

Laboratorio di Elettronica

Lezione 6:

Semiconduttori; diodi a giunzione

Valentino Liberali, Alberto Stabile



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli"

E-mail: valentino.liberali@unimi.it, alberto.stabile@unimi.it

Milano, 11-12 maggio 2022

- 1 Semiconduttori
- 2 Struttura elettronica dei semiconduttori
- 3 Portatori di carica nei semiconduttori
- 4 Generazione e ricombinazione
- 5 Concentrazione di portatori
- 6 Drogaggio
- 7 Cariche elettriche in un semiconduttore
- 8 Correnti in un semiconduttore
 - Corrente di deriva
 - Corrente di diffusione
- 9 Giunzione p-n
- 10 Diodo a giunzione
- 11 Circuiti raddrizzatori

Semiconduttori

I semiconduttori sono materiali allo **stato solido** dotati di proprietà elettriche intermedie tra quelle dei conduttori (metalli) e quelle degli isolanti. I più importanti sono:

- **Silicio** (Si): il più usato, soprattutto in tecnologia CMOS;
- **Germanio** (Ge): è stato il primo materiale dell'elettronica allo stato solido; oggi viene usato in lega con il silicio (SiGe) per dispositivi molto veloci;
- **Arseniuro di Gallio** (GaAs), **Fosforo di Gallio** (GaP) e **Nitrato di Gallio** (GaN): impiegati soprattutto in applicazioni optoelettroniche (LED, laser)

Sono **elementi del IV gruppo** del sistema periodico, oppure **composti III-V** o in alcuni casi **composti II-VI**.

In questi materiali, la **conducibilità elettrica** può essere fatta variare in modo permanente, introducendo quantità ben controllate di impurezze (**drogaggio**), oppure in modo temporaneo, attraverso stimoli **elettrici, ottici, termici, meccanici**, o altro.

Tavola periodica degli elementi

1 I A H <small>idrogeno</small>	2 II A He	3 III B Li	4 IV B Be	5 V B B <small>boro</small>	6 VI B C <small>carbonio</small>	7 VII B N <small>azoto</small>	8 VIII B O <small>ossigeno</small>	9 IX B F	10 X B Ne	11 I B Na	12 II B Mg	13 III A Al <small>alluminio</small>	14 IV A Si <small>silicio</small>	15 V A P <small>fosforo</small>	16 VI A S	17 VII A Cl	18 VIII A Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu <small>rame</small>	30 Zn	31 Ga <small>gallio</small>	32 Ge <small>germanio</small>	33 As <small>arsenico</small>	34 Se	35 Br	36 Kr
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 <small>stagno</small>	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Ce	56 Ba	57-71 L*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au <small>oro</small>	80 Hg	81 Tl	82 Pb <small>piombo</small>	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 A*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

L*:	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
A*:	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Struttura elettronica dei semiconduttori

Gli elementi del IV gruppo del sistema periodico hanno **4 elettroni** nel livello energetico più esterno.

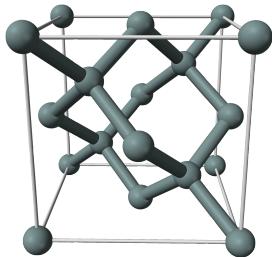
Questi 4 elettroni sono gli elettroni **di valenza**, che possono formare legami tra gli atomi per costituire molecole e cristalli.

Il silicio e il germanio formano **4 legami covalenti**, ciascuno dei quali corrisponde ad un **orbitale molecolare** in comune tra due atomi vicini.

Ogni orbitale molecolare contiene **due elettroni** di valenza .

Ogni atomo di silicio forma quattro legami diretti verso i vertici di un **tetraedro**, con il nucleo di silicio al centro.

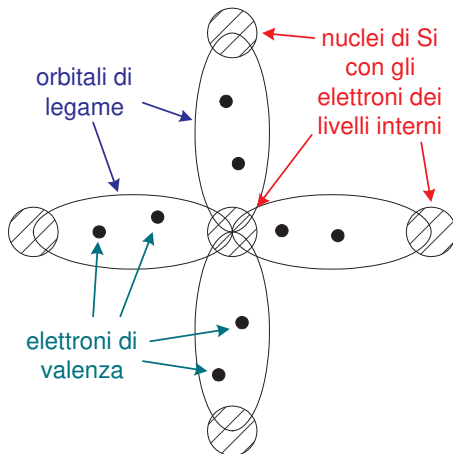
La struttura cristallina è quella del **diamante**, con una **cella elementare** di forma **cubica** che si ripete nelle tre dimensioni spaziali in modo periodico.



