. Quindi **R** dipende dal prodotto delle concentrazioni di elettroni e lacune: $R = n \cdot p \cdot f_2(T)$

Silicio drogato

Semiconduttore tipo "n":

$$n = n_i + N_D \cong N_D$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \cong \frac{n_i^2}{N_D}$$

Esempio:

$$N_D = 10^{18} \text{ [cm}^{-3}\text{]}, \quad n = 10^{18}, p = 2.1 \cdot 10^2 \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

Semiconduttore tipo "p":

$$p = p_i + N_A \cong N_A$$

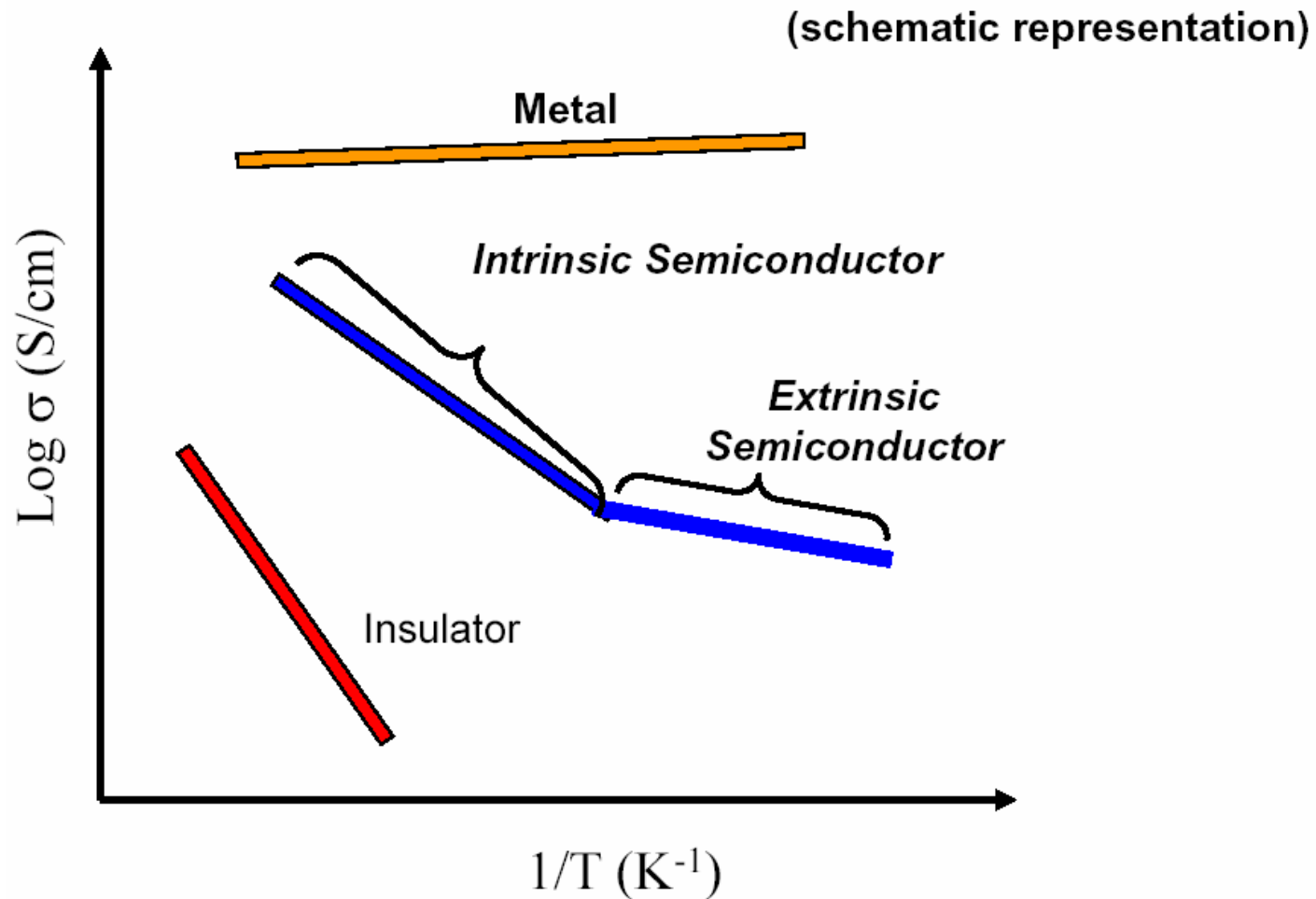
$$n = \frac{n_i^2}{p} \cong \frac{n_i^2}{N_A}$$

Esempio:

$$N_A = 10^{16} \text{ [cm}^{-3}\text{]}, \quad p = 10^{16}, n = 2.1 \cdot 10^4 \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

$$n_n \gg n_i = p_i \gg p_n \quad \text{e} \quad p_p \gg p_i = n_i \gg n_p$$

Arrhenius

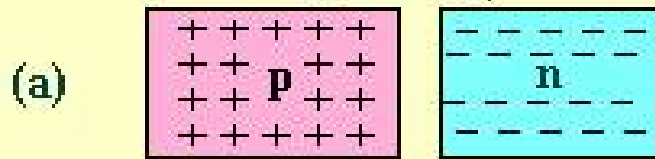


Che cosa è una **giunzione p-n**?

