

Dispositivi elettronici

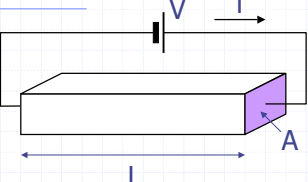
I semiconduttori

Sommario

Richiami sui semiconduttori

conduttori, isolanti e semiconduttori
bande di energia
droganti nei semiconduttori
corrente di deriva e diffusione

Conduttori, isolanti e semiconduttori



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

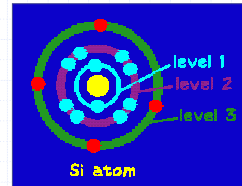
Resistività
$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} [\Omega \cdot \text{cm}]$$

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.

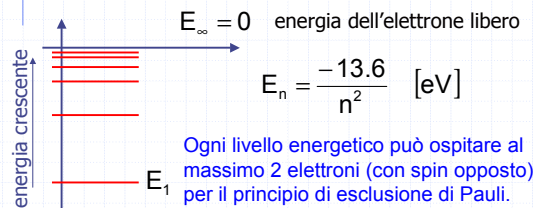


Modello a Bande

Atomo Idrogenoide

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

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

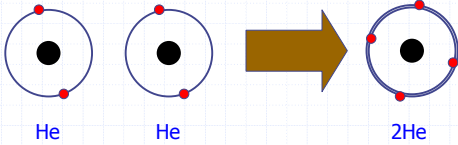


Modello a Bande

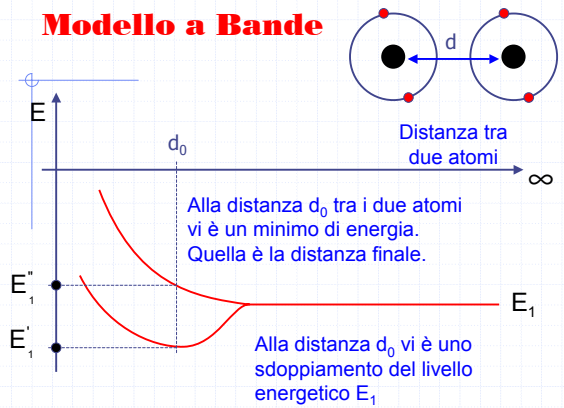
Pensiamo di avvicinare due atomi di He ($2e$, $2p$, $2n$).

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:

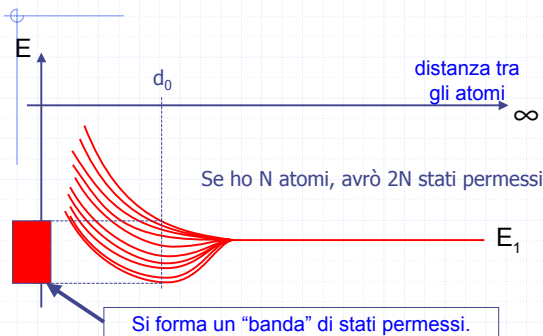


Modello a Bande

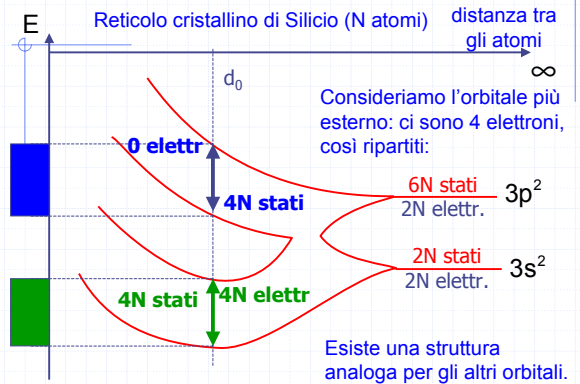


Modello a Bande

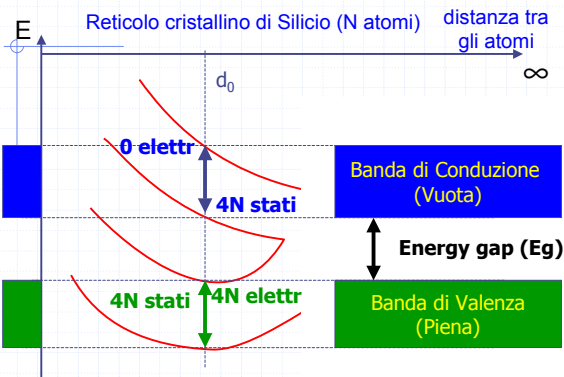
Avviciniamo ora N atomi:



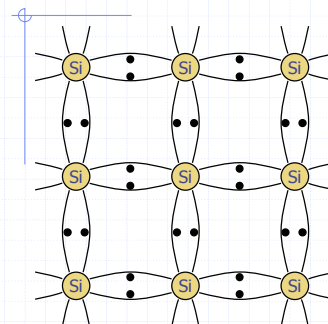
Modello a Bande



Modello a Bande



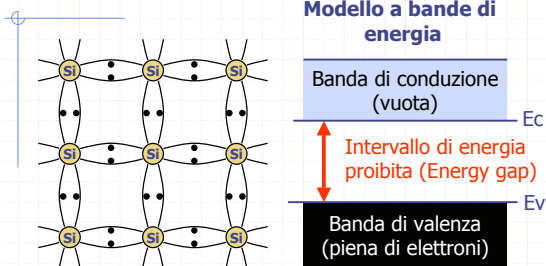
Cristallo di silicio (a $T=0$ K)



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

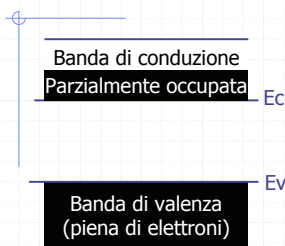
In questo modo ogni atomo completa l'orbitale esterno (con 8 elettroni)

Cristallo di silicio (a $T=0\text{ K}$)



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

Metalli



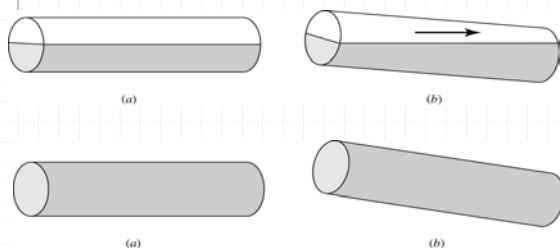
Per avere conduzione (movimento di cariche) ci devono essere livelli energetici liberi e la possibilità di raggiungerli.

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

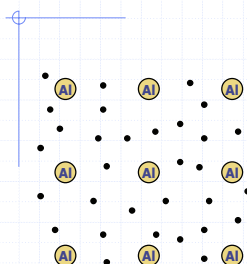
Se si applica una piccola differenza di potenziale, si ha circolazione di corrente.

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.

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.

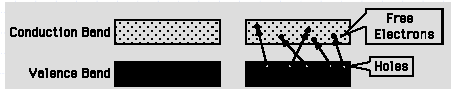
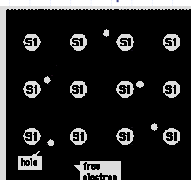
Concetto di gas elettronico.

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

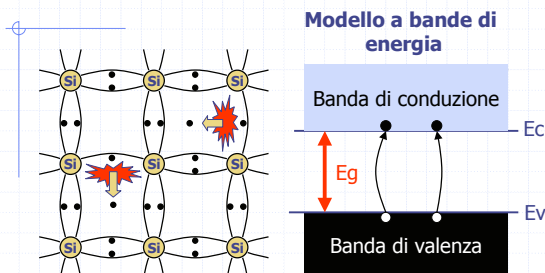
Semiconduttori intrinseci

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**.



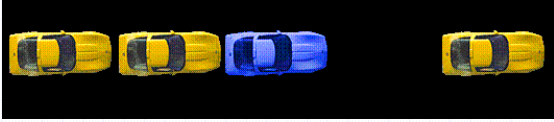
Cristallo di silicio



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!



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

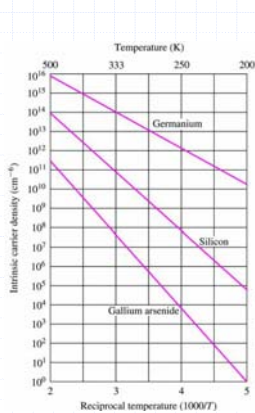
10^{10} elettroni/cm³.

