

Laboratorio di Segnali e Sistemi - Capitolo 2 -

Diodo a semiconduttore



Claudio Luci
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

last update : 070117

Sommario del capitolo:

- I semiconduttori
- elettroni e lacune
- il drogaggio
- giunzione pn
- diodo

semiconduttori

Semiconduttori: definizione

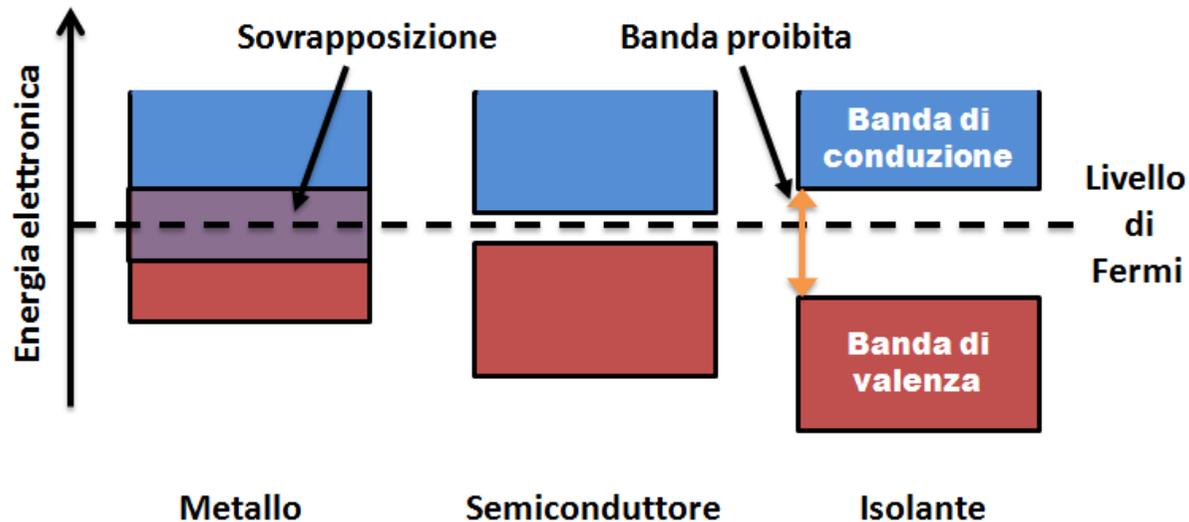
	IIIA	IVA	VA	VIA
	5 B Boro	6 C Carbonio	7 N Azoto	8 O Ossigeno
	13 Al Alluminio	14 Si Silicio	15 P Fosforo	16 S Zolfo
IIB	30 Zn Zinco	31 Ga Gallio	32 Ge Germanio	33 As Arsenico
	48 Cd Cadmio	49 In Indio	50 Sn Stagno	51 Sb Antimonio
	80 Hg Mercurio	81 Tl Tallio	82 Pb Piombo	83 Bi Bismuto
				84 Po Polonio

	Conduttori	$\rho < 10^{-5} \Omega m$	(rame: $3 \cdot 10^{-8} \Omega m$)
	Semiconduttori	$10^{-5} < \rho < 10^3 \Omega m$	(silicio: $2300 \Omega m$)
	Isolanti	$\rho > 10^3 \Omega m$	(diamante: $10^{14} \Omega m$)

- ❑ I semiconduttori hanno una resistività intermedia tra gli isolanti e i conduttori
- ❑ Essi possono essere composti da una singola specie atomica della quarta colonna (Si, Ge) oppure possono essere combinazioni degli elementi delle colonne III e V (ex: AsGa)
- ❑ I primi diodi e transistor utilizzavano il germanio, ma ora si usa soprattutto il silicio (si veda la “Silicon Valley”!)

N.B. La resistività dei semiconduttori dipende fortemente dalla temperatura. Allo zero assoluto essi si comportano come degli isolanti; mentre all'aumentare di T la resistività diminuisce (al contrario dei conduttori dove la resistività aumenta con T).

Livelli energetici degli elettroni nei solidi



❑ **Banda di valenza:** è la banda di energia più alta interamente occupata da elettroni.

❑ **Banda di conduzione:** è quella di energia più bassa tra quelle non completamente occupate da elettroni.

