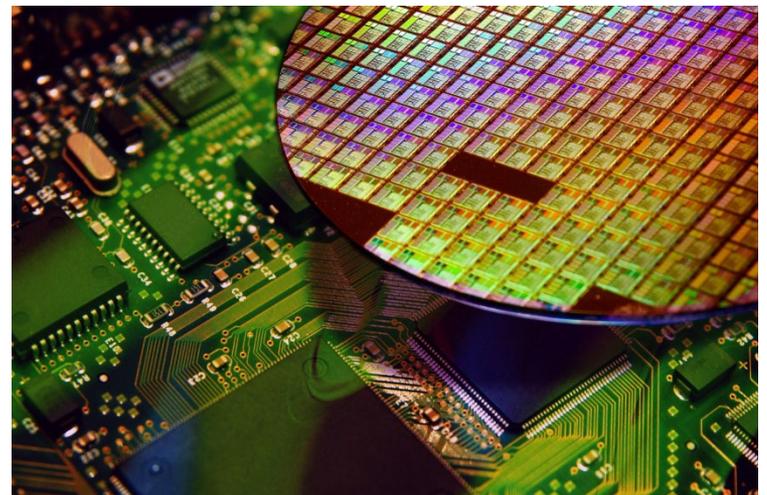


# DISPOSITIVI ELETTRICI A SEMICONDUTTORE

---

Marco Panareo

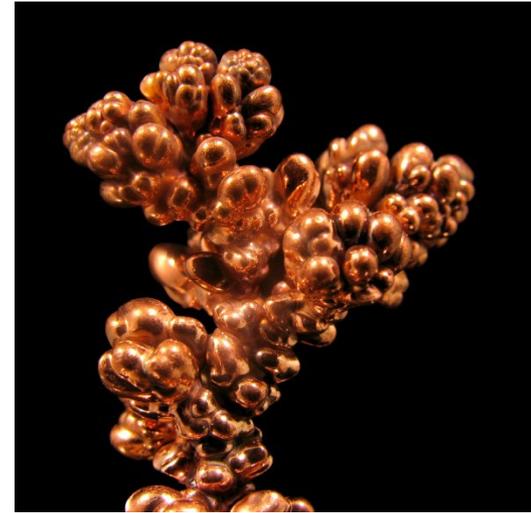


# Materiali semiconduttori

- In elettronica risulta utile poter controllare con la tensione applicata ad una coppia di morsetti di ingresso (o con la relativa corrente) la corrente che attraversa una coppia di morsetti di uscita.
- A tale scopo occorre disporre di materiali non isolanti, in modo che possano essere percorsi da corrente, ma neanche fortemente conduttori, in modo da poter gestire il flusso di cariche che li attraversano.
- Pertanto è necessario adoperare materiali dei quali si possa controllare la conducibilità.
- Questi materiali sono denominati *semiconduttori*.
- L'approccio seguito per l'esame del funzionamento di alcuni dispositivi a semiconduttore prescindereà dalla meccanica quantistica in quanto esula dal contesto di questa trattazione

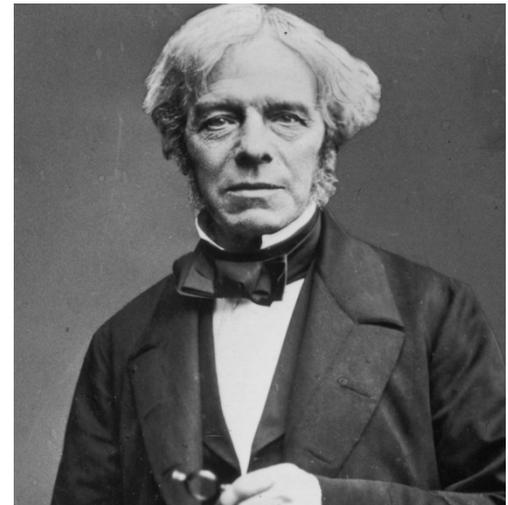
# Esempio

- La conducibilità del rame è circa  $6 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  mentre quella del quarzo è compresa tra  $10^{-17} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  e  $10^{-18} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$
- pertanto la corrente che fluisce attraverso un cubetto di rame, per effetto di un'opportuna differenza di potenziale, è circa  $10^{25} \div 10^{26}$  volte maggiore della corrente che attraversa un uguale cubetto di quarzo sotto le stesse condizioni.
- In un semiconduttore la conducibilità assume un valore intermedio tra quello dei buoni conduttori e quello degli isolanti



# Storia

- Il termine semiconduttore fu introdotto nel 1782 da A. Volta per descrivere una classe di materiali con caratteristiche intermedie tra i conduttori e gli isolanti.
- Tuttavia la prima osservazione documentata di un effetto dovuto al fenomeno della semiconduttività si deve a M. Faraday il quale, nel 1833, notò che alcuni composti non metallici, come il solfuro d'argento ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), tendono a diventare migliori conduttori di elettricità alle alte temperature, a differenza di quanto avviene nei comuni metalli.