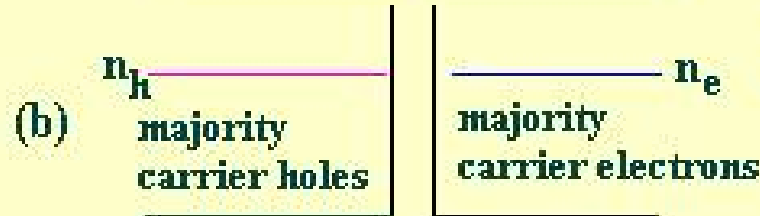
Due cristalli di silicio vengono drogati diversamente: un cristallo con accettore (Boro) a formare una struttura di tipo p, l'altro cristallo con donore (Fosforo) a formare una struttura di tipo n.

I due tipi di strutture vengono poste a contatto: la zona di separazione è chiamata zona di giunzione p-n.

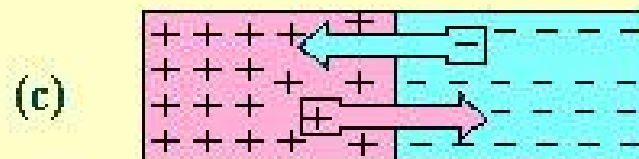
overall neutral



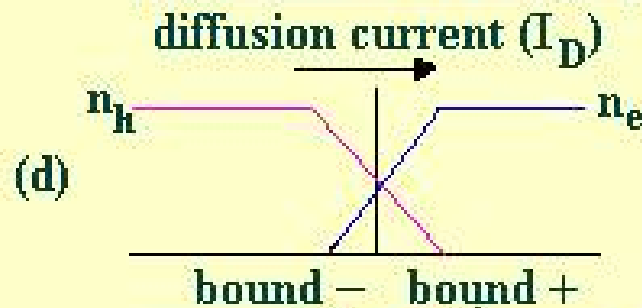
1. Overall neutral
n-type and p-type



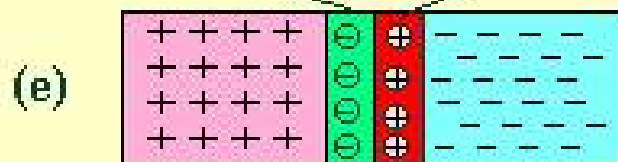
2. Assume equal positive
and negative majority
carriers



3. Bring p-type and n-type
together. Holes and
electrons diffuse
across junction

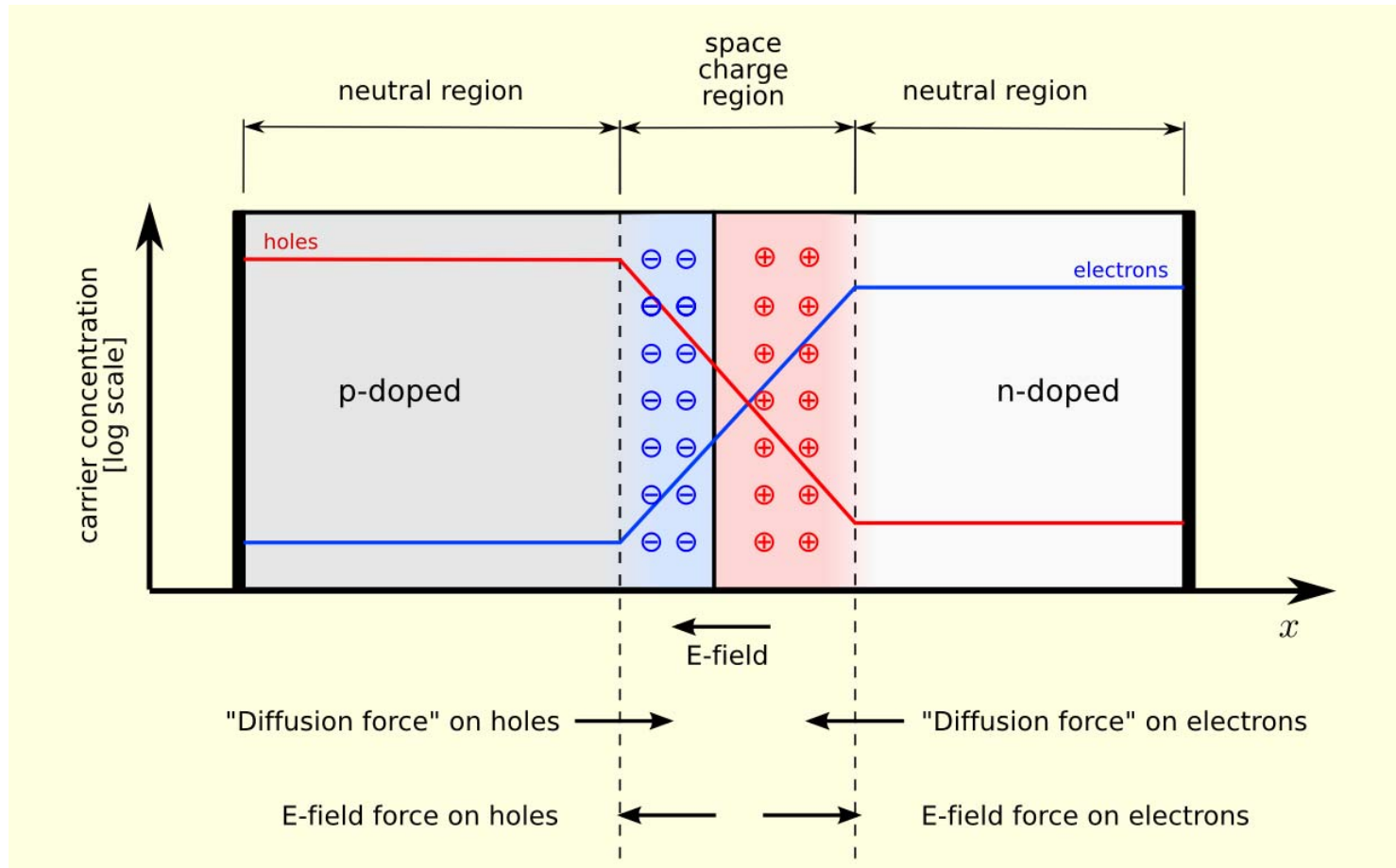


4. Electrons diffusing into
p-type combine with
holes near the junction
leaving net negative
bound charge to left of
junction. Holes diffusing
into n-type combine with
electrons near the
junction leaving net
positive bound charge
to right of junction