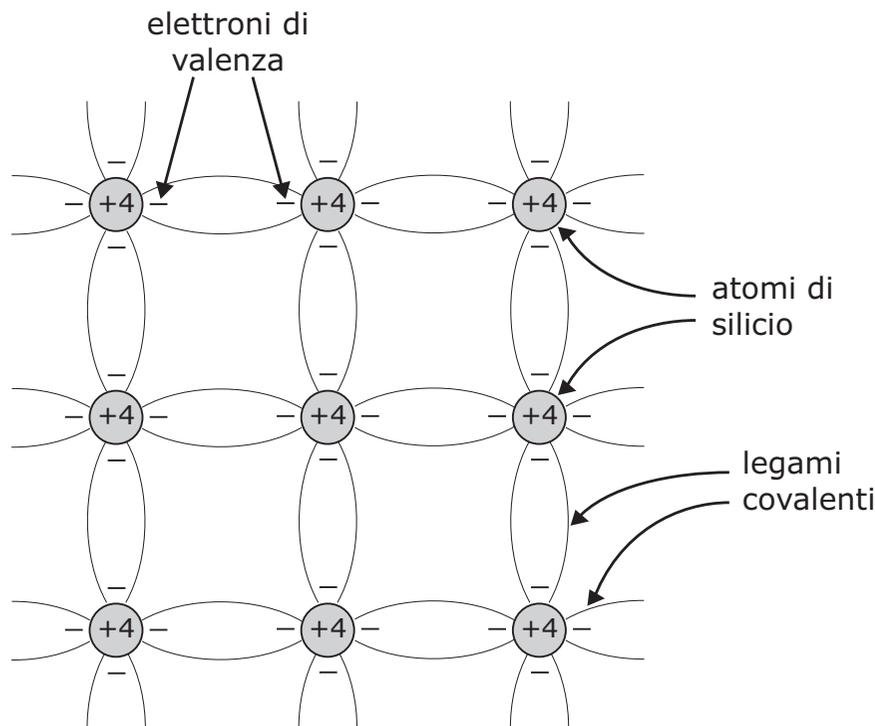
Gli elettroni sono liberi di muoversi liberamente all'interno del solido quando si trovano nella banda di conduzione

- ❑ Nei metalli la banda di valenza e quella di conduzione si sovrappongono, quindi essi sono dei buoni conduttori di elettricità.
- ❑ Negli isolanti la banda di conduzione è vuota e la gap di energia tra le due bande è maggiore di 1.5 eV (limite inferiore per gli isolanti); nessun elettrone riesce a “saltare” in questa banda per via dell’agitazione termica a temperatura ambiente.
- ❑ Nei semiconduttori la gap di energia è più bassa (0.67 eV per il Ge e 1.12 eV per il Si), quindi qualche elettrone può raggiungere la banda di conduzione

i semiconduttori: legame covalente

Un cristallo di silicio puro ha una struttura reticolare in cui gli atomi sono mantenuti in posizione da legami covalenti formati dai 4 elettroni di valenza che ogni atomo possiede.

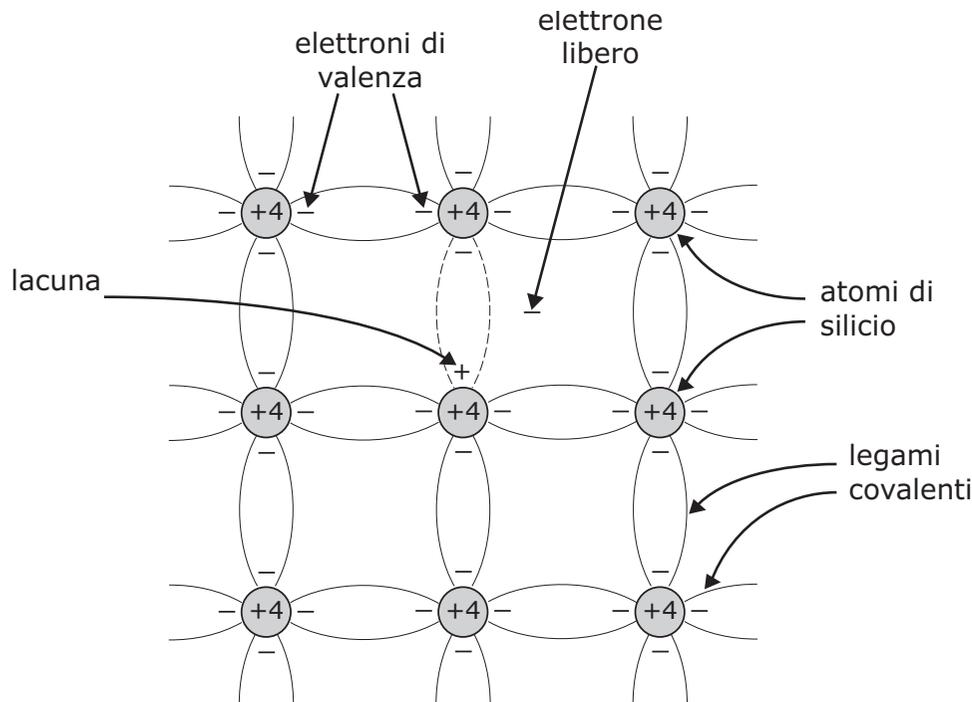
Rappresentazione bidimensionale di un cristallo di silicio.