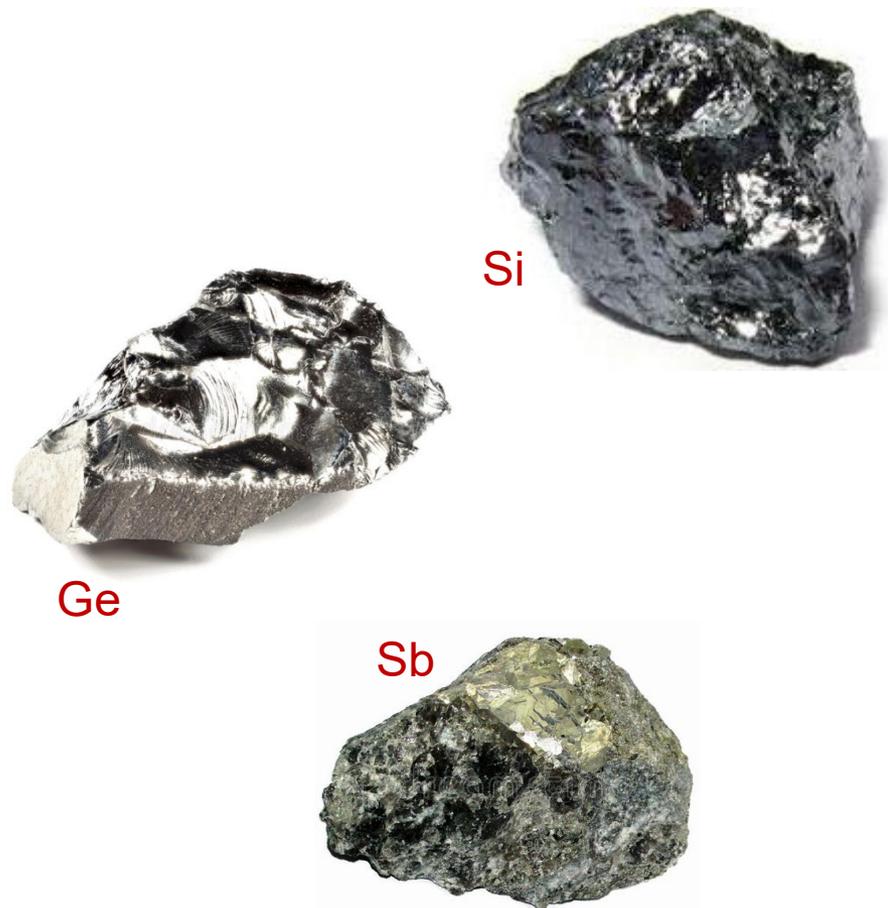
# Storia

- A parte una generica classificazione delle proprietà conduttive di differenti materiali, questi studi non condussero a particolari progressi per i successivi quaranta anni.
- Importanti sviluppi si ebbero tra il 1873 e il 1879, quando Karl Ferdinand Braun osservò le proprietà rettificatrici del solfuro di piombo, comunemente detto *galena*, cioè la forte dipendenza della resistività dalla direzione del flusso della corrente, e Willoughby Smith scoprì il fenomeno della fotoconduzione, ovvero la variazione della conducibilità elettrica indotta dalla luce.
- Infine, con la scoperta dell'effetto Hall, nel 1879, si rese disponibile un potente metodo di indagine sperimentale del processo della conduzione elettrica.



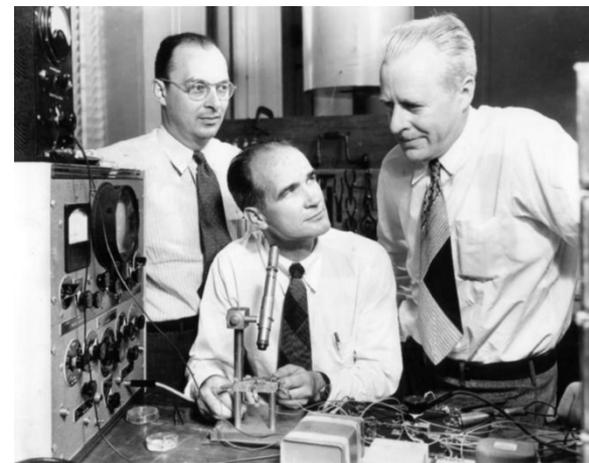
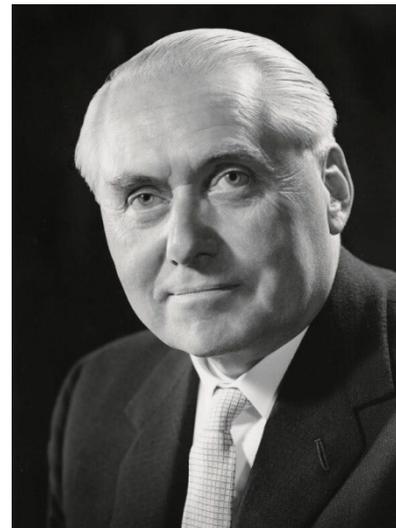
# Storia

- Questi fenomeni vennero originariamente considerati quali specifiche prerogative di pochi elementi, quali il germanio, il silicio e l'antimonio (Ge, Si, Sb), o di composti come il solfuro di piombo, l'ossido di rame e il carburo di silicio ( $\text{PbS}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{SiC}$ ).
- Tuttavia la dipendenza del comportamento elettrico da fattori diversi, come la composizione chimica, la presenza di impurezze, i trattamenti termici subiti, ecc. ne rese complesso lo studio sistematico.



# Storia

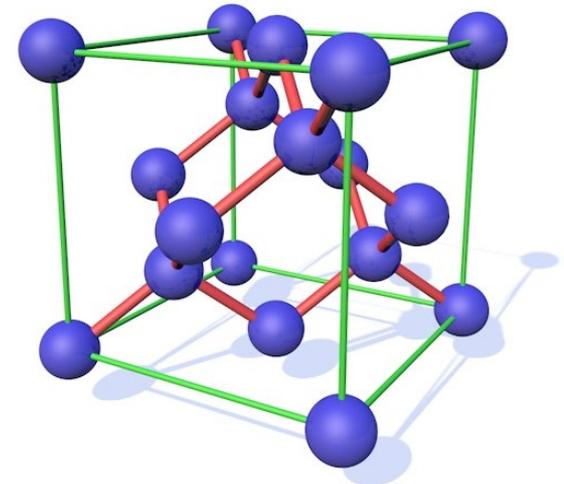
- L'applicazione della meccanica quantistica allo studio dei solidi, attraverso la teoria delle bande di livelli elettronici, dovuta ad Alan Herries Wilson nel 1931, stabilì le basi per la comprensione della natura dei processi attraverso i quali si manifestano le proprietà elettriche ed ottiche dei materiali semiconduttori.
- Gli importanti lavori condotti al Bell Laboratory di Murray Hill, USA, principalmente condotti da John Bardeen, Walter Houser Brattain e William Bradford Shockley alla metà del XX secolo, condussero a nuovi criteri utili per classificare questi materiali, oltre che ad importanti invenzioni tecnologiche, quali il transistor a giunzione nel 1948.