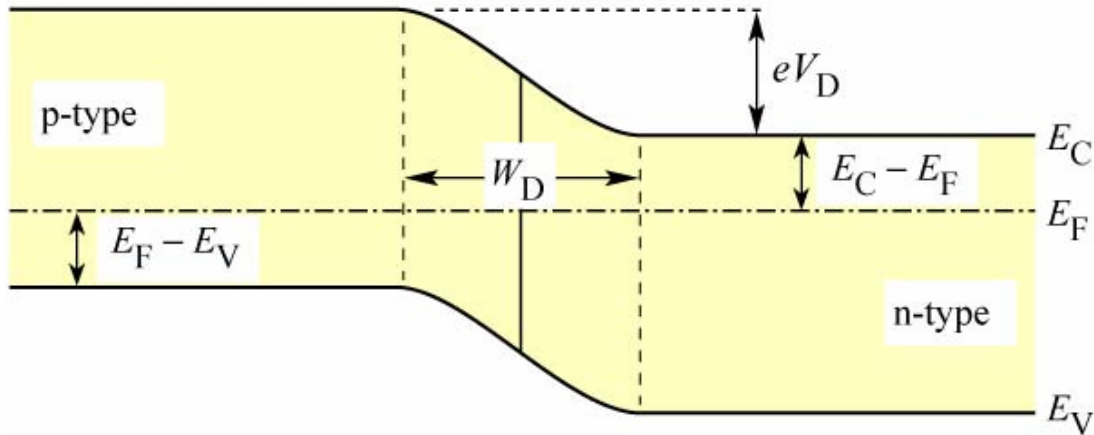
depletion zone

Giunzione p-n



Giunzione p-n e tensione applicata

(a) p-n junction under zero bias



(b) p-n junction under forward bias

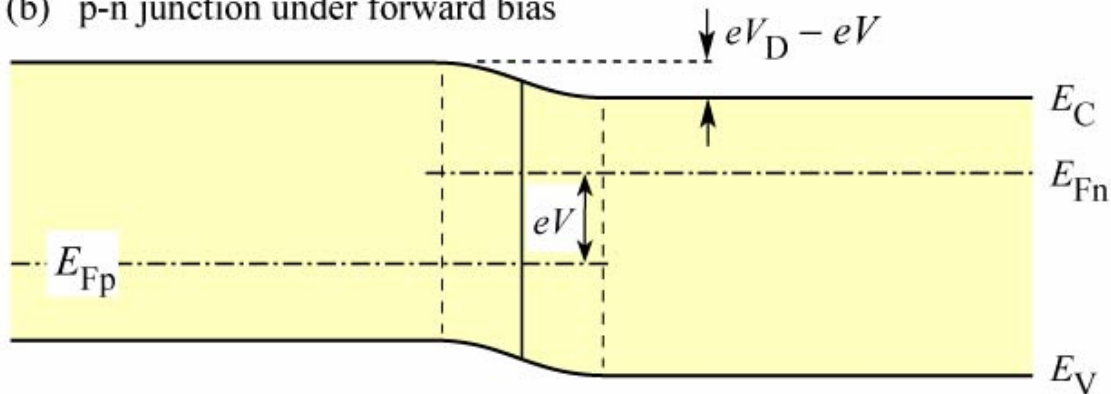
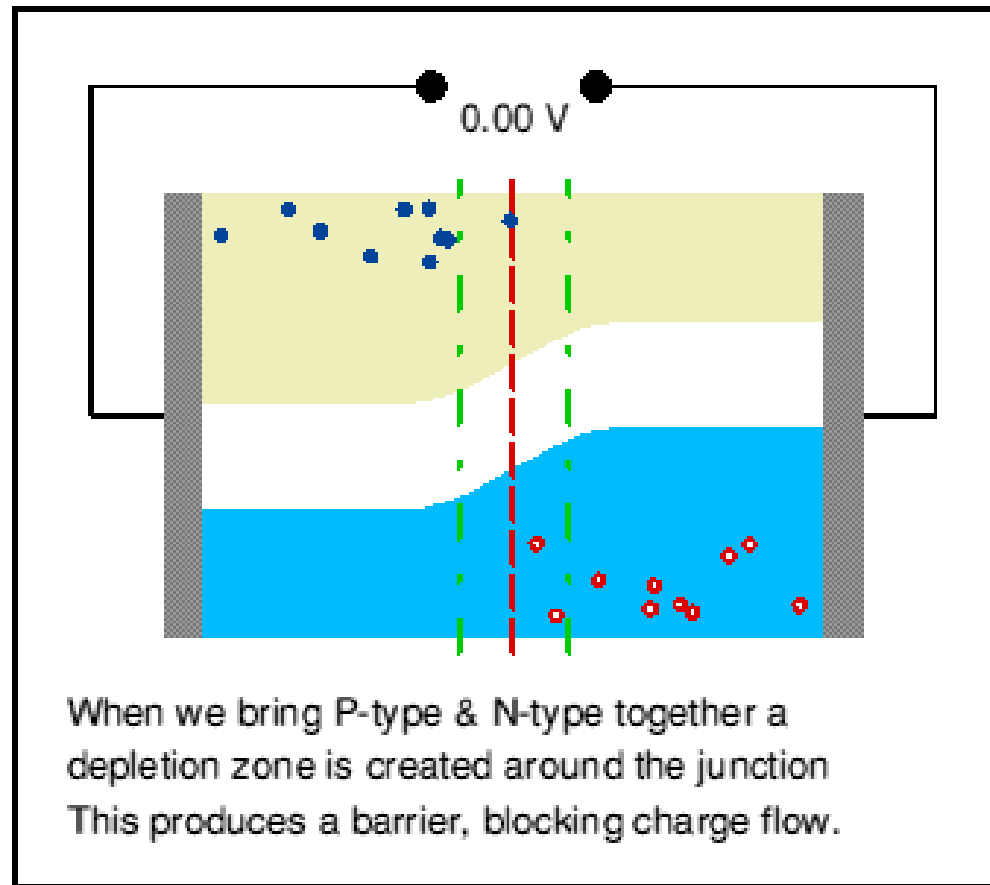