- ❑ I cerchi rappresentano gli atomi di silicio. il $+4$ rappresenta la carica positiva neutralizzata dai 4 elettroni di valenza.
- ❑ Ogni atomo forma 4 legami covalenti con i vicini. A $T=0$ K tutti i legami sono intatti e non vi sono elettroni liberi per la conduzione.

i semiconduttori: elettroni e lagune

- ❑ A temperatura ambiente alcuni legami covalenti si rompono per agitazione termica.
- ❑ Ogni legame rotto da origine ad un elettrone libero e ad una lacuna.
Entrambi contribuiscono alla conduzione nel semiconduttore.
- ❑ Una lacuna è una mancanza di un elettrone in un legame covalente; essa può attrarre un elettrone da un atomo vicino, che a sua volta lascerà una carica positiva non bilanciata. Quindi la lacuna può “spostarsi” nel semiconduttore.



- ❑ n = concentrazione (densità) degli elettroni liberi.
- ❑ p = concentrazione delle lacune

Per un semiconduttore puro si ha:

$$n = p \equiv n_i$$

- ❑ n_i = concentrazione intrinseca

I semiconduttori: densità di corrente

- La concentrazione intrinseca è funzione della temperatura. Essa è pari a:

$$n_i^2 = BT^3 \cdot e^{-\frac{E_G}{K_B T}}$$

B dipende dal materiale ($B=5.4 \times 10^{31}$ per il silicio)
 E_G = larghezza banda proibita ($E_G=1.12$ eV per il silicio)
 K_B = costante di Boltzmann (8.62×10^{-5} eV/K)

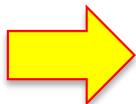
- Silicio a temperatura ambiente: $n_i = 1.5 \cdot 10^{10}$ portatori/cm³ $\rho \approx 5 \cdot 10^{22}$ atomi/cm³ [densità']
- Solo una piccolissima frazione degli atomi risulta ionizzata.
- Se applichiamo un campo elettrico esterno al cristallo, le cariche elettriche libere vengono accelerate e acquisiscono una velocità di drift v_d (nella direzione del campo) proporzionale all'intensità del campo elettrico e della mobilità μ (diversa per le lacune e per gli elettroni).
- Le lacune si muovono nel verso positivo del campo e gli elettroni nel verso negativo.

$$\text{lacune: } v_{d,p} = \mu_p \cdot E \quad ; \quad \mu_p = 480 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$\text{elettroni: } v_{d,n} = \mu_n \cdot E \quad ; \quad \mu_n = 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

- La corrente elettrica complessiva è data dal contributo di entrambi i tipi di portatori:

$$\text{densità' di corrente: } J = q(p \cdot v_{d,p} + n \cdot v_{d,n}) = q(p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \cdot E = qn_i \cdot (\mu_p + \mu_n) \cdot E$$