# Conduzione nei materiali semiconduttori

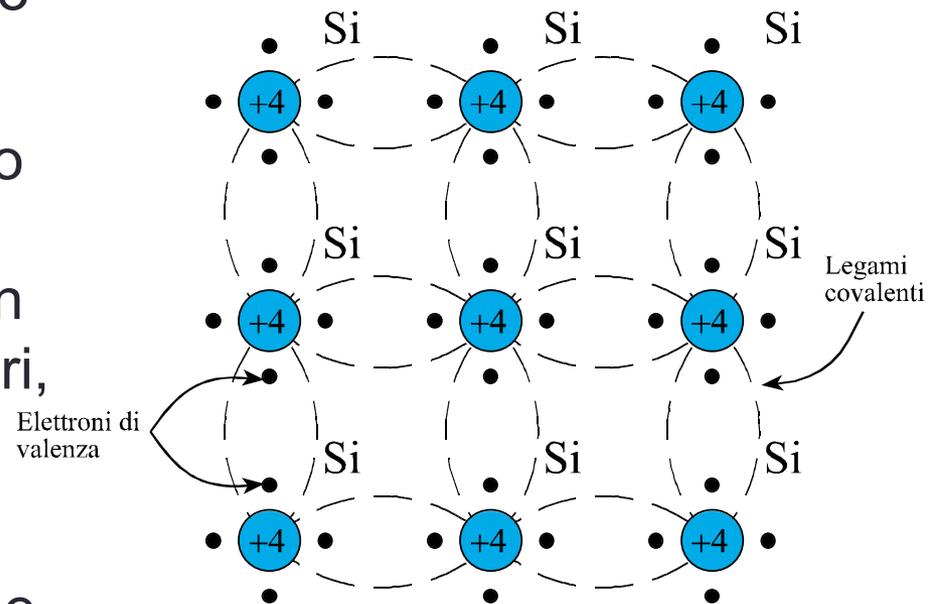
- Sia il silicio che il germanio sono elementi *tetravalenti*, ossia posseggono quattro elettroni sull'orbita atomica più esterna, detti *elettroni di valenza*.
- Per motivi di carattere energetico risulta favorita la configurazione in cui ogni atomo completa la sua orbita esterna con otto elettroni, ciò può essere ottenuto nel silicio attraverso la condivisione di ciascun elettrone di valenza con quattro atomi adiacenti per formare un *legame covalente*.

		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA		
		5	6	7	8	9	10		
		B	C	N	O	F	He		
		10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	4.003		
		13	14	15	16	17	18		
		Al	Si	P	S	Cl	Ar		
		26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	39.948		
IB	IIB	29	30	31	32	33	34	35	36
		Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
		63.54	65.37	69.72	72.59	74.922	78.96	79.909	83.80
		47	48	49	50	51	52	53	54
		Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
		107.870	112.40	114.82	118.69	121.75	127.60	126.904	131.30
		79	80	81	82	83	84	85	86
		Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
		196.967	200.59	204.37	207.19	208.980	(210)	(210)	(222)



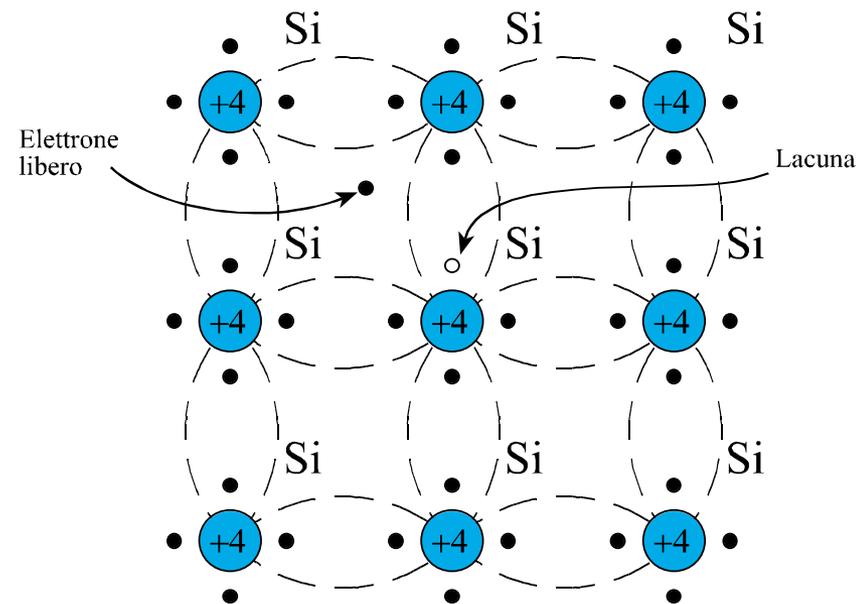
# Conduzione nei materiali semiconduttori

- In figura è mostrata una rappresentazione bidimensionale del reticolo cristallino del silicio (o del germanio).
- A temperature prossime allo zero assoluto il cristallo si comporta secondo lo schema di figura: non essendoci portatori di carica liberi, il materiale agisce da isolante.
- Alla temperatura d'ambiente, tuttavia, per effetto dell'agitazione termica alcuni legami possono essere rotti e la conduzione si rende possibile.

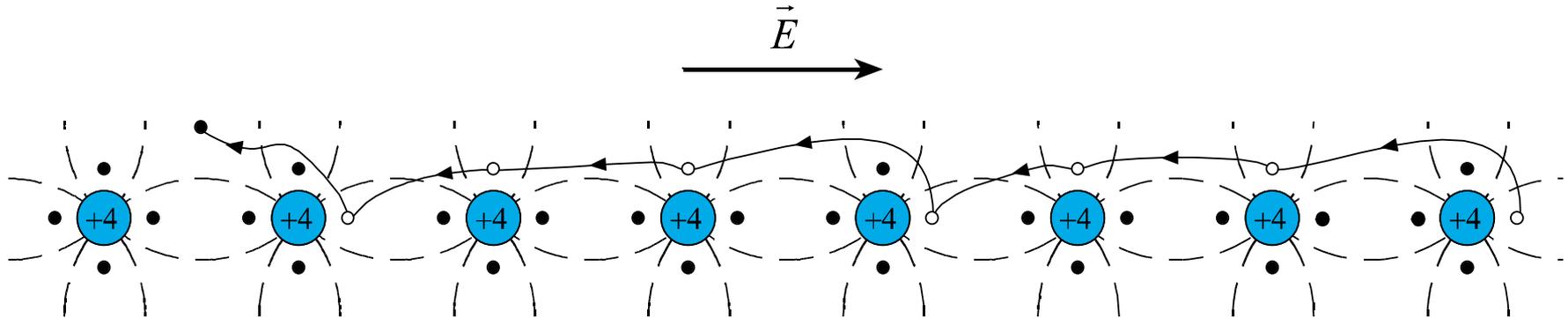


# Conduzione nei materiali semiconduttori

- L'energia necessaria per rompere un legame covalente è di circa  $1.1\text{eV}$  per il silicio e  $0.72\text{eV}$  per il germanio.
- Alla rottura del legame si formano un elettrone libero e una vacanza, detta *lacuna*, nel posto occupato dall'elettrone prima della rottura del legame.
- Entrambi, costituendo portatori di carica, contribuiscono alla conduzione elettrica del cristallo.