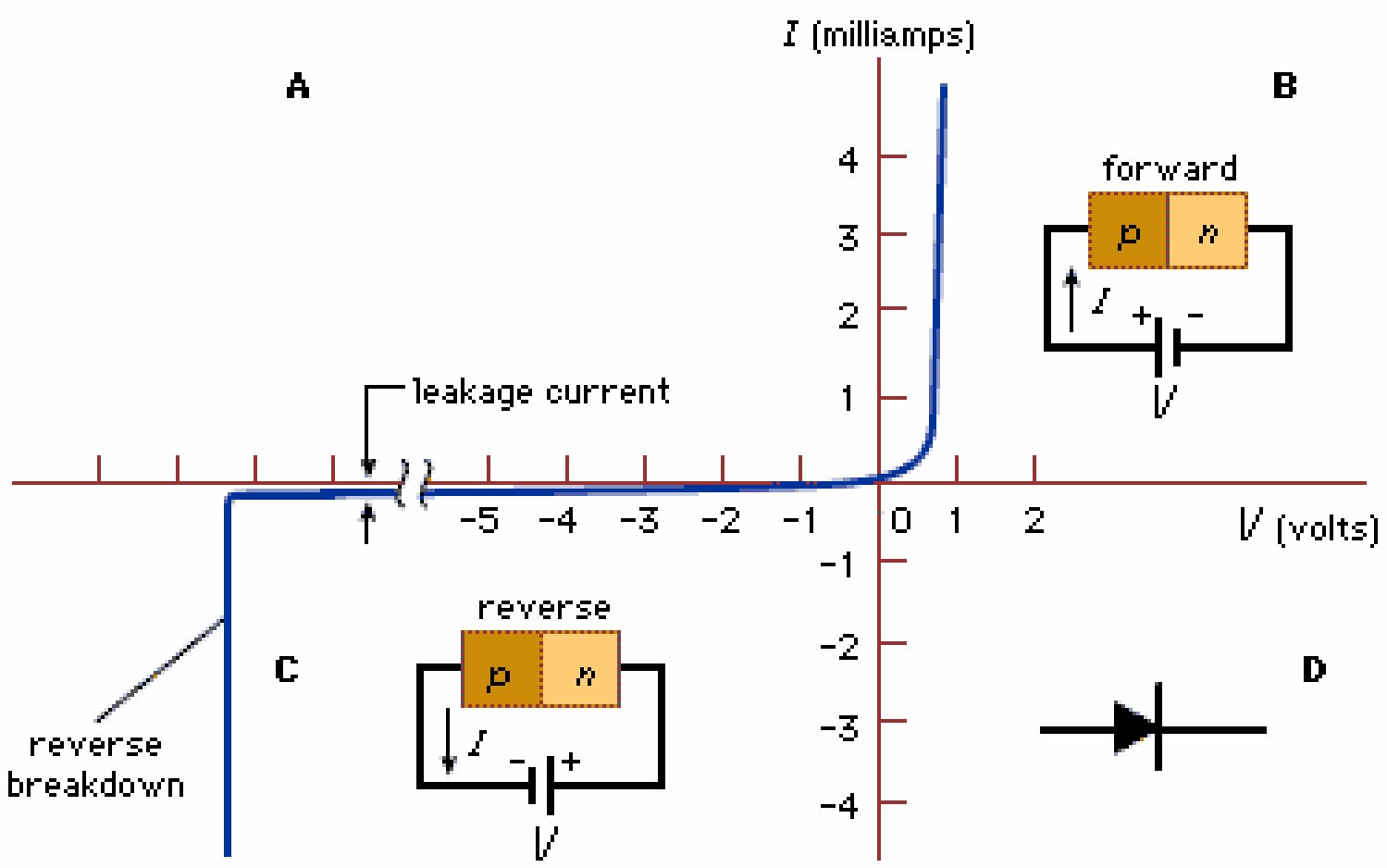
Fig. 4.1. P-n junction under (a) zero bias and (b) forward bias. Under forward bias conditions, minority carriers diffuse into the neutral regions where they recombine.