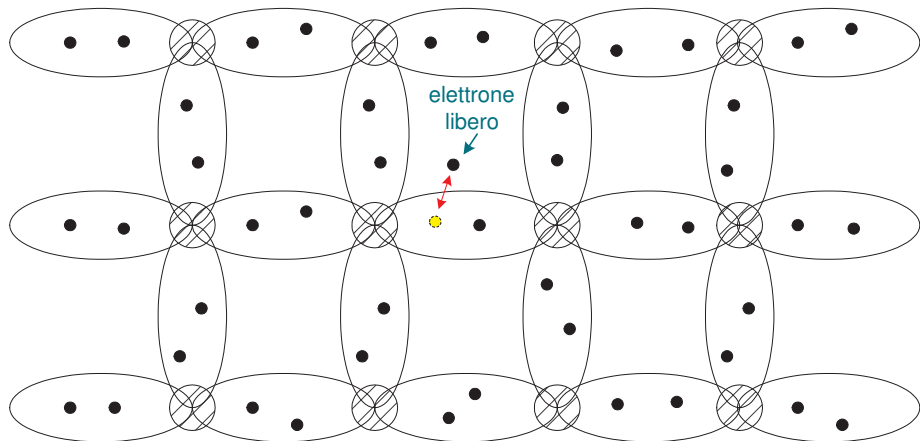
Legami covalenti nel silicio

Per comodità, rappresentiamo su un piano i quattro legami dell'atomo di silicio.

È importante che tutto il solido sia un solo cristallo privo di irregolarità (**silicio monocristallino**).



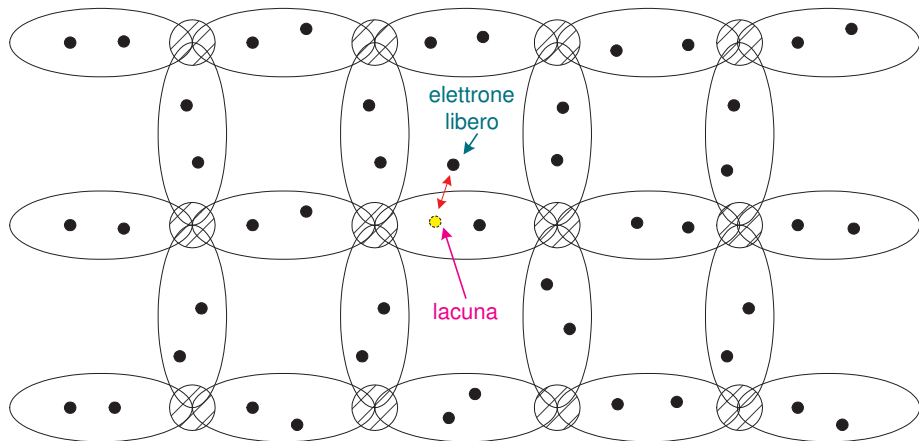
Portatori di carica nei semiconduttori: elettroni liberi



Gli elettroni di valenza **non sono liberi** di muoversi, perché sono “confinati” negli orbitali di legame.

Se un elettrone acquista abbastanza energia, esce dall'orbitale di legame e diventa libero di muoversi: cioè diventa un **portatore** di carica elettrica.

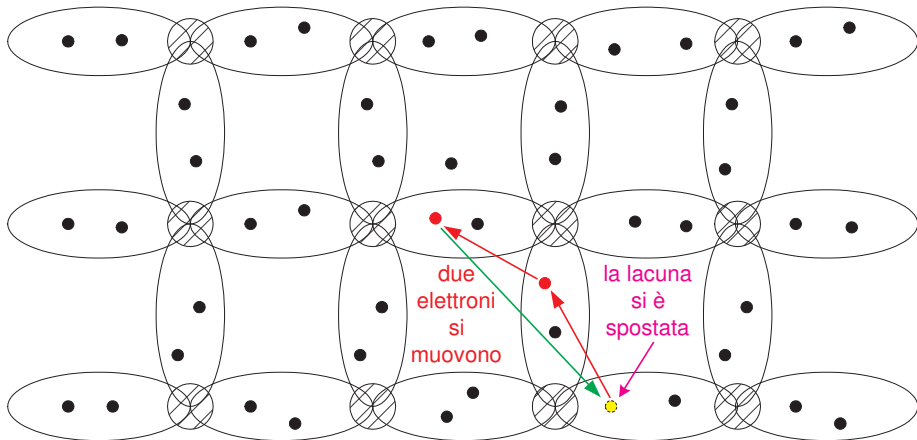
Portatori di carica nei semiconduttori: lacune



L'elettrone libero lascia uno spazio vuoto nell'orbitale, che può essere occupato da un altro elettrone.