# Conduzione nei materiali semiconduttori



- La lacuna può essere riempita da un elettrone di valenza di un atomo contiguo che si svincola dal suo legame covalente;
- tale elettrone lascia una nuova lacuna nel posto liberato così, questo effetto corrisponde in pratica al moto della lacuna nella direzione opposta a quella dell'elettrone

# Conduzione nei materiali semiconduttori

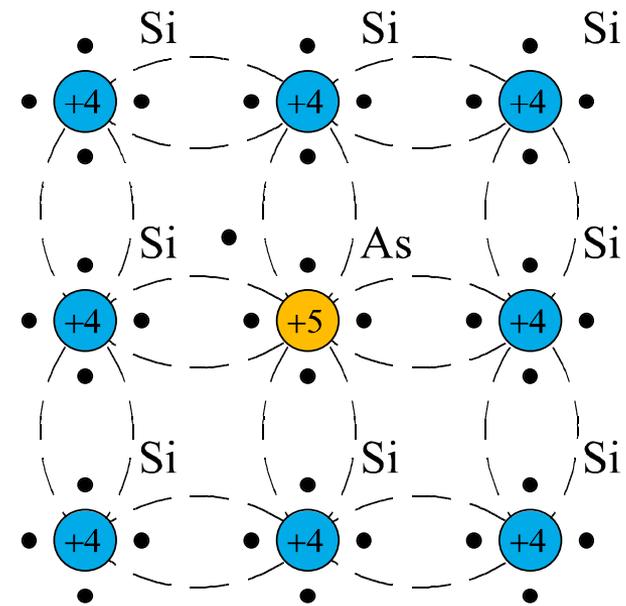
- Pertanto, nei materiali semiconduttori si hanno due tipi di portatori,
  - gli *elettroni*;
  - le *lacune*;
- in un semiconduttore privo di impurezze il numero di elettroni è pari a quello delle lacune ed in tale circostanza il semiconduttore è detto *intrinseco*.
- Il numero medio di portatori di carica per unità di volume si chiama *concentrazione* e si indica con  $n$  per gli elettroni e con  $p$  per le lacune.
- Per effetto dell'agitazione termica, in un semiconduttore intrinseco si generano continuamente coppie elettrone-lacuna e il tasso di produzione di coppie è pari a quello delle ricombinazioni, pertanto in un semiconduttore intrinseco risulta  $n = p$ .
- Il comune valore della concentrazione di elettroni o lacune in un semiconduttore intrinseco è detto *concentrazione intrinseca*  $n_i$ , tale grandezza soddisfa la relazione di proporzionalità:

$$n_i \propto T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

- in cui  $T$  è la temperatura assoluta e  $E_g$  è l'energia necessaria alla rottura del legame covalente.
- Questa espressione conferma che per temperature prossime allo zero ( $0 K$ ), non essendoci portatori di carica disponibili, il semiconduttore agisce da isolante.

# Semiconduttori drogati – tipo *n*

- Aggiungendo al silicio (o germanio) puro piccole quantità di impurezze pentavalenti, alcuni degli atomi del reticolo vengono sostituiti da quelli delle impurezze;
- di questi, quattro dei cinque elettroni di valenza formano legami covalenti con gli atomi circostanti mentre il quinto elettrone risulta debolmente legato all'atomo, in quanto sono sufficienti 0.05 eV per il silicio e 0.01 eV per il germanio affinché tale elettrone si renda libero e disponibile per la conduzione.
- Generalmente per questo tipo di drogaggio si adoperano impurezze pentavalenti come fosforo, arsenico o antimonio e sono denominate impurezze *donatrici*.



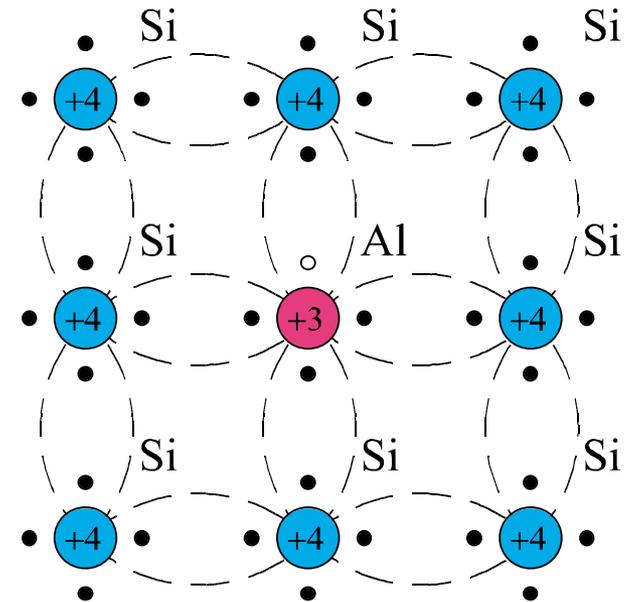
	13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	
5	B Boron 10.811	C Carbon 12.011	N Nitrogen 14.007	O Oxygen 15.999	
12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	
30	Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.972
48	Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6
80	Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [209]
112	Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]

# Semiconduttori drogati – tipo *n*

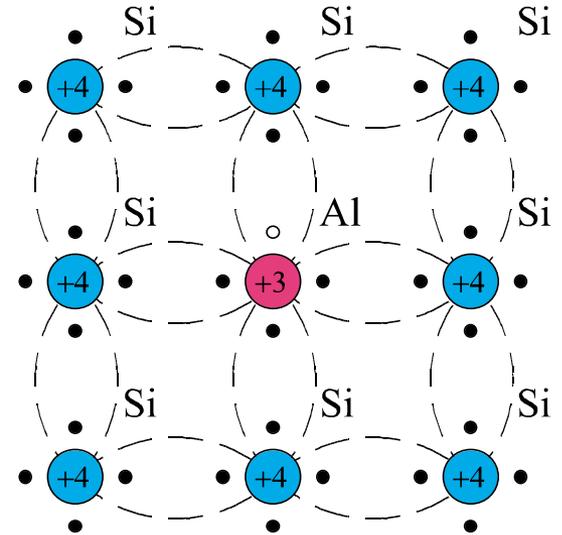
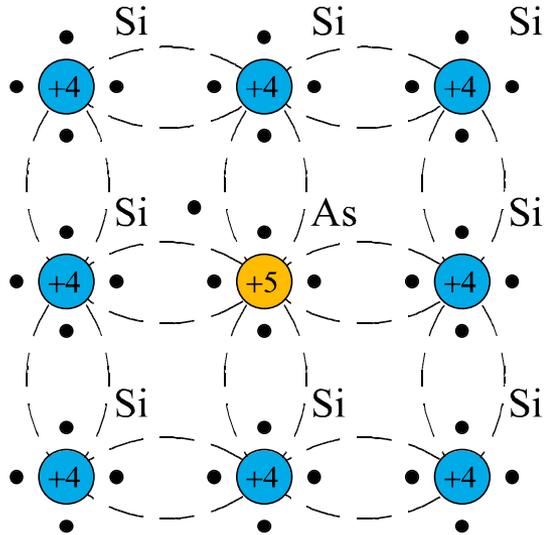
- L'atomo pentavalente donatore, dopo aver ceduto l'elettrone, resta immobilizzato nel reticolo e non contribuisce alla conduzione.
- Il drogaggio di un semiconduttore con impurezze donatrici, oltre a far aumentare il numero di elettroni liberi, fa diminuire il numero di lacune libere al di sotto del valore che si ha nel semiconduttore intrinseco; ciò in quanto, in presenza di un maggior numero di elettroni, aumenta la probabilità che questi si ricombinino con le lacune prodotte per causa termica.
- Il semiconduttore così drogato è detto di **tipo *n***