Giunzione p-n e tensione applicata



© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews

Curva caratteristica del diodo



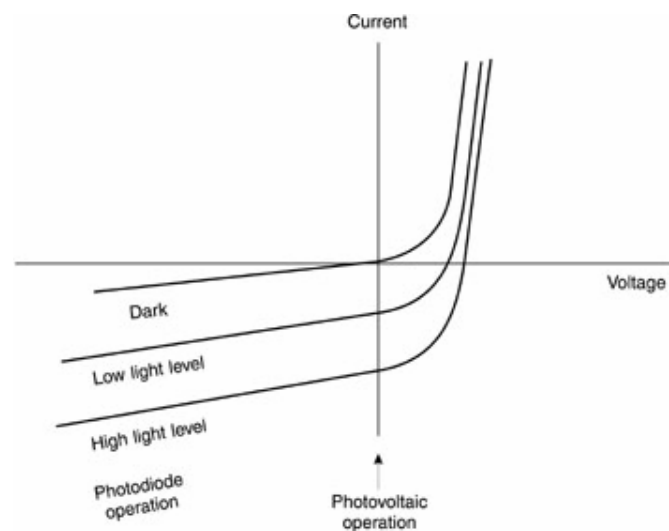
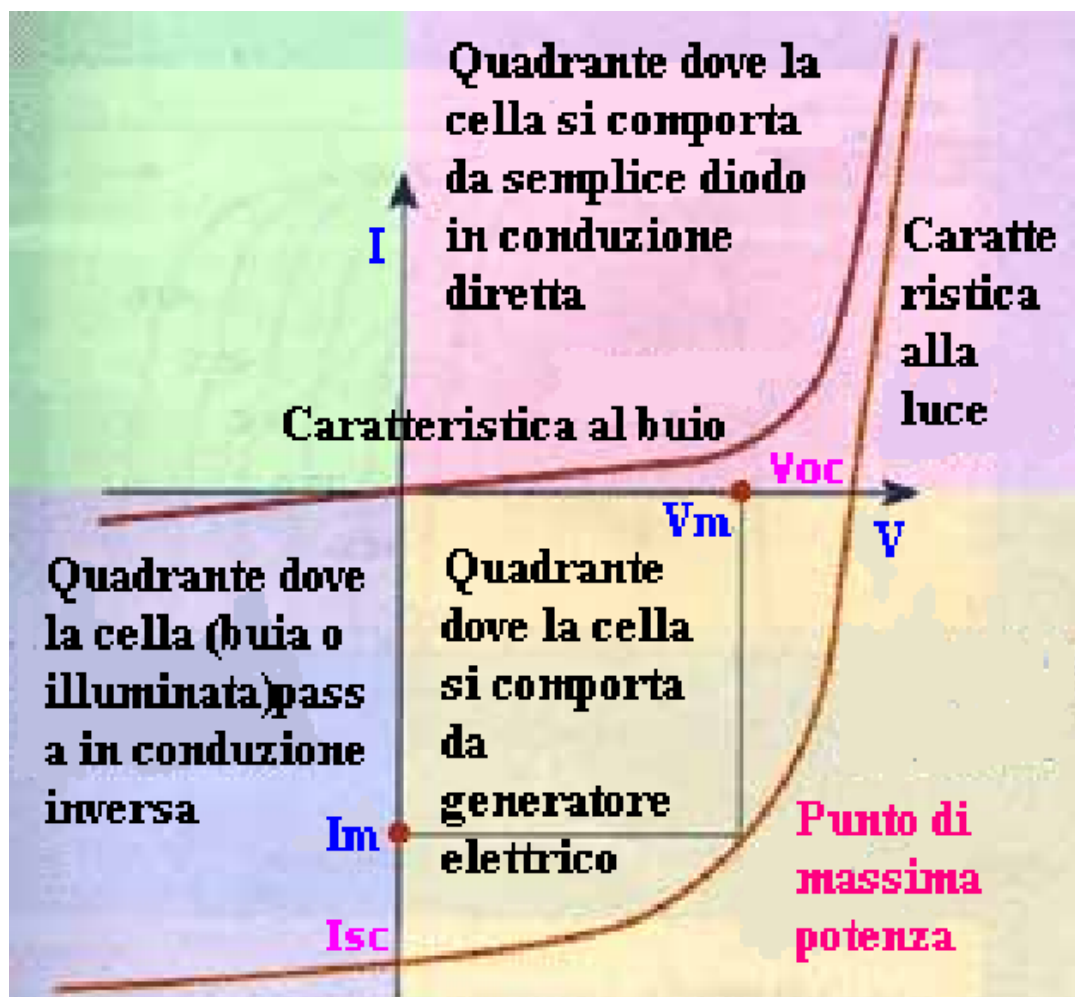
Effetto fotovoltaico