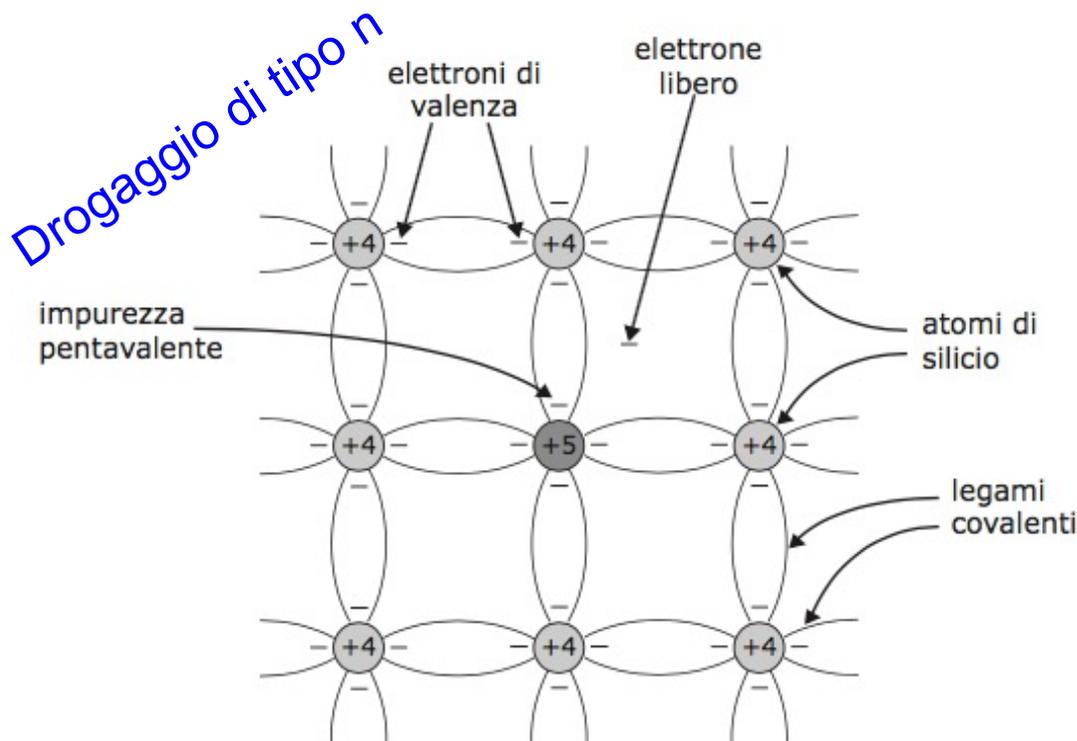


$$J = \sigma \cdot E \quad \Rightarrow \quad \sigma = qn_i \cdot (\mu_p + \mu_n) \quad [\text{conducibilità}']$$

$$\sigma = \sigma(T) \quad [\text{aumenta con T}]$$

i semiconduttori: drogaggio

- ❑ Inseriamo nel semiconduttore delle impurezze.
- ❑ Atomi pentavalenti (arsenico, fosforo, antimonio): **donatori, drogaggio di tipo n.**
- ❑ Atomi trivalenti (boro, indio, gallio, alluminio): **accettori, drogaggio di tipo p.**
- ❑ I donatori hanno un elettrone che non partecipa al legame covalente e può facilmente passare nella banda di conduzione, senza creare una lacuna nel reticolo.
- ❑ In maniera analoga agli accettori manca un elettrone per completare il legame covalente, quindi di fatto introducono una lacuna nel reticolo.



- ❑ n = concentrazione (densità) degli elettroni
- ❑ p = concentrazione delle lacune
- ❑ Per un semiconduttore drogato $n \neq p$, tuttavia vale la relazione (legge di azione di massa):

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

- ❑ n_i = concentrazione intrinseca
- ❑ Un aumento della concentrazione di un tipo dovuta alle impurezze provoca una diminuzione della concentrazione dell'altro tipo

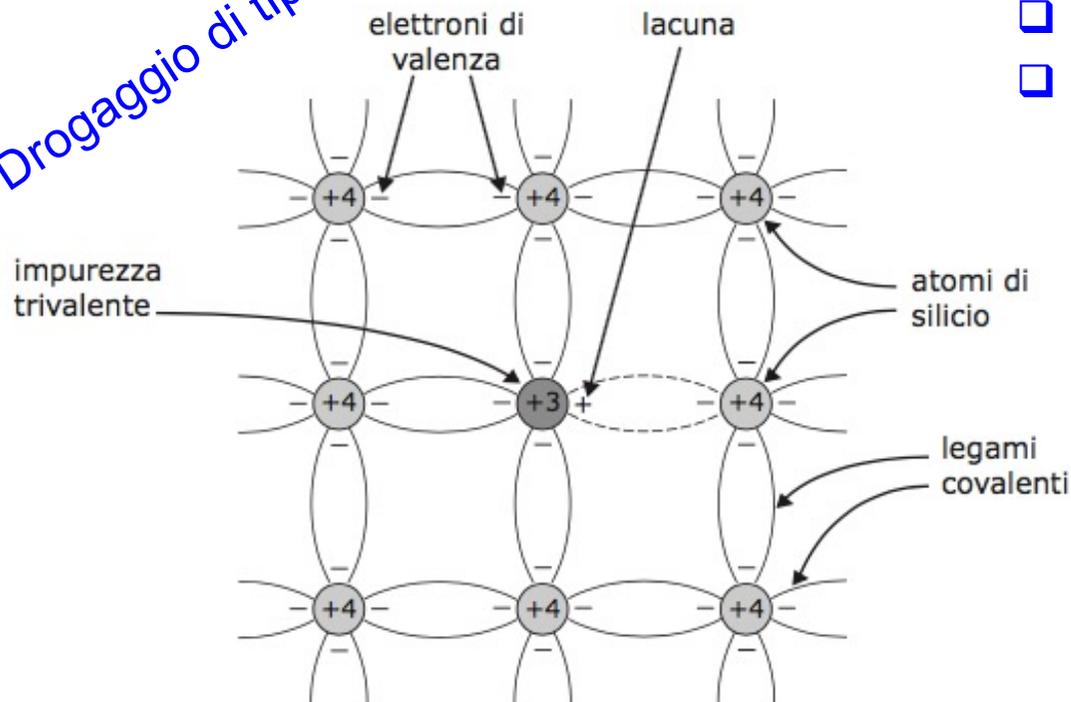
i semiconduttori: drogaggio

- In genere la concentrazione dovuta alle impurezze è molto maggiore della concentrazione intrinseca (dello stesso tipo di carica);
- Esempio con i donatori. Indichiamo con N_D la concentrazione dei donatori, se introduciamo un'impurezza per ogni cinquecentomila atomi di Silicio, abbiamo:

$$n \approx N_D \Rightarrow p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$\text{se } N_D \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow p \approx \frac{(1.5 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