# Semiconduttori drogati – tipo *p*

- Aggiungendo al semiconduttore intrinseco impurezze trivalenti, dette *accettrici*, come boro, alluminio, gallio o indio, solo tre dei legami covalenti si formano con gli atomi circostanti, per cui l'assenza del quarto legame corrisponde alla presenza di una lacuna in tale posizione.
- L'atomo accettore può, quindi, catturare un elettrone rimanendo immobilizzato nel sito e non contribuendo alla conduzione.
- In questo tipo di drogaggio, oltre ad aumentare il numero di lacune disponibili alla conduzione, diminuisce il numero di elettroni, poiché aumenta la probabilità che questi si ricombinino con le lacune presenti.
- Il semiconduttore così drogato è detto di *tipo p*



	13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A
5	B Boron 10.811	C Carbon 12.011	N Nitrogen 14.007	O Oxygen 15.999
13	Al Aluminum 26.982	Si Silicon 28.086	P Phosphorus 30.974	S Sulfur 32.066
30	Zn Zinc 65.38	Ga Gallium 69.723	Ge Germanium 72.631	As Arsenic 74.922
48	Cd Cadmium 112.411	In Indium 114.818	Sn Tin 118.710	Sb Antimony 121.760
80	Hg Mercury 200.592	Tl Thallium 204.383	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 208.980
112	Cn Copernicium [285]	Nh Nihonium [286]	Fl Flerovium [289]	Mc Moscovium [289]
				116 Lv Livermorium [293]



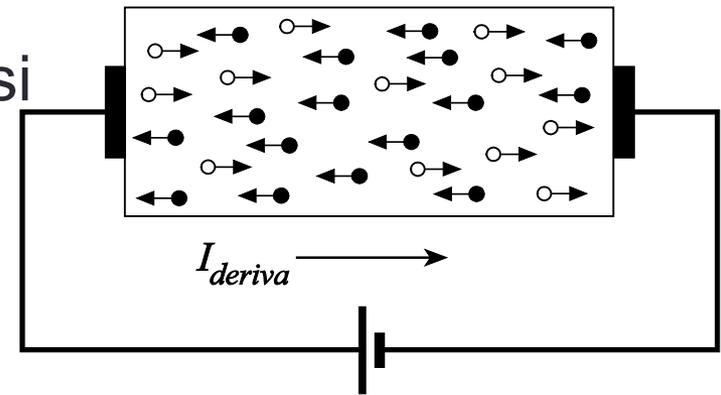
- In un semiconduttore drogato di **tipo  $n$**  ci sarà un numero di elettroni superiore rispetto al semiconduttore intrinseco e, per conseguenza, il numero di lacune libere risulterà inferiore rispetto a quello proprio del semiconduttore intrinseco
- In un semiconduttore drogato di **tipo  $p$**  ci sarà un numero di lacune superiore rispetto al semiconduttore intrinseco e, per conseguenza, il numero di elettroni liberi risulterà inferiore rispetto a quello proprio del semiconduttore intrinseco
- Per effetto del drogaggio la concentrazione delle cariche libere passa dall'ordine di  $10^{10}$  per  $\text{cm}^3$  nel semiconduttore intrinseco a quello di  $10^{17}$  per  $\text{cm}^3$  in quello drogato. Corrispondentemente la resistività passa dall'ordine di  $60\text{k}\Omega \times \text{cm}$  a quello di  $1\Omega \times \text{cm}$ .

# Corrente di deriva

- Supponiamo di applicare un campo elettrico  $\vec{E}$  ad una barretta di semiconduttore drogato uniformemente;
- sotto l'azione del campo le cariche si sposteranno ordinatamente, determinando una corrente, detta **corrente di deriva**, la cui densità vale, in generale:

$$\vec{J}_{deriva} = -ne\vec{v}_n + pe\vec{v}_p = (-n\vec{v}_n + p\vec{v}_p)e$$

- dove  $e$  è la carica dell'elettrone e  $\vec{v}_n$  e  $\vec{v}_p$  sono, rispettivamente, la velocità di deriva degli elettroni e delle lacune.



# Corrente di deriva

- Queste velocità risultano proporzionali al campo elettrico applicato secondo le relazioni:

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E}$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{E}$$

- in cui i coefficienti di proporzionalità  $\mu_n$  e  $\mu_p$  si chiamano *mobilità*. Sostituendo queste espressioni nella relazione precedente si ottiene:

$$\vec{J}_{deriva} = (n\mu_n + p\mu_p) e \vec{E}$$

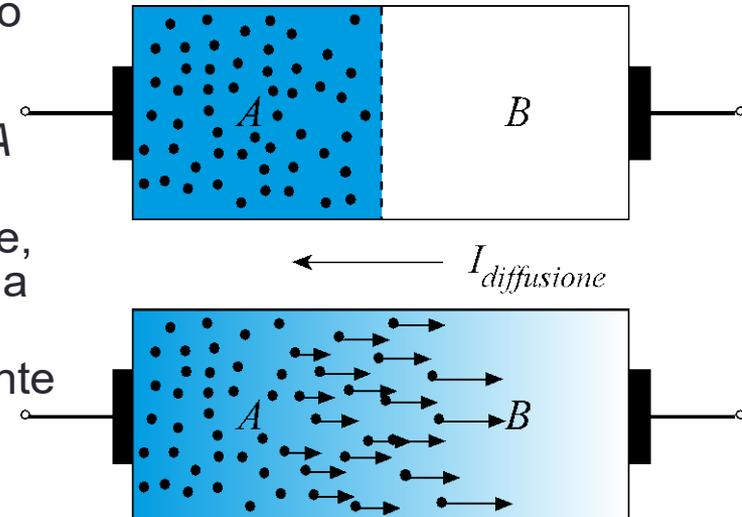
- quindi, dalla legge di Ohm segue che la conducibilità del semiconduttore vale:

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p) e$$

- Poiché gli elettroni sono sostanzialmente liberi di muoversi all'interno del materiale mentre le lacune sono vincolate a spostarsi lungo gli assi cristallografici, in generale risulta  $\mu_n > \mu_p$ .