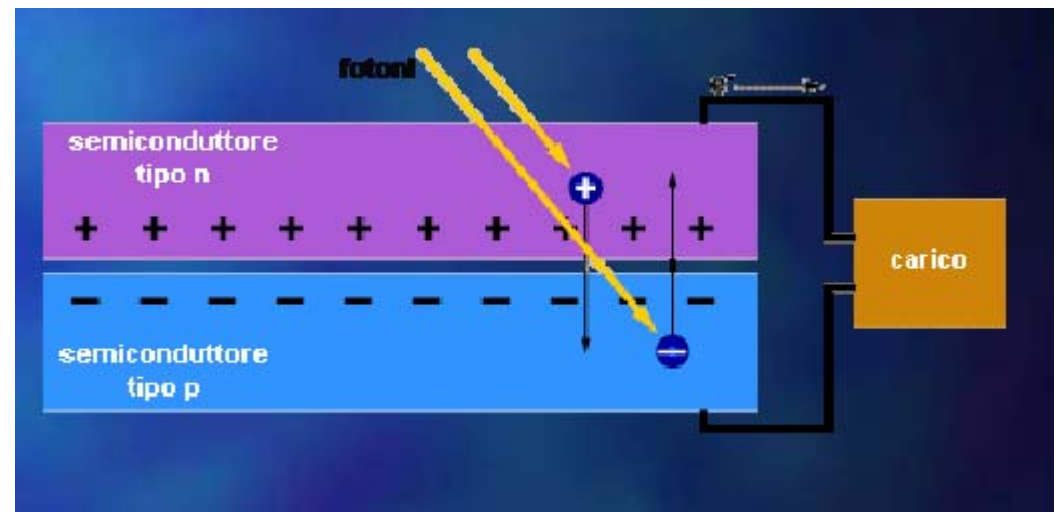
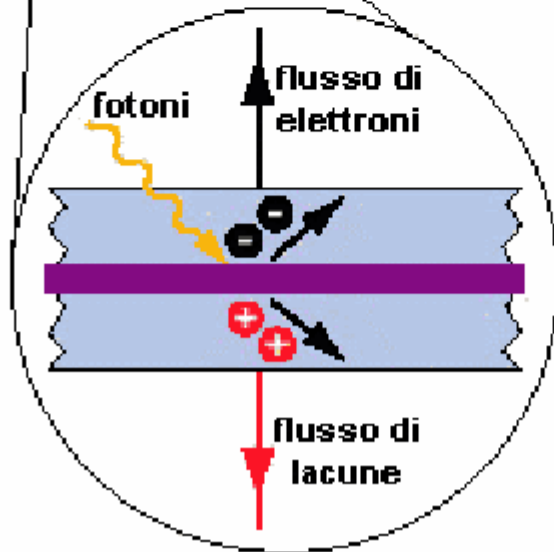
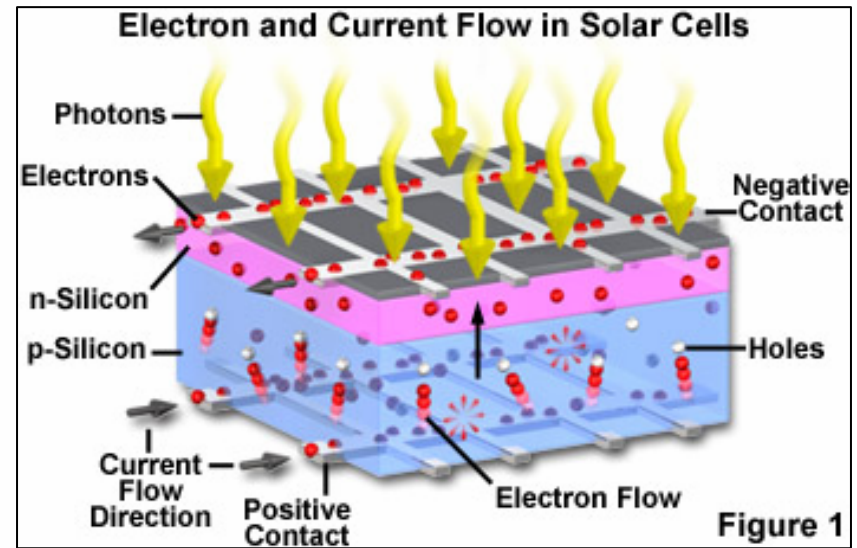
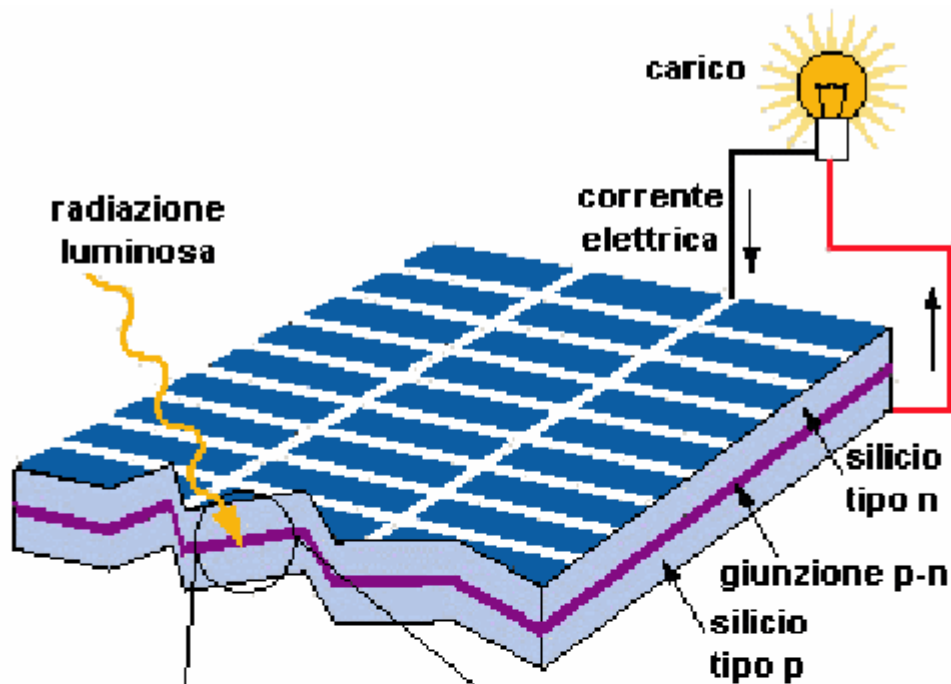
Illuminando la giunzione p-n si generano coppie lacune-elettrone su entrambe le zone n e p.