Drogaggio di tipo P

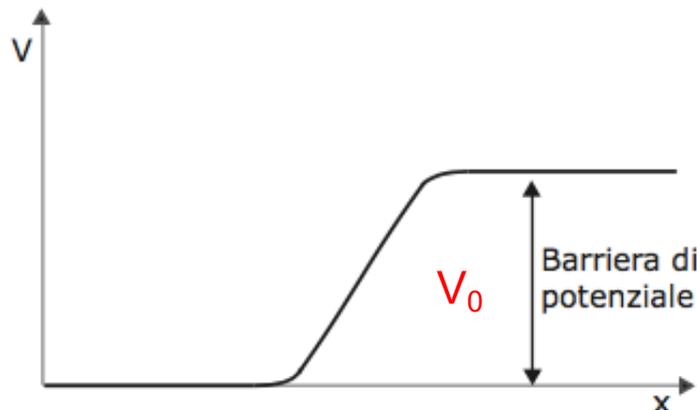
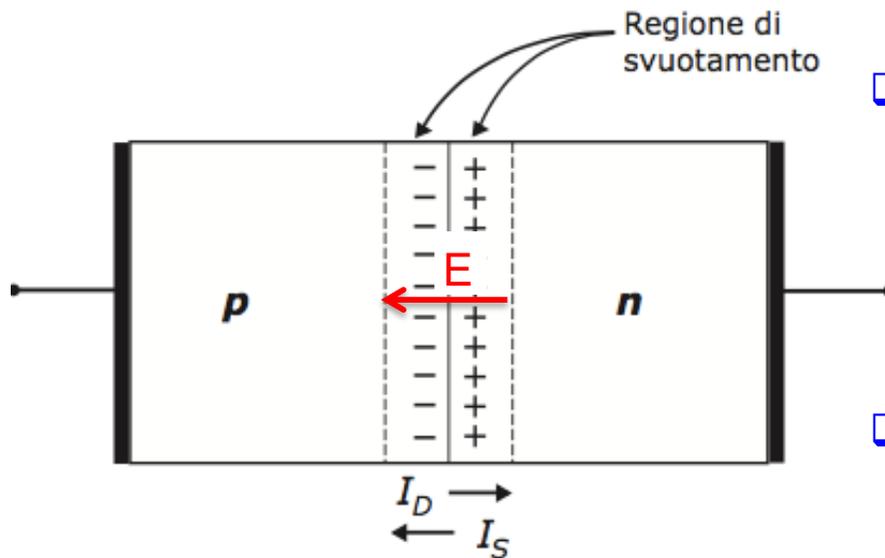


- Elettroni: portatori maggioritari ($n=10^{17} \text{ cm}^{-3}$)
- lacune: portatori minoritari ($p=10^3 \text{ cm}^{-3}$)
- Da notare, in questo caso, che n è indipendente dalla temperatura ma dipende solo dal drogaggio, mentre p dipende da T perché n_i è funzione della temperatura.
- Il semiconduttore rimane comunque globalmente neutro perché le cariche libere (maggioritarie e/o minoritarie) sono compensate dalle cariche fisse degli atomi ionizzati.

giunzione p-n

Semiconduttori: giunzione pn

- Mettiamo in “contatto” due regioni, una con drogaggio di tipo p e l'altra di tipo n



All'equilibrio

$$|I_D| = |I_S|$$

Corrente di diffusione I_D :

A causa della **diversa concentrazione** delle impurezze di tipo p o n di un lato rispetto all'altro, gli elettroni inizieranno a diffondere dal lato n verso p e le lacune in verso opposto, dando luogo ad una corrente di diffusione I_D ;

Regione di svuotamento:

gli elettroni che migrano dalla zona n, lasciano un eccesso di carica positiva, e lo stesso dicasi per le lacune. Si crea una regione di svuotamento priva di portatori di carica maggioritari liberi.

Barriera di potenziale V_0 :

a causa delle cariche elettriche in eccesso si forma un campo elettrico che si oppone al passaggio di altre cariche.