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

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

$$n = p = n_i$$

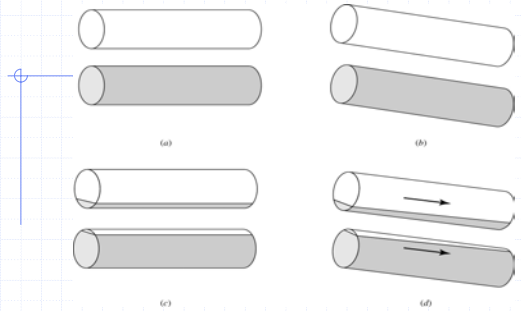


◆ $n = \text{densità di elettroni}$ (elettroni/cm³) $n = n_i$ per un materiale intrinseco.

◆ $n_i^2 \approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ per Si

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

	B (K ⁻³ ·cm ⁶)	E_g (eV)
Si	1.08×10^{31}	1.12
Ge	2.31×10^{30}	0.66
GaAs	1.27×10^{29}	1.42



Analogia tra semiconduttore e fluido.

(a) e (b) Nessun movimento netto di fluido avviene in caso di contenitore vuoto o completamente pieno.

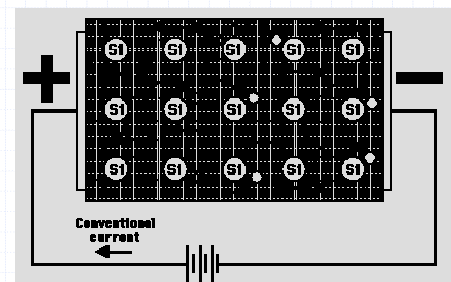
(c) e (d) Si ha movimento di fluido nel caso in cui una parte del fluido del contenitore inferiore sia stata spostata in quello superiore.

Materiali Semiconduttori

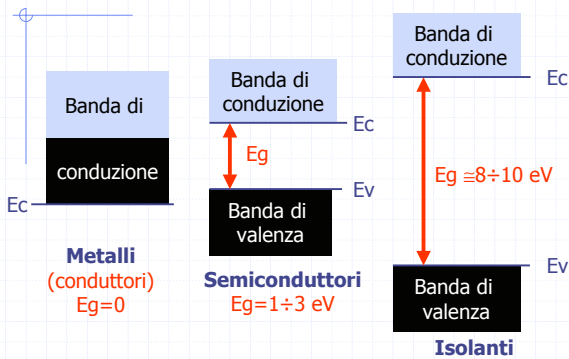
Semiconductor	Bandgap Energy E_g (eV)
Carbon (diamond)	5.47
Silicon	1.12
Germanium	0.66
Tin	0.082
Gallium arsenide	1.42
Gallium nitride	3.49
Indium phosphide	1.35
Boron nitride	7.50
Silicon carbide	3.26
Cadmium selenide	1.70

	IIIA	IVA	VA	VIA
5	B Boron	C Carbon	N Nitrogen	O Oxygen
13	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
30	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic
48	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony
80	Hg Mercury	Tl Thallium	Pb Lead	Bi Bismuth
				Po Polonium

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

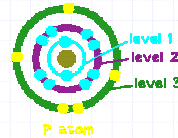


Conduttori, Semiconduttori e Isolanti



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

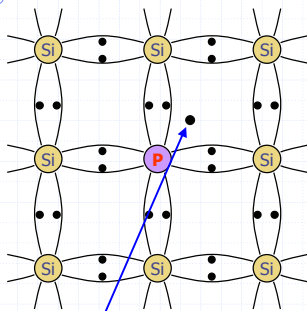
(5 elettroni di valenza) fornisce 1 elettrone aggiuntivo (**donatore**). Drogaggio di tipo n



BORO

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

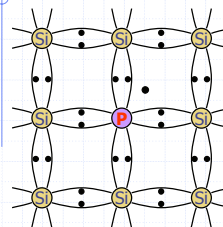
Silicio drogato "tipo n" Con atomi "donatori"