# Corrente di diffusione

- Consideriamo la barretta di semiconduttore drogato di figura e supponiamo che in un certo istante la concentrazione di cariche al suo interno non sia uniforme, ad esempio sia maggiore nella regione *A* rispetto alla regione *B*.
- In tale condizione si originerà un moto delle cariche, e quindi una corrente, che le porterà nella regione a minore concentrazione.
- Questo effetto, di natura statistica, è sostanzialmente analogo a quello che si verifica in un gas elettricamente neutro, contenuto in un involucro in cui esista un gradiente di concentrazione.



- La corrente che si determina per questo effetto è detta **corrente di diffusione** e si arresta quando la concentrazione di cariche all'interno del semiconduttore è diventata uniforme.
- In generale, la densità di corrente di diffusione dovuta sia alle lacune che agli elettroni è data dall'espressione

$$\vec{J}_{diffusione} = e(D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p)$$

- in cui  $D_n$  e  $D_p$  sono dette **costanti di diffusione** rispettivamente, per gli elettroni e per le lacune.

# Corrente di diffusione

- Tali costanti sono legate alla mobilità, attraverso la relazione trovata da Albert Einstein nel 1905 nell'ambito di uno studio sul moto browniano e riscoperta indipendentemente l'anno successivo dal fisico austriaco Marian Smoluchowski:

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

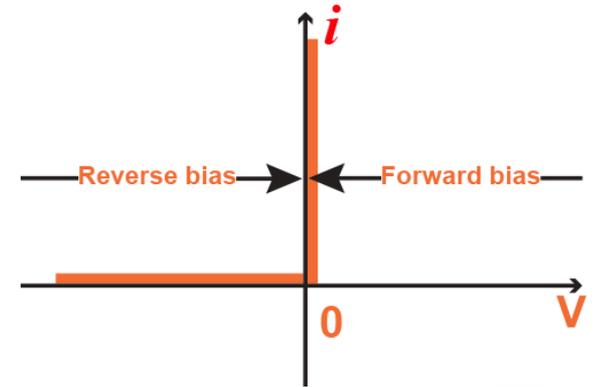
- in cui  $V_T$ , detto *equivalente in tensione della temperatura*, vale:

$$V_T \equiv \frac{kT}{e}$$

- Qualora il campo elettrico sia applicato ad una barretta in cui la concentrazione di cariche non sia uniforme, le due correnti, quella di deriva e quella di diffusione, convivranno senza influenzarsi reciprocamente.
- Tuttavia, mentre la corrente di deriva permarrà fino alla rimozione del campo elettrico, quella di diffusione tenderà ad arrestarsi rapidamente, siccome le cariche si muovono molto rapidamente per questo effetto, ad una velocità dell'ordine di quella della luce nel vuoto.

# Diodo a semiconduttore

- Per *diodo* si intende un dispositivo caratterizzato da una caratteristica corrente-tensione asimmetrica ed una resistività fortemente dipendente dalla direzione della corrente.
- Questa caratteristica di funzionamento è ottenuta attraverso due tecnologie alle quali corrispondono il diodo a vuoto e il diodo a semiconduttore

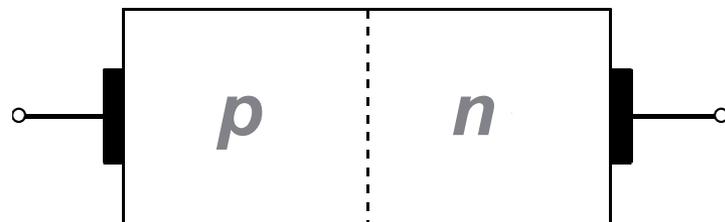




tecnologie a basso costo per la purificazione dei semiconduttori.

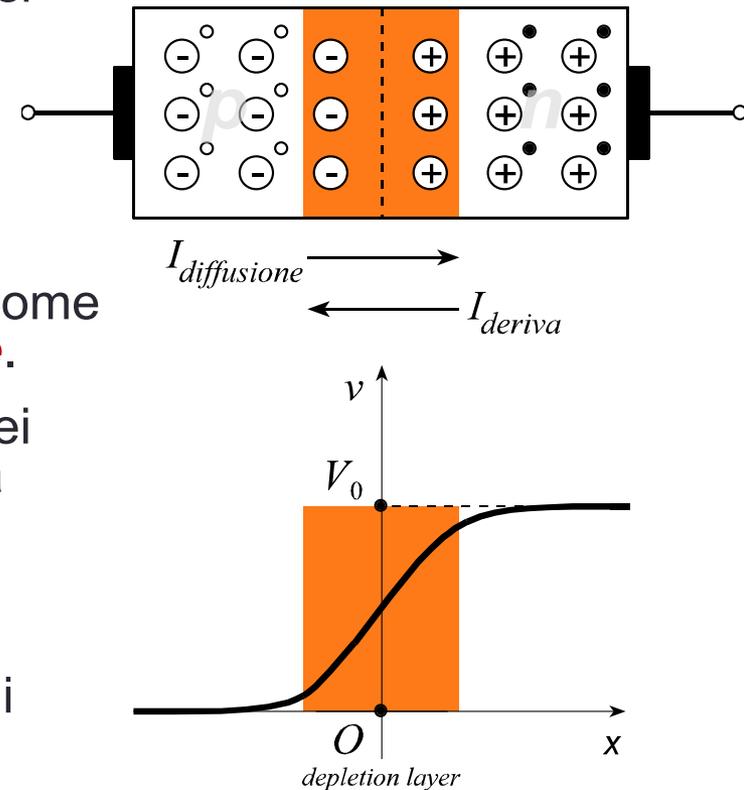
# Giunzione *pn*

- Supponiamo di inserire impurità di tipo *p* ad un estremo ed impurità di tipo *n* all'altro estremo di una sbarretta di silicio puro. La superficie di separazione all'interno della sbarretta tra un tipo di drogaggio e l'altro è detta *giunzione pn*
- Per effetto della concentrazione non uniforme di elettroni e lacune, all'atto di formazione della giunzione si origina una corrente di diffusione costituita da lacune della zona *p* che si spostano nella zona *n* e di elettroni che dalla zona *n* si spostano in quella *p*.