Il campo elettrico della zona di giunzione separa gli elettroni in eccesso, generati dall'assorbimento della luce, dalle rispettive lacune spingendoli in direzioni opposte e creando una corrente.

Una volta attraversato il campo gli elettroni non tornano più indietro perché il diodo e ne impedisce "l'inversione di marcia".

Fotodiiodo



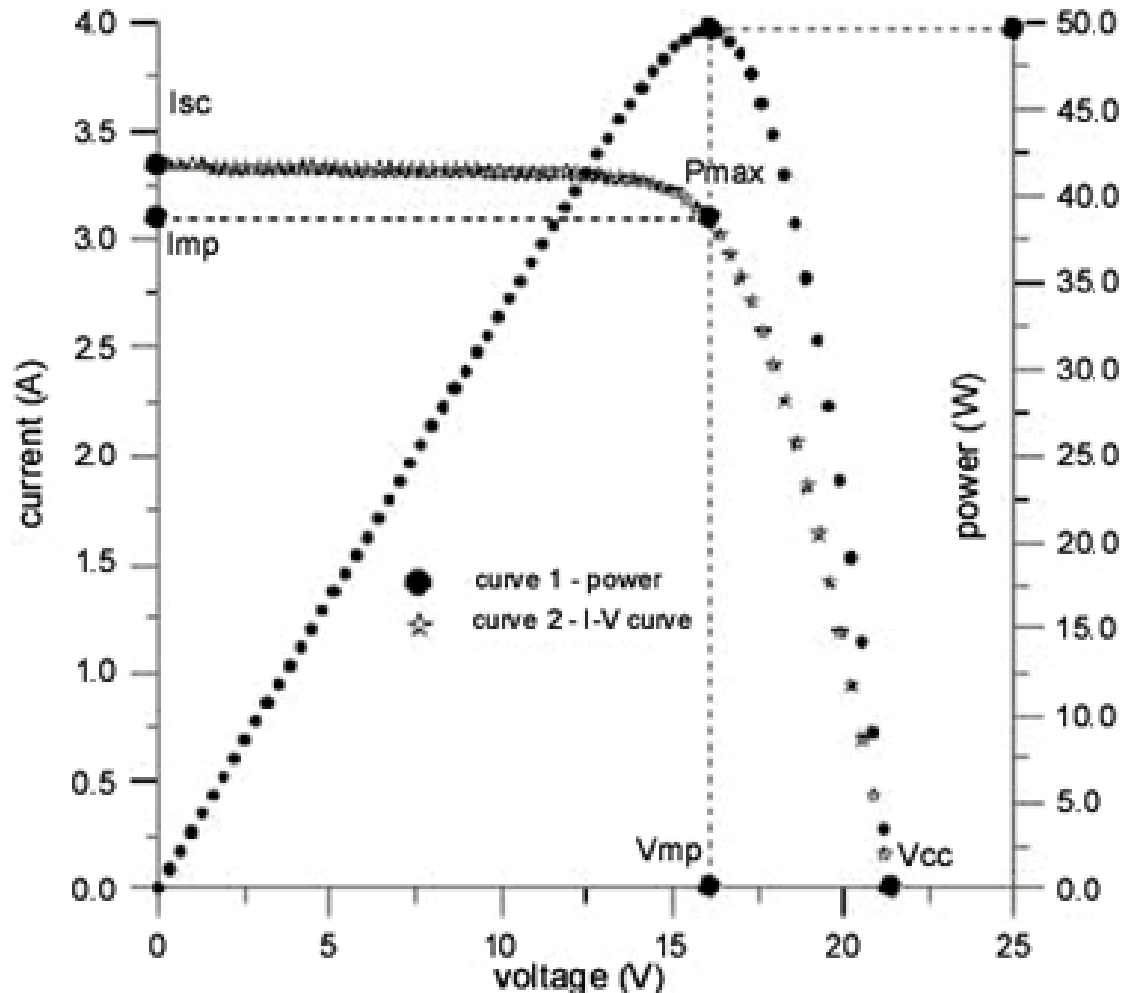


Curva caratteristica di un modulo fotovoltaico

$$P = V \cdot I$$

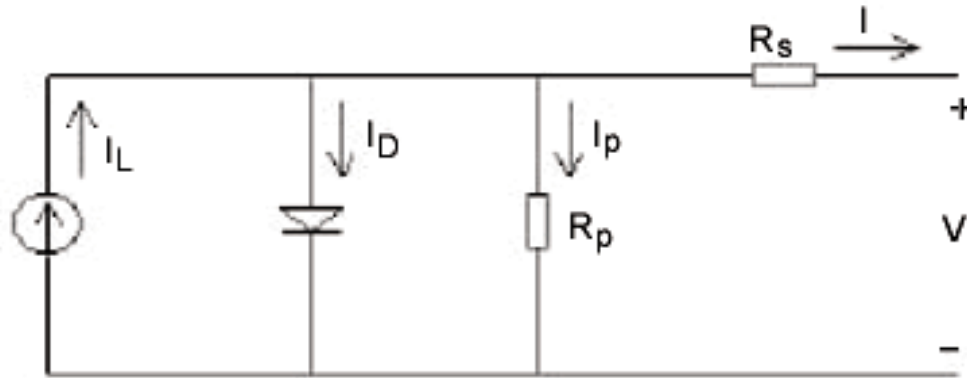
Punto di funzionamento o punto di potenza massima di una cella

Il regime di funzionamento di una cella è quello in cui essa fornisce *potenza massima* : questo accade ad un certo voltaggio V_{mp} a cui corrisponde una certa corrente I_{mp} .