Corrente di deriva (drift) I_S (detta anche di saturazione):

nella regione n vi sono anche delle cariche minoritarie (lacune p) e nella regione p vi sono degli elettroni. Quando queste cariche si avvicinano alla regione di svuotamento, **a causa del campo elettrico** passano nell'altra regione.

Semiconduttori: giunzione pn

Si puo' dimostrare che la barriera di potenziale, V_o , e' data da

$$V_o = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

dove N_A e N_D sono le concentrazioni di impurezze nel lato p e nel lato n , mentre V_T e' il cosiddetto "equivalente in Volt della temperatura":

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$V_T = \frac{8.62 \cdot 10^{-5} [eV / K] \times 300 [K]}{1 \cdot e} \approx 25 \text{ mV}$$

Tipicamente, nel Silicio a temperatura ambiente V_o e' nell'intervallo $0.6 - 0.8 \text{ V}$.

Se il lato p e il lato n hanno la stessa concentrazione di impurezze (cioe' $N_A = N_D$) la regione di svuotamento si estende simmetricamente attorno alla giunzione. Ma in generale non e' cosi', N_A ed N_D sono spesso molto diversi. Si puo' facilmente dimostrare che lo spessore di svuotamento e' piu' grande nel lato meno drogato e che vi e' la relazione

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

Importante nel transistor

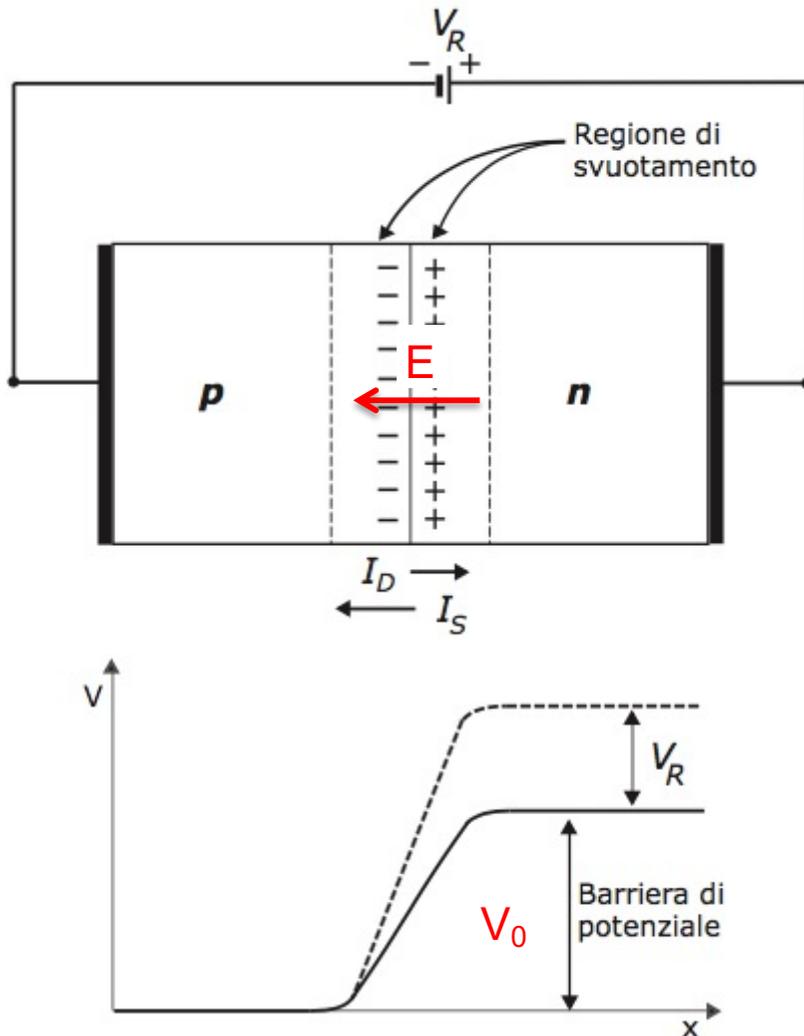
Lo spessore complessivo, W_s e' dato da

$$W_s = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_o}$$

dove ϵ_s e' la costante dielettrica del silicio ($\epsilon_s = 11.7\epsilon_o$). Tipicamente W_s e' dell'ordine di $0.1 \div 1 \mu m$.

giunzione pn polarizzata inversamente

- Collegiamo ora alla giunzione un generatore esterno V_R come in figura (positivo sulla zona n):



$$C_s = \epsilon_s \cdot \frac{A}{W_s} \quad (\text{dell'ordine dei pF})$$

Corrente di diffusione I_D :

La tensione esterna si aggiunge alla barriera di potenziale; è sufficiente un piccolissimo valore di V_R per annullare completamente la corrente di diffusione: $I_D \approx 0$.