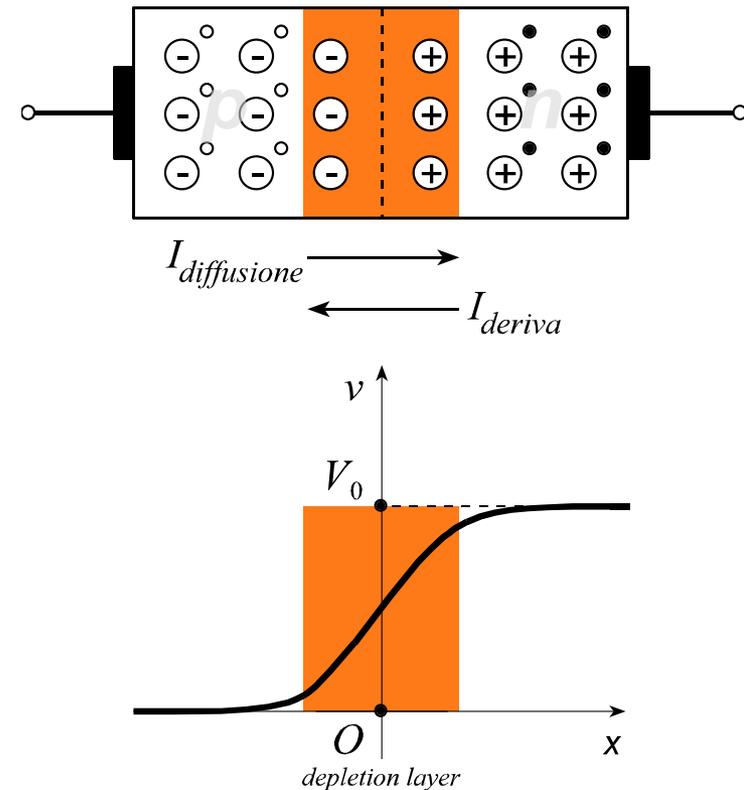
# Depletion layer

- A causa di questo spostamento alcune lacune provenienti dalla zona  $p$ , giunte nella zona  $n$  si ricombinano con gli elettroni di tale zona; viceversa, alcuni elettroni dalla zona  $n$ , giunti nella zona  $p$ , si ricombinano con le lacune presenti in tale regione.
- Ciò determina a cavallo della giunzione una regione priva di cariche libere che prende il nome di *depletion layer* o *regione di carica spaziale*.
- Tale regione è stata originata sia dal flusso dei portatori di una regione in quella opposta, sia dalla ricombinazione dei portatori provenienti dalla regione opposta.
- La presenza di questa regione di carica localizzata origina un campo elettrico e quindi una differenza di potenziale  $V_0$  che ostacola l'ulteriore diffusione delle cariche mobili attraverso la giunzione. In particolare, solo quelle di carica  $q$  dotate di energia superiore a  $qV_0$  possono attraversare la giunzione.



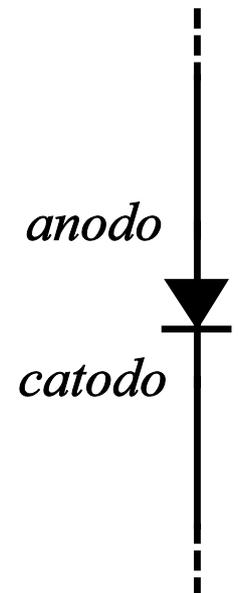
# Il gradino di potenziale

- Il *gradino di potenziale* così costituito, agevola tuttavia il passaggio, attraverso la giunzione, delle cariche minoritarie presenti nelle due regioni, in particolare, elettroni nella zona  $p$  e lacune in quella  $n$ .
- Così in corrispondenza della giunzione coesistono una corrente di diffusione ed una di deriva, di opposte direzioni.
- Alla formazione della giunzione  $pn$ , al crescere di  $V_0$  si riduce la corrente di diffusione che è originariamente preponderante, sino a raggiungere il valore della corrente di deriva, quando si raggiunge la condizione di equilibrio.



# Diodo a semiconduttore

- Per adoperare il dispositivo così realizzato, detto *diodo a semiconduttore*, occorre metallizzare le estremità allo scopo di collegarlo all'interno di un circuito; i contatti realizzati devono risultare di tipo ohmico, ovvero tali che la caduta di tensione ai loro capi sia indipendente sia dal verso che dall'intensità della corrente che li attraversa.
- Per motivi di carattere energetico, la differenza di potenziale che si origina ai capi dei contatti metallo-semiconduttore è tale da compensare esattamente la differenza di potenziale presente sulla giunzione per cui la differenza di potenziale fra i terminali metallici a circuito aperto risulta nulla. La giustificazione analitica del fenomeno viene fornita dalla meccanica quantistica.
- In figura è rappresentato il simbolo elettrico del diodo a semiconduttore, il terminale collegato alla zona  $p$  della giunzione è chiamato comunemente *anodo* e il terminale collegato alla zona  $n$ , *catodo*.