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),

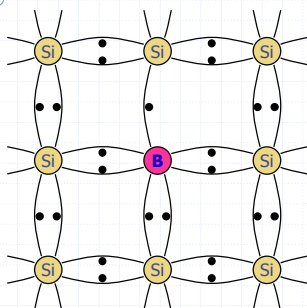
Gli atomi del **V** gruppo donano un elettrone e per questo vengono detti: **"donatori"**

Silicio drogato "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 $n \approx N_D$

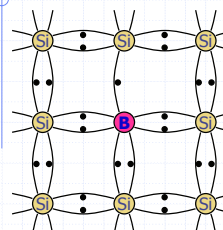
Silicio drogato "tipo p" Con atomi "accettori"



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"**

Silicio drogato "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 $p \approx N_A$

Generazione/Ricombinazione

Legge dell'azione di massa

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: $R = n \cdot p \cdot f_2(T)$

Generazione/Ricombinazione in equilibrio

All'equilibrio termodinamico, i tassi di generazione (**G**) e ricombinazione (**R**) si equivalgono

$$G = R \Rightarrow n \cdot p = \frac{f_1(T)}{f_2(T)} = f(T)$$

In un semiconduttore intrinseco $n_i = p_i$, quindi:

$$n_i \cdot p_i = n_i^2 = f(T)$$

Di conseguenza anche per i semiconduttori estrinseci (drogati) vale:

$$n \cdot p = n_i^2$$

Legge dell'azione di massa

Silicio drogato

Semiconduttore tipo "n": $n \cong N_D$

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

Esempio:

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

Semiconduttore tipo "p": $p \cong N_A$

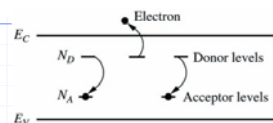
$$n = \frac{n_i^2}{p} \cong \frac{n_i^2}{N_A}$$

Esempio:

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

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

COMPENSAZIONE



Un semiconduttore compensato ha sia drogante di tipo-n che di tipo-p. Se $N_D > N_A$ gli elettroni forniti dagli atomi donori andranno ad occupare le lacune associate agli atomi accettori; gli elettroni rimanenti, in concentrazione $N_D - N_A$, a temperatura ambiente si troveranno in banda di conduzione.

COMPENSAZIONE

- ◆ Se $N_D > N_A$, il materiale è di tipo-n.
Se $N_A > N_D$, il materiale è di tipo-p.
- ◆ I portatori (elettroni o lacune) presenti in concentrazione maggiore si dicono **portatori maggioritari**, gli altri si dicono **portatori minoritari**.

- ◆ Per la neutralità della carica si ha:

$$q(N_D + p - N_A - n) = 0$$

- ◆ Per la legge dell'azione di massa, all'equilibrio termodinamico, si ha: $pn = n_i^2$

Semiconduttore tipo-n

- ◆ Sostituendo $p = n_i^2/n$ in $q(N_D + p - N_A - n) = 0$ si ottiene: $n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0$.

- ◆ Risolvendo in n:

$$n = \frac{(N_D - N_A) \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{e} \quad p = \frac{n_i^2}{n}$$

- ◆ Per $(N_D - N_A) \gg 2n_i$, $n \approx (N_D - N_A)$.

$$p = \frac{n_i^2}{N_D - N_A}$$

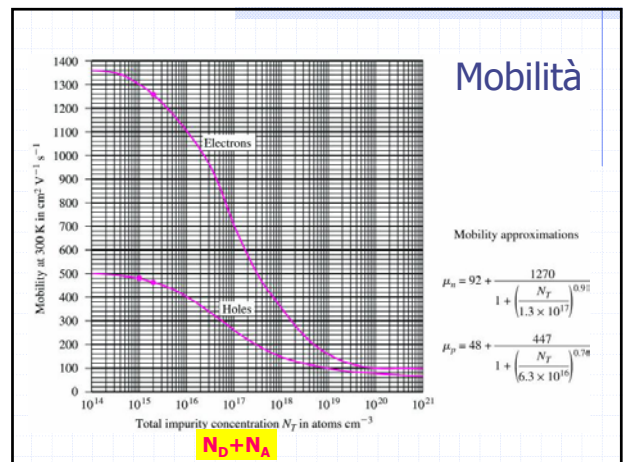
Semiconduttore tipo-p

- ◆ In modo simile si può ottenere la concentrazione di lacune in un semiconduttore di tipo-p (in presenza di entrambe le specie droganti):

$$p = \frac{(N_A - N_D) \pm \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{e} \quad n = \frac{n_i^2}{p}$$