Corrente di deriva (drift) I_S (detta anche di saturazione):

la corrente di deriva è dovuta ai portatori di carica **minoritari** e non è influenzata dalla tensione esterna ma dipende solo dalla temperatura.

Corrente totale:

in queste condizioni la corrente totale che attraversa la giunzione è uguale a:

$$I = I_S - I_D \approx I_S$$

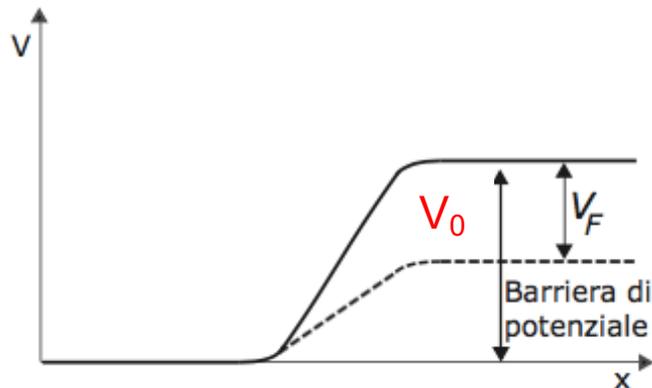
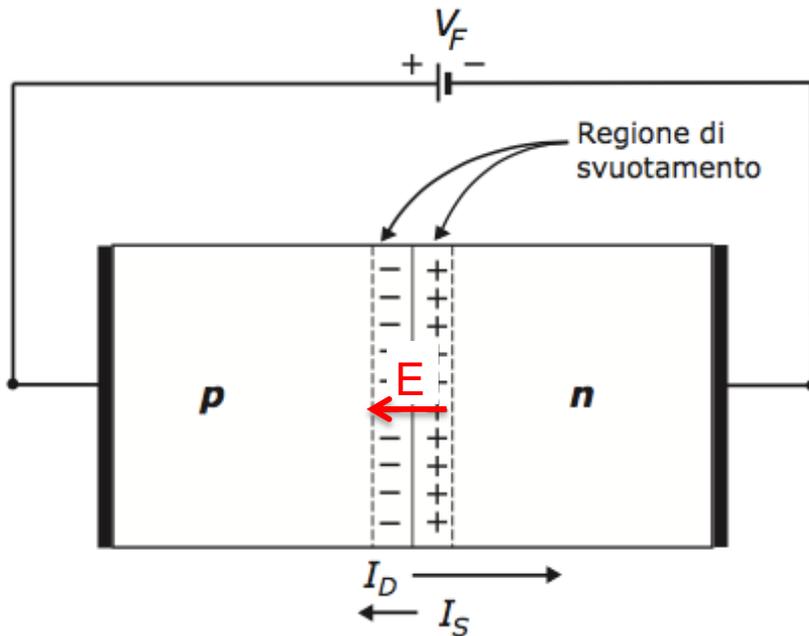
- La regione di svuotamento si allarga al crescere di V_R

$$W_s = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V_R)}$$

- Il doppio strato ha una capacità che dipende da V_R ;
- Aumentando V_R (80÷100 V) la giunzione si rompe**

giunzione pn polarizzata direttamente

- Collegiamo ora alla giunzione un generatore esterno V_F come in figura (positivo sulla zona p):



Anche nel caso di polarizzazione diretta si ha una capacità della giunzione, che è un ordine di grandezza più grande rispetto al caso precedente

Corrente di diffusione I_D :

La tensione esterna diminuisce la barriera di potenziale, quindi la corrente I_D , dovuta alla diffusione dei portatori **maggioritari** attraverso la barriera, aumenta.

Corrente di deriva (drift) I_S (detta anche di saturazione):

la corrente di deriva dovuta ai portatori di carica **minoritari** non cambia (dipende solo da T).

Corrente totale:

la corrente totale che attraversa la giunzione va da p a n; il suo valore dipende dalla tensione V_F :

$$I = I_D - I_S$$

- Quando V_F supera V_0 la barriera è completamente annullata e la giunzione si comporta approssimativamente come un conduttore. La corrente si può esprimere come:

$$I = I_s \left(e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right)$$

$$\eta \approx 2$$

- η è un fattore empirico che dipende dal materiale.