# Polarizzazione della giunzione *pn*

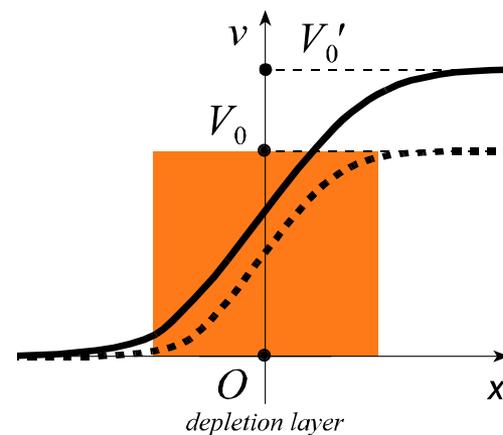
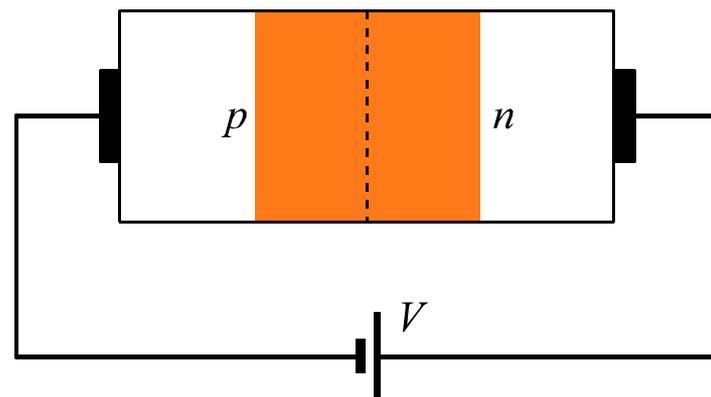
- Per *polarizzazione* della giunzione *pn* si intende l'applicazione ai terminali metallici del diodo di una differenza di potenziale  $V$ , attraverso un opportuno generatore di forza elettromotrice.
- Tale differenza di potenziale risulta localizzata ai capi della giunzione, così la differenza di potenziale presente sulla giunzione diventa:

$$V_0' = V + V_0$$

- Se  $V$  ha una polarità concorde con  $V_0$  l'altezza del gradino di potenziale aumenta e la giunzione è detta *polarizzata inversamente*.
- Se  $V$  ha polarità opposta a quella di  $V_0$ , il gradino di potenziale diminuisce di ampiezza e la giunzione è detta *polarizzata direttamente*.

# Polarizzazione inversa

- In polarizzazione inversa il polo negativo del generatore di forza elettromotrice  $V$  è collegato all'anodo del diodo e quello positivo al catodo.
- In tale circostanza le lacune della zona  $p$  vengono attratte dal polo negativo del generatore e gli elettroni liberi della zona  $n$  dal polo positivo. In queste condizioni aumenta l'altezza del gradino di potenziale ed alla corrente di diffusione prevale quella di deriva, inoltre si allarga il depletion layer.
- Al crescere, in valore assoluto, di  $V$  la corrente di diffusione si annulla e resta la sola corrente di deriva,  $I_S$ , indipendente da  $V$  in quanto dovuta alle sole cariche minoritarie.
- Per tale motivo  $I_S$ , che è dell'ordine del  $nA$  nel silicio e del  $\mu A$  nel germanio, dipende fortemente dalla temperatura, crescendo con essa in modo, approssimativamente, esponenziale.

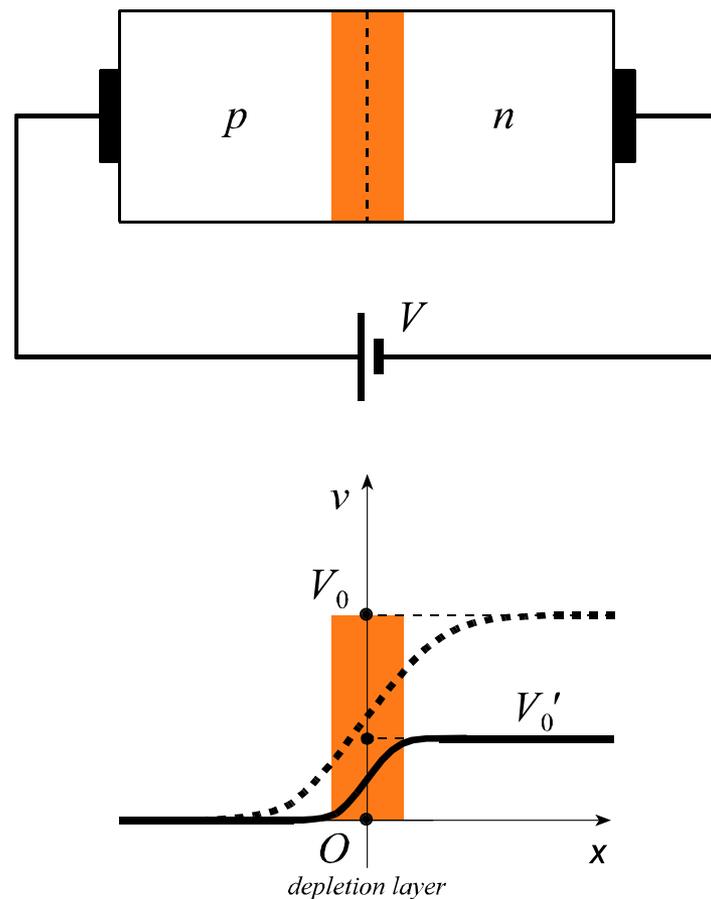


# Polarizzazione inversa

- Per valori elevati della tensione  $V$  si manifesta il fenomeno del *breakdown*, cioè la corrente  $I_S$  cresce rapidamente a tensione pressoché costante;
- tale effetto può determinare la rottura del dispositivo qualora non si intervenga dall'esterno limitando la corrente.
- Il fenomeno è dovuto a due cause: l'*effetto Zener* o l'*effetto valanga* o entrambi:
  - L'effetto Zener, prevalente al di sotto della decina di volt, è determinato dalla generazione di cariche minoritarie a causa dell'elevato campo elettrico presente che provoca la rottura di nuovi legami covalenti;
  - l'effetto valanga prevale al di sopra della decina di volt ed è determinato dagli urti degli elettroni, che hanno acquisito un'elevata velocità a causa del campo elettrico, con gli atomi del reticolo cristallino, provocando la rottura dei legami covalenti e il conseguente aumento delle cariche disponibili per la conduzione.

# Polarizzazione diretta

- In polarizzazione diretta il polo positivo del generatore di forza elettromotrice  $V$  è collegato all'anodo del diodo e quello negativo al catodo.
- In tale circostanza gli elettroni provenienti dal polo negativo del generatore penetrano nella zona  $n$  e diffondono nella zona  $p$ ; analogamente, dalla zona  $p$  escono elettroni diretti verso il polo positivo del generatore che ha determinato la rottura di legami covalenti e la formazione di nuove lacune.
- In queste condizioni diminuisce l'altezza del gradino di potenziale ed alla corrente di deriva  $I_S$  prevale quella di diffusione  $I_D$ , costituita da lacune che passano dalla zona  $p$  a quella  $n$  dove si ricombinano ed elettroni dalla zona  $n$  a quella  $p$  in cui si ricombinano.



# DISPOSITIVI ELETTRICI A SEMICONDUCTTORE

Fine prima parte