In pratica, lo spazio vuoto (**lacuna**, o, in inglese, **hole**), si comporta come una particella di carica positiva, perché manca una carica negativa in un orbitale di legame.

Movimento delle lacune



Lo spostamento di una lacuna è più semplice da descrivere dello spostamento di molti elettroni.

L'elettrone e la lacuna costituiscono una **coppia di portatori**.

Generazione e ricombinazione

- **GENERAZIONE:**

Creazione di una coppia di portatori elettrone-lacuna. Richiede energia; può avvenire per riscaldamento, per illuminazione o per collisione di altre particelle.

L'energia richiesta per la generazione è il “gap” di energia, cioè la differenza tra i livelli energetici di un elettrone libero e di un elettrone nell'orbitale di legame.

Il “gap” di energia dipende dal semiconduttore; per il silicio è 1.12 eV.

- **RICOMBINAZIONE:**

Una lacuna viene “riempita” da un elettrone libero, che perde energia.

L'energia rilasciata è pari al “gap” di energia, e può essere emessa sotto forma di luce (nei LED e nei laser), oppure sotto forma di vibrazione meccanica.

In assenza di stimoli esterni, generazione e ricombinazione sono in **equilibrio dinamico**: vengono continuamente generate nuove coppie di portatori, mentre altre coppie si ricombinano.

Concentrazione di portatori

n = concentrazione di elettroni liberi (numero di elettroni liberi per metro cubo)

p = concentrazione di lacune (numero di lacune per metro cubo)

In un semiconduttore **intrinseco** (cioè **totalmente** privo di impurità) il numero di elettroni liberi è uguale al numero di lacune:

$$n = p = n_i$$

dove n_i è la *concentrazione intrinseca*.

Alla temperatura ambiente ($T = 300$ K), $n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$.

Poiché nel silicio ci sono $5 \cdot 10^{28}$ atomi/ m^3 , a temperatura ambiente c'è una coppia di portatori ogni 3000 miliardi di atomi (circa).

La concentrazione intrinseca n_i aumenta all'aumentare della temperatura.

Drogaggio

L'introduzione in un semiconduttore di impurità in piccole quantità ben controllate si chiama **drogaggio**.

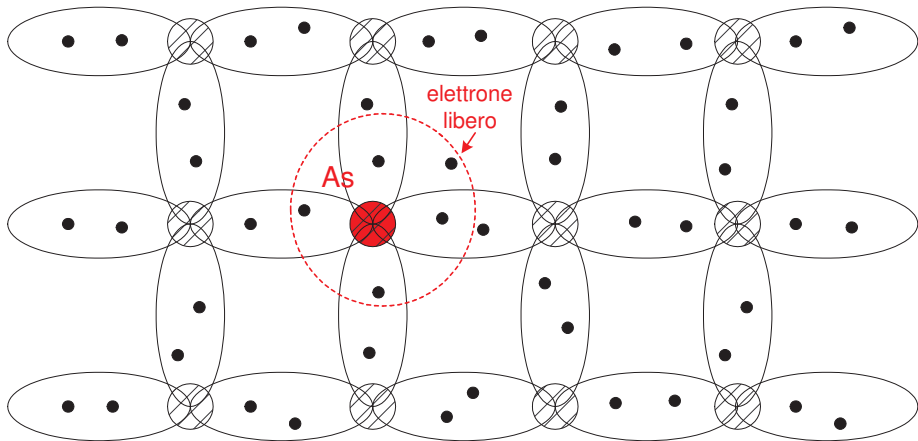
Per il silicio si utilizzano prevalentemente come droganti:

- **Boro** (B), che appartiene al III gruppo del sistema periodico;
- **Fosforo** (P) e **Arsenico** (As), che appartengono al V gruppo del sistema periodico.

L'atomo drogante deve sostituirsi ad un atomo di silicio, per non modificare la struttura monocristallina (**drogaggio sostituzionale**).