Quindi data una cella avente una *caratteristica V-I*, il carico a cui essa fornisce potenza massima è $P_{max} = V_{mp}/I_{mp}$

Circuito equivalente di una cella solare a silicio monocristallino di una cella solare quando ad essa è applicato un carico



$$I = I_L - I_D - I_p = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(V + IR_S)}{NmKT_{cel}} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_p}$$

I corrente in uscita

I_L fotocorrente

I_D corrente del diodo

I_p corrente di perdita

I_0 corrente inversa di saturazione

N numero di celle in serie (30-36 ad unità)

m fattore di idealità del diodo (tra 1 e 2)

K costante di Boltzman

T_{cel} temperatura della cella

e carica dell'elettrone

V tensione della cella

R_S resistenza in serie

R_p resistenza di scambio

$$I(V) = I_{sc} - I_{dark}(V)$$

$$I(V) = I_{sc} - I_0[\exp(qV/KT) - 1]$$

La quantità di energia solare trasformata in energia elettrica da un modulo fotovoltaico dipende dall'irraggiamento, dalla distribuzione spettrale e dalla temperatura delle celle. Per stabilire una base di confronto tra i diversi moduli si usano degli standard accettati internazionalmente che permettano di determinare le curve I-V :

Irraggiamento = 1000 W/m²

Temperature delle celle = 25 °C

Distribuzione spettrale = AM 1.5

Comunque le celle non in realtà non lavorano in condizioni standard. Pertanto si sono formulate delle condizioni normali di lavoro che presentano i seguenti valori:

Irraggiamento = 800 W/m²

Temperatura ambiente = 20 °C

velocità del vento = 1 m/s

Distribuzione spettrale = AM 1.5

Per una cella fotovoltaica si definiscono:

Fattore di riempimento o Fill Factor (FF):

$$FF = (I_{mp} V_{mp}) / (I_{sc} V_{oc})$$

L'efficienza cella:

$$\eta = I_{mp} V_{mp} / P_s$$

dove P_s è la potenza della luce solare incidente

L'efficienza si può esprimere in funzione del FF:

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

I 4 parametri: I_{sc} , V_{oc} , FF , η sono le caratteristiche chiavi della performance di una cella

Rendimenti di alcuni tipi di celle.

Materiale semiconduttore	Rendimento teorico massimo [%]
Germanio	13
Solfuro di cadmio	18
Silicio	25
Tellurio di cadmio	25
Fosfuro di indio	26
Arseniuro di gallio	27
Antimoniuro di alluminio	27

Silicio monocristallino

è stato ed è ancora è oggi il più usato semiconduttore per le celle fotovoltaiche

Vantaggi: Alta efficienza. Durabilità nel tempo

Svantaggi : Alto costo di preparazione del monocristallo.

Silicio policristallino

Il suo uso nasce dalla necessità di diminuire i costi di crescita del cristallo del Silicio

Vantaggi : più economico economico del Silicio monocristallino.

Svantaggi: perdita di efficienza dovuta a bordi di grano, impurezze e imperfezioni del reticolo

Silicio amorfo

È in assoluto il semiconduttore più economico ma anche il più scadente. La sua tecnica di produzione è molto semplice perché consiste in una deposizione su lastre di vetro o metalliche.

Gli svantaggi del silicio amorfo sono gli stessi del Silicio policristallino però più accentuati.

Tecniche di produzione del Silicio

Silicio monocristallino: Processo Czochralski e metodo del floating zone



Processo Czochralski

Il processo consiste nel sollevamento verticale a bassissima velocità di un *seme monocristallino di silicio*, immerso inizialmente per pochi millimetri in un crogiolo contenente silicio puro fuso. Il seme monocristallino è, in pratica, una bacchetta con sopra un sottile strato di silicio in forma monocristallina.

Gli atomi di silicio fuso, a contatto con il *seme monocristallino*, si orientano secondo il reticolo atomico della struttura del silicio;

La temperatura del silicio nel crogiolo è mantenuta di pochi gradi superiore a quella di fusione (1414 °C), e aderendo al *seme monocristallino*, che gradualmente viene estratto dalla massa fusa, si solidifica molto rapidamente conservando la struttura monocristallina del *seme* a cui aderisce.

Il controllo rigoroso della temperatura del materiale fuso, dell'atmosfera nella camera, e della velocità di estrazione, nonché assenza assoluta di vibrazioni, consente la produzione di *fusi* perfettamente cilindrici e altamente puri.

L'operazione successiva consiste nel tagliare il *fuso* tramite un disco diamantato, ottenendo i dischi con spessore di pochi decimi di millimetro chiamati wafer;

i Wafer costituiranno quindi il supporto (substrato) per i diversi dispositivi elettronici. Dato che la quantità di dispositivi ricavabili da una singola fetta è proporzionale al suo diametro, col tempo si è cercato di realizzare *fusi* con diametro sempre maggiore.

Attualmente si realizzano *fusi* con un diametro di circa 30 centimetri. Un cristallo di Si prodotto con il metodo Czochralski si indica con CZ