- ◆ Per $(N_A - N_D) \gg 2n_i$, $p \approx (N_A - N_D)$.

$$n = \frac{n_i^2}{N_A - N_D}$$



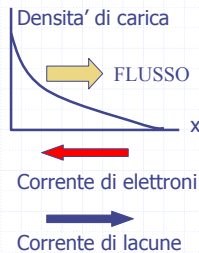
Corrente di Diffusione

(in presenza di un gradiente di concentrazione)

- ◆ Densità di corrente di lacune
"derivata negativa"
carica della lacuna
Diffusività della lacuna
Gradiente (derivata)

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$



Nel caso degli elettroni, il segno è diverso perché la corrente di elettroni ha verso opposto rispetto al loro flusso

Corrente di Deriva

(in presenza di un campo elettrico, E)

- ◆ Velocità $v \propto E$

Velocità delle lacune

Velocità degli elettroni

$$v = \mu_p E$$

$$v = -\mu_n E$$

Campo E
Mobilità
Velocità (cm/s)

Sono velocità medie
Collisioni e urti!!!

$$J_{\text{drift}} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$$

$$J_{\text{drift}} = \sigma E$$

Conducibilità

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \quad \text{Resistività}$$

Si intrinseco vs Si drogato

Silicio intrinseco:

$$n = p = n_i = 1.45 \cdot 10^{10} [\text{cm}^{-3}]$$

$$\rho_{\text{Si}} = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \approx 2 \cdot 10^5 [\Omega \cdot \text{cm}]$$

Silicio tipo "n":

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

$$\rho_{\text{n-Si}} \approx \frac{1}{qn\mu_n} \approx 1.6 \cdot 10^{-2} [\Omega \cdot \text{cm}]$$

Corrente complessiva (I)

$$J_{\text{drift}} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$$

Deriva

$$J_{\text{diffusion}} = q \left(-D_p \frac{dp}{dx} + D_n \frac{dn}{dx} \right)$$

Diffusione

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = V_T$$

Relazione di Einstein
lega la diffusione con la deriva
A temperatura ambiente
 $V_T \approx 25 \text{ mV}$

Corrente complessiva (2):

$$J_{nx}(x) = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

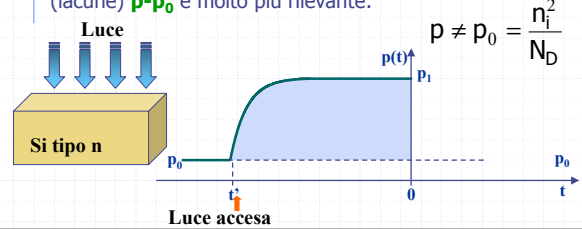
Densità di corrente complessiva di elettroni

$$J_{px}(x) = q\mu_p p(x)E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Densità di corrente complessiva di lacune

Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

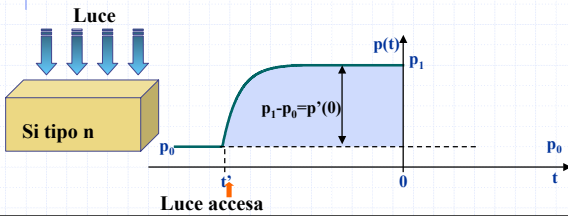
L'illuminazione del semiconduttore di **tipo n** causa la rottura di alcuni legami covalenti con conseguente generazione di coppie elettrone-lacuna. Mentre l'aumento percentuale di cariche maggioritarie (elettroni) è trascurabile (condizione di bassa iniezione, $n \approx n_0 = N_D$), l'aumento di cariche minoritarie (lacune) $p - p_0$ è molto più rilevante:



Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

Dopo un tempo sufficientemente lungo il sistema si trova all'equilibrio con una concentrazione di lacune pari a p_1 . Il tasso di ricombinazione R sarà approssimativamente:

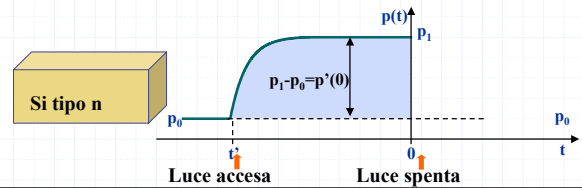
$$R = n \cdot p \cdot f_2(T) \approx N_D \cdot p \cdot f_2(T)$$



Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

All'istante $t=0$ la luce viene spenta: pertanto, il tasso di generazione G torna ad essere funzione solamente della temperatura e pari al valore che G_0 , che era in equilibrio con il tasso di ricombinazione R_0 in condizioni normali:

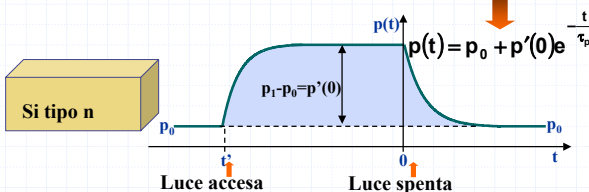
$$G = G_0 = f_1(T) = R_0 = N_D \cdot p_0 \cdot f_2(T)$$



Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

L'evoluzione temporale $p(t)$ della concentrazione di lacune a partire dall'istante $t=0$ è determinata dalla differenza tra i tassi di generazione e ricombinazione:

$$G - R = \frac{dp}{dt} = -N_D \cdot f_2(T) \cdot (p - p_0) = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$$



Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

Dove si è posto:

$$\tau_p = \frac{1}{N_D \cdot f_2(T)}$$

che è la **costante di tempo** di vita delle lacune nel semiconduttore di tipo **n** drogato con N_D donatori.

Analoga definizione si può dare per gli elettroni in un semiconduttore di tipo **p** drogato con N_A accettori.

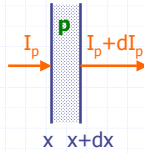
Equazione di Continuità

Si consideri una regione di semiconduttore di tipo **n** di lunghezza **dx** e sezione **A**, con concentrazione **p** di cariche di minoranza. La differenza tra ricombinazione **G** e generazione **R** è:

$$G - R = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$$

Se si considera anche una corrente **I_p** di lacune entrante in **x** ed una corrente **I_p + dI_p** uscente da **x + dx**, si ha una variazione di concentrazione **p** di lacune dovuto alla corrente data da:

$$\frac{1}{A dx} \frac{[I_p - (I_p + dI_p)]}{q} = -\frac{1}{A dx} \frac{dI_p}{q}$$



Equazione di Continuità

La corrente **I_p** è dovuta alla diffusione e alla deriva:

$$I_p = -A q D_p \frac{dp}{dx} + A q p \mu_p E$$

e differenziando:

$$dI_p = -A dx q D_p \frac{d^2 p}{dx^2} + A dx q p \mu_p \frac{dE}{dx} + A dx q E \mu_p \frac{dp}{dx}$$

Sostituendo e sommando gli effetti di **R**, **G** e **I_p**, il tasso di variazione di **p** risulta:

$$\frac{dp}{dt} = D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - p \mu_p \frac{dE}{dx} - E \mu_p \frac{dp}{dx} - \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad \text{Equazione di Continuità}$$

Equazione di Continuità

Analoga equazione vale per le cariche **n** in un semiconduttore di tipo **p**.

Si considerano due casi importanti:

A – Concentrazione uniforme senza campo elettrico

In questo caso **dE/dx=0** e **d²p/dx²=0**. L'equazione di continuità si riduce a:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$$

L'integrale è:

$$p - p_0 = (p_1 - p_0) e^{-t/\tau_p}$$

Una concentrazione iniziale **p₁** si porta verso l'equilibrio con una costante di tempo **τ_p**.

Equazione di Continuità

B – Concentrazione indipendente da t e campo elettrico nullo

In questo caso **dp/dt=0** e **dE/dx=0**. L'equazione di continuità si riduce a:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_0}{D_p \tau_p}$$

L'integrale è:

$$p - p_0 = A_1 e^{-x/L_p} + A_2 e^{x/L_p}$$

Dove **A₁** e **A₂** dipendono dalle condizioni al contorno e si definisce la **lunghezza di diffusione**:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$