Drogaggio di tipo n (1/2)

Atomo di **Fosforo** (P) oppure di **Arsenico** (As), (V gruppo del sistema periodico)
al posto di un atomo di silicio:



L'atomo di drogante ha un **elettrone in più**, che non entra in un orbitale di legame e quindi rimane **libero**.

Drogaggio di tipo n (2/2)

Fosforo (P) e **Arsenico (As)** sono elementi **donatori**, perché danno un elettrone libero in più: quindi il silicio viene arricchito di elettroni liberi.

La concentrazione di elettroni liberi diventa maggiore della concentrazione di lacune:

$$n > p$$

e si dice che il silicio è **di tipo n**.

N_D = concentrazione di atomi donatori

Se $N_D \gg n_i$, allora

$$n \approx N_D$$

Legge dell'azione di massa

Legge dell'azione di massa: il prodotto delle concentrazioni di elettroni liberi e di lacune è costante (dipende solo dalla temperatura):

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

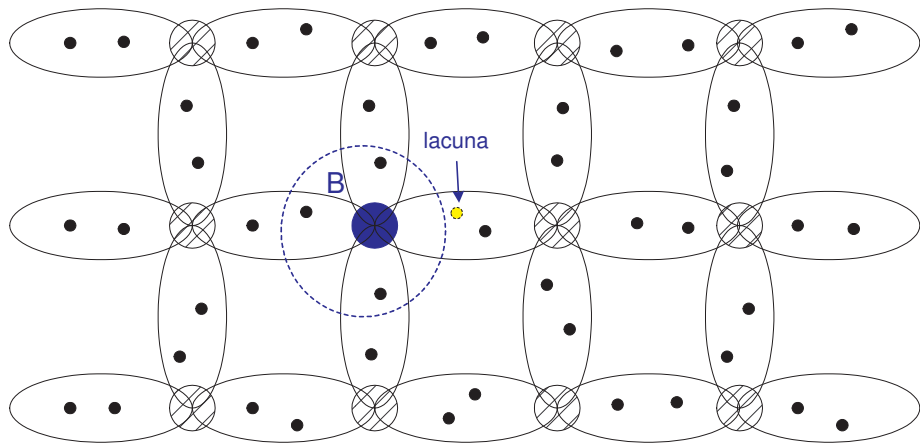
Nel silicio **di tipo n**:

$$n \approx N_D; \quad p = \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

Quando aumenta la concentrazione di elettroni liberi, la concentrazione di lacune diminuisce. Gli elettroni sono **portatori maggioritari**, le lacune sono **portatori minoritari**.

Drogaggio di tipo p (1/2)

Atomo di **Boro** (B), (III gruppo del sistema periodico) al posto di un atomo di silicio:



L'atomo di drogante ha un **elettone in meno** rispetto al numero di legami covalenti, quindi uno degli orbitali di legame ha un elettone in meno e si ha una lacuna.

Drogaggio di tipo p (2/2)

Il **Boro** (B) è un elemento **accettore**, perché può ricevere un elettrone (per completare il quarto orbitale di legame), lasciando libera una lacuna: quindi il silicio viene arricchito di lacune. La concentrazione di lacune diventa maggiore della concentrazione di elettroni liberi:

$$p > n$$

e si dice che il silicio è **di tipo p**.

N_A = concentrazione di atomi accettori

Se $N_A \gg n_i$, allora

$$p \approx N_A$$

Nel silicio **di tipo p**:

$$p \approx N_A; \quad n = \frac{n_i^2}{p} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

Quando aumenta la concentrazione di lacune, la concentrazione di elettroni liberi diminuisce. Le lacune sono **portatori maggioritari**, gli elettroni sono **portatori minoritari**.

Conduttanza del silicio drogato

Il silicio diventa più conduttivo all'aumentare della concentrazione di portatori. Trascurando la corrente dovuta al movimento dei portatori minoritari (che sono pochi), la conduttanza del silicio è proporzionale alla concentrazione di portatori maggioritari:

$$G \propto n \quad \text{per il silicio drogato } n$$

$$G \propto p \quad \text{per il silicio drogato } p$$

Cariche elettriche in un semiconduttore

Distinguiamo le cariche elettriche in:

- **portatori**, cioè cariche libere:
 - ▶ n è la concentrazione di elettroni liberi (cariche negative)
 - ▶ p è la concentrazione di lacune (cariche positive)
- **cariche fisse**, che sono gli atomi ionizzati del drogante:
 - ▶ N_A è la concentrazione di ioni di atomi accettori (cariche negative)
 - ▶ N_D è la concentrazione di ioni di atomi donatori (cariche positive)

Non consideriamo tutte le cariche elettriche che non hanno effetto sulla conduzione. In particolare, non consideriamo gli atomi di silicio, che sono elettricamente neutri (14 protoni nel nucleo e 14 elettroni di cui 10 legati all'atomo e 4 negli orbitali di legame).