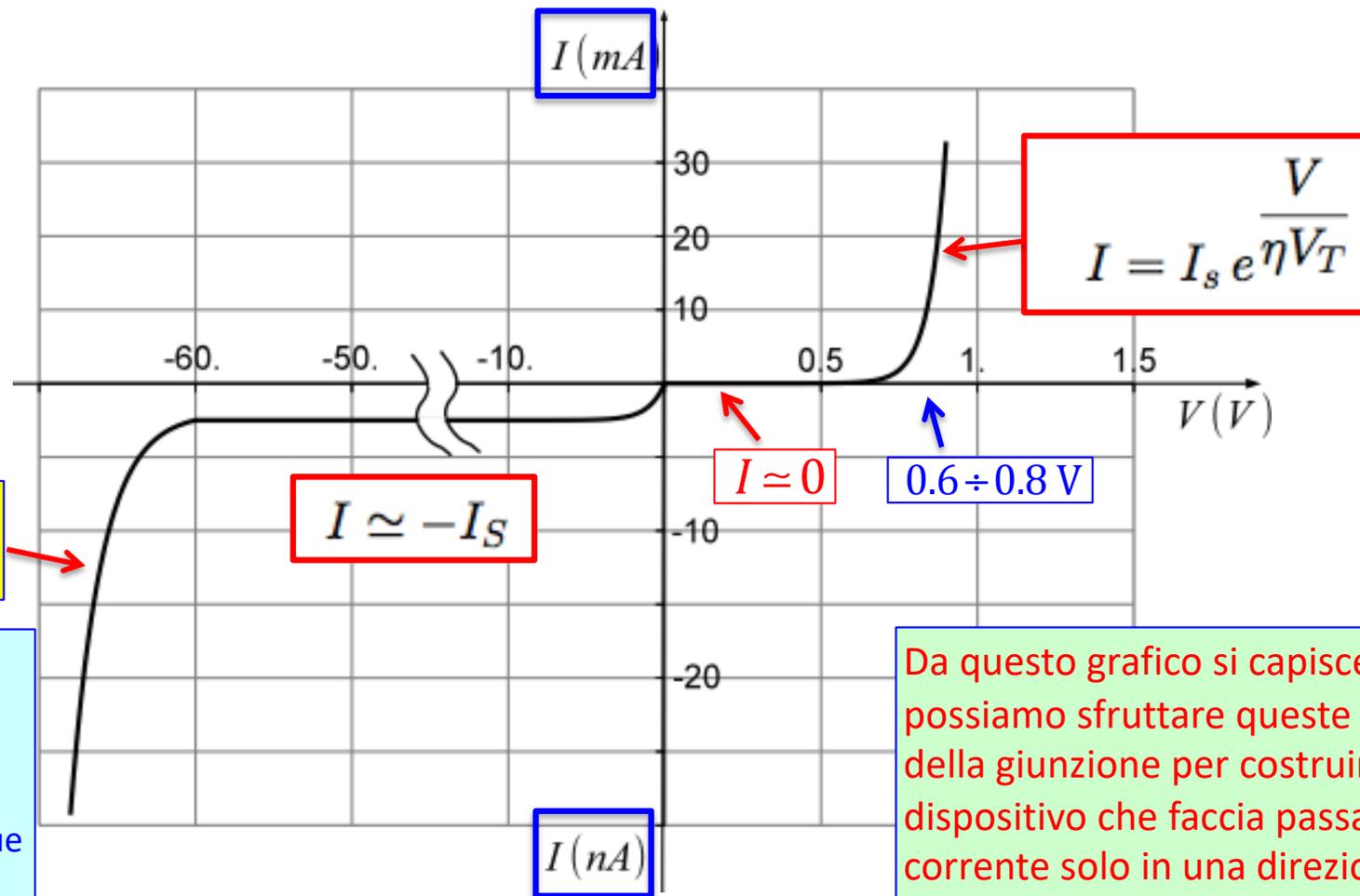
Equazione della corrente nella giunzione

- L'equazione precedente può descrivere la corrente sia per la polarizzazione diretta che inversa:

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

Polarizzazione diretta: V **positivo**
Polarizzazione inversa: V **negativo**

$$V_T \approx 25 \text{ mV a } T=300 \text{ K}$$



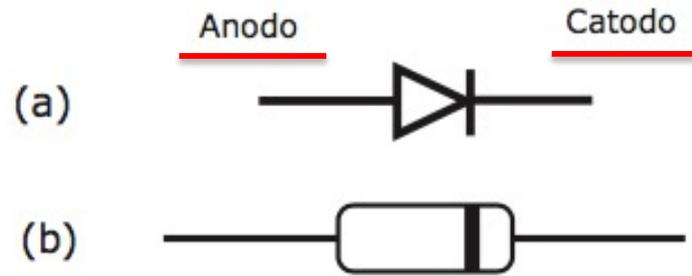
I diodi **Zener** lavorano in questa regione in modo da avere ai loro capi sempre la stessa tensione per qualunque corrente li attraversi

Da questo grafico si capisce come possiamo sfruttare queste proprietà della giunzione per costruire un dispositivo che faccia passare la corrente solo in una direzione.

Diodo a semiconduttore