Nei calcoli, si considerano solo i portatori dovuti alla generazione di coppie (elettrone libero + lacuna), e le cariche elettriche dovute al drogaggio (un portatore + un atomo ionizzato con carica di segno opposto al portatore).

In condizioni di **neutralità**, la somma algebrica delle concentrazioni di carica elettrica è zero:

$$p - n + N_D - N_A = 0$$

Correnti in un semiconduttore

In un semiconduttore, la corrente è dovuta al movimento di entrambi i tipi di portatori:

- elettroni liberi (cariche negative), e
- lacune (cariche positive).

Le lacune si muovono nel verso convenzionale della corrente, mentre gli elettroni si muovono nel verso opposto.

La corrente totale è:

$$I = I_n + I_p$$

dove I_n è la corrente dovuta al movimento degli elettroni, mentre I_p è la corrente dovuta al movimento della lacune.

Corrente di deriva

La **corrente di deriva** (in inglese: *drift current*) è dovuta al movimento dei portatori per effetto di una tensione applicata.

In un semiconduttore:

- gli elettroni liberi hanno carica negativa, e si muovono verso il polo positivo del generatore di tensione applicato;
- le lacune hanno carica positiva, e si muovono verso il polo negativo del generatore di tensione applicato.

In ogni caso, la corrente nel semiconduttore è diretta dal terminale con tensione positiva verso quello con tensione negativa.

Agitazione termica (1/2)

Normalmente, la **velocità di deriva** dei portatori dovuta alla una tensione applicata è piccola rispetto alla **velocità di agitazione termica** dovuta alla temperatura.

L'energia media di una particella è $n_{\text{dim}} \cdot \frac{1}{2} kT$, dove n_{dim} è il numero di dimensioni dello spazio in cui la particella si può muovere, k è la *costante di Boltzmann* ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K) e T è la temperatura assoluta in kelvin (la temperatura ambiente è $T = 300$ K).

Per un elettrone libero di muoversi in un volume ($n_{\text{dim}} = 3$), uguagliando l'energia media all'energia cinetica, si ha l'equazione:

$$\frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m_e v^2$$

dove m_e è la massa e v è la velocità.

Al posto della massa dell'elettrone m_e , bisognerebbe usare la *massa efficace* m_e^* , che tiene conto anche delle interazioni tra l'elettrone e gli atomi del reticolo cristallino; ma il calcolo della massa efficace è complicato e dipende dalla struttura cristallina e dalla specie di atomi.

Agitazione termica (2/2)

Per semplicità, usiamo il valore della *massa a riposo* dell'elettrone $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg, ottenendo il valore approssimato:

$$v \approx 100 \text{ km/s}$$

La velocità di agitazione termica degli elettroni è molto elevata, ma ha una direzione casuale, diversa per ciascun elettrone, e che cambia in continuazione, per cui il risultato è a **media nulla** (se il materiale è omogeneo).

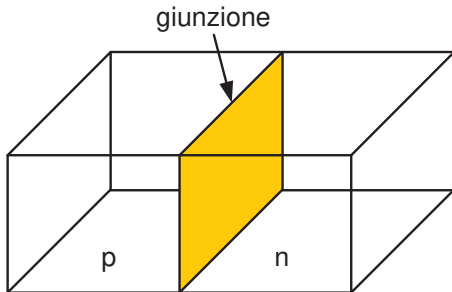
La velocità di deriva è molto minore, ma **tutti** i portatori si muovono nella stessa direzione, per cui l'effetto è percepibile.

Corrente di diffusione

In un materiale semiconduttore **non omogeneo**, che presenta differenze nella concentrazione dei portatori, l'agitazione termica provoca la **corrente di diffusione**.

La **corrente di diffusione** è dovuta alla differenza di concentrazione dei portatori nelle diverse parti del materiale. Per effetto dell'agitazione termica, i portatori si muovono in direzione casuale; di conseguenza, è *più probabile* il movimento di portatori dalle zone con concentrazione maggiore verso quelle con concentrazione minore.

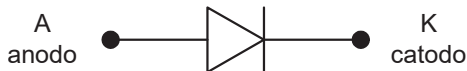
Giunzione p-n



In un semiconduttore **monocristallino** in parte drogato p e in parte drogato n, la superficie di separazione tra le due zone drogate in modo diverso si chiama **giunzione**.

Il dispositivo elettronico è il **diodo a giunzione**.

Diodo a giunzione



Il dispositivo più semplice realizzato con una giunzione p-n è il **diodo**.

Il terminale collegato alla regione drogata **p** è il terminale positivo (**anodo**); quello collegato alla regione drogata **n** è il terminale negativo (**catodo**).

Il diodo è un bipolo NON simmetrico e NON lineare.

Proprietà della giunzione p-n (1/2)

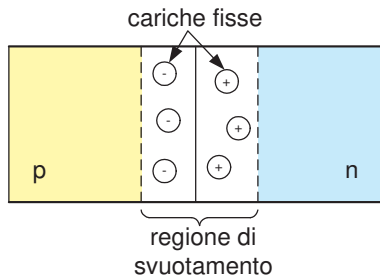
Nel momento in cui viene formata la giunzione, per effetto della **diffusione**, si verificano un movimento di elettroni dalla zona n verso la zona p, e un movimento di lacune dalla zona p verso la zona n.

L'aumento di portatori *minoritari* vicino alla giunzione provoca un aumento del tasso di ricombinazione tra elettroni e lacune.

Per effetto della ricombinazione, le **cariche fisse** degli atomi accettori e donatori *non sono più controbilanciate dai portatori* di segno opposto.

Gli elettroni vicino alla giunzione vengono attirati dalle cariche fisse di segno positivo (verso la zona n); le lacune vicino alla giunzione vengono attratte dalle cariche fisse di segno negativo (verso la zona p).

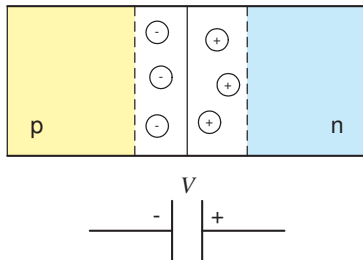
Vicino alla giunzione c'è una zona priva di portatori, detta **regione di svuotamento** o **regione di carica spaziale** perché **non è elettricamente neutra**.



Proprietà della giunzione p-n (2/2)

Il suo comportamento è analogo a quello di una capacità (accumulo di cariche fisse senza portatori e quindi senza passaggio di corrente)

→ **capacità di giunzione**

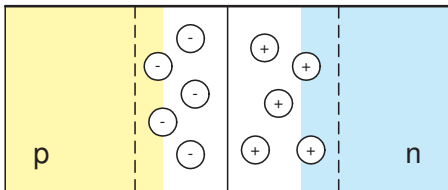
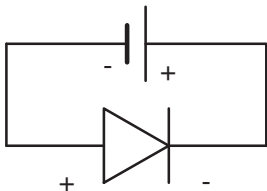


Ai capi della **capacità di giunzione** c'è una tensione V con segno **opposto** al segno dei terminali del diodo: questa tensione impedisce ai portatori liberi di attraversare la regione di carica spaziale.

La somma algebrica delle due correnti di deriva e di diffusione è nulla.

Diodo polarizzato inversamente

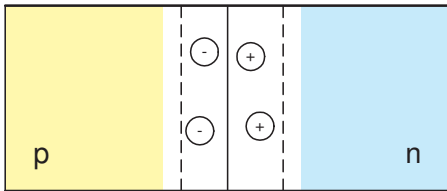
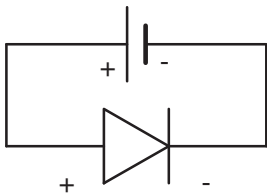
Un diodo è **polarizzato inversamente** quando ai suoi capi è applicata una tensione **discorde** rispetto ai segni dei terminali del diodo.



La regione di svuotamento si allarga perché i portatori vengono attirati dalla tensione applicata esternamente.

Diodo polarizzato direttamente

Un diodo è **polarizzato direttamente** quando ai suoi capi è applicata una tensione **concorde** rispetto ai segni dei terminali.



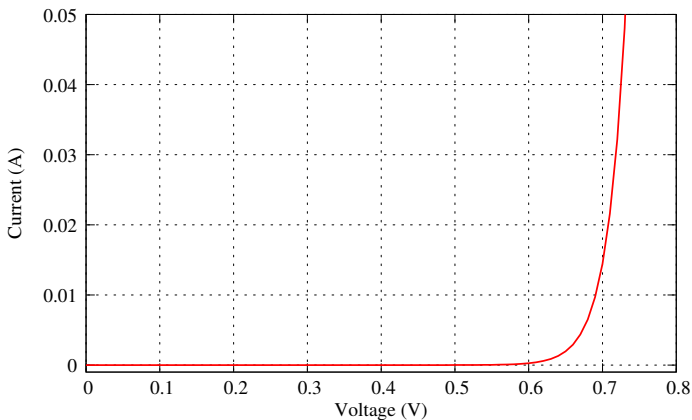
Se la tensione è **piccola**, la regione di svuotamento si restringe. Se la tensione è **grande**, la regione di svuotamento si annulla e il diodo conduce una corrente elevata perché la corrente di diffusione non è più bilanciata dalla corrente di deriva.

Caratteristica tensione-corrente (1/3)

Nel diodo, il passaggio alla conduzione è graduale:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{q_0 V_D}{kT}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

$q_0 = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C (carica dell'elettrone); $V_T = \frac{kT}{q_0} \approx 26$ mV alla temperatura ambiente $T = 300$ K



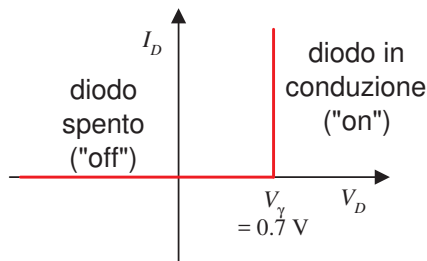
Caratteristica tensione-corrente (2/3)

Per la maggior parte dei problemi pratici, la caratteristica esponenziale può essere approssimata da una caratteristica ideale:

$I_D = 0$ se $V_D < V_\gamma$ “off” (spento)

$I_D > 0$ se $V_D = V_\gamma$ “on” (acceso)

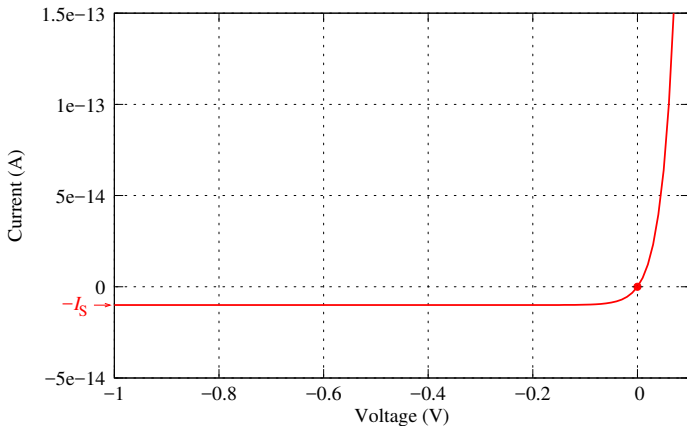
dove V_γ è la **tensione di soglia** (circa 0.7 V per un diodo in silicio).



Caratteristica tensione-corrente (3/3)

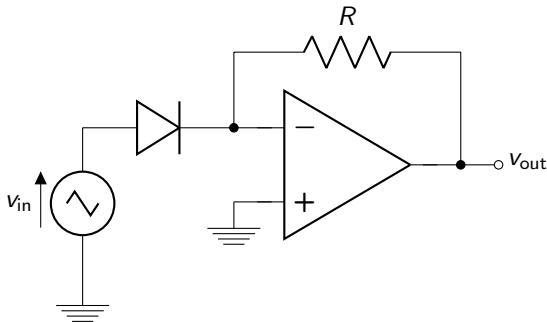
Per valori negativi della tensione V_D , la corrente è $I_D \approx -I_S$.

Questa corrente, detta *corrente inversa*, è dovuta alla generazione di coppie di portatori nella regione di svuotamento per effetto della temperatura: infatti I_S dipende fortemente dalla temperatura e raddoppia ad ogni incremento di 10 K circa.



Misura della caratteristica del diodo

Per misurare la caratteristica del diodo, si può sfruttare la terra virtuale di un amplificatore operazionale.



Il catodo del diodo è a 0 V, mentre l'anodo è alla tensione v_{in} . La corrente dipende dalla tensione in modo esponenziale.

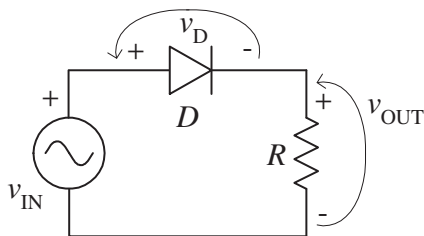
L'uscita è:

$$v_{out} = -R \cdot i_D = -R \cdot I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$$

Circuito raddrizzatore a semionda

Un raddrizzatore (in inglese *rectifier*) è un dispositivo che serve a raddrizzare un segnale sinusoidale in un segnale unidirezionale (sempre positivo o sempre negativo). Normalmente, i raddrizzatori sono usati per **trasformare la tensione alternata in tensione continua**.

Se il polo negativo è rivolto verso la resistenza (segnale in uscita), il diodo consente il passaggio delle sole semionde positive. Tuttavia, il picco massimo del segnale in uscita sarà uguale al picco massimo del segnale in ingresso sottratto della tensione di soglia del diodo utilizzato.



Circuito raddrizzatore a semionda

Esempio: simulazione con ngspice

Modelli di due diodi per ngspice

1N4001:

```
.model 1N4001 D(Is=14.11n N=1.984 Rs=33.89m Ikf=94.81 Xti=3  
+ Eg=1.11 Cjo=25.89p M=.44 Vj=.3245 Fc=.5 Bv=75 Ibv=10u Tt=5.7u)
```

1N4148:

```
.model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n)
```

Raddrizzatore a semionda

* RADDRIZZATORE

```
.model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n)
```

```
V1 1 0 SIN(0 10 50 0 0)
```

```
D1 1 2 1N4148
```

```
R1 2 0 10K
```

```
.OP
```

```
.TRAN 10U 60M
```

```
.PLOT TRAN V(1) V(2)
```

```
.END
```

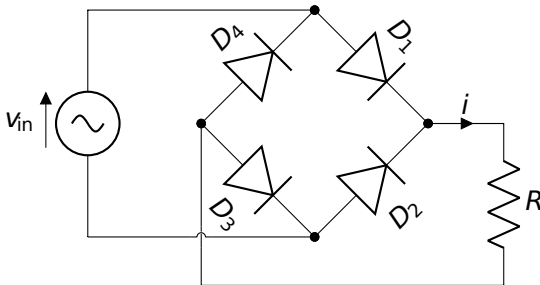
Circuito raddrizzatore a doppia semionda (Ponte di Graetz)

Il Ponte di Graetz permette di raddrizzare il segnale sinusoidale in ingresso sia nel semiperiodo in cui la tensione in ingresso è maggiore di zero sia nel semiperiodo in cui la tensione in ingresso è minore di zero.

Lo si costruisce con quattro diodi.

Il picco massimo del segnale di uscita corrisponde al picco massimo del segnale di ingresso meno le tensioni di soglia dei due diodi accesi.

Normalmente, l'ingresso del raddrizzatore a doppia semionda viene collegato all'uscita di un trasformatore.



Ponte di Graetz

ATTENZIONE! Il generatore di segnale NON deve essere collegato a terra.

Esercizi

1. Trovare la caratteristica tensione-corrente per diversi diodi: diodo in silicio, led rosso, led giallo, led verde.
2. Costruire i raddrizzatori a semionda ed a doppia semionda e verificarne il funzionamento.
3. Al fine di costruire un alimentatore che converte la tensione alternata in tensione continua, collegare all'uscita del raddrizzatore un condensatore elettrolitico (facendo attenzione alla polarità del condensatore). Verificarne il funzionamento.
4. $R_1 = R_2 = 50\ \Omega$; $R_3 = 1\ \text{k}\Omega$; $V_{DD} = 5\ \text{V}$; D_1, D_2 : diodi in silicio con $V_\gamma = 0.7\ \text{V}$. Gli ingressi v_1 e v_2 possono assumere indipendentemente i due valori di tensione: $0\ \text{V}$ (corrispondente al bit "0") e $5\ \text{V}$ (corrispondente al bit "1"). Ricavare v_{OUT} in funzione di v_1 e v_2 . Che funzione logica svolge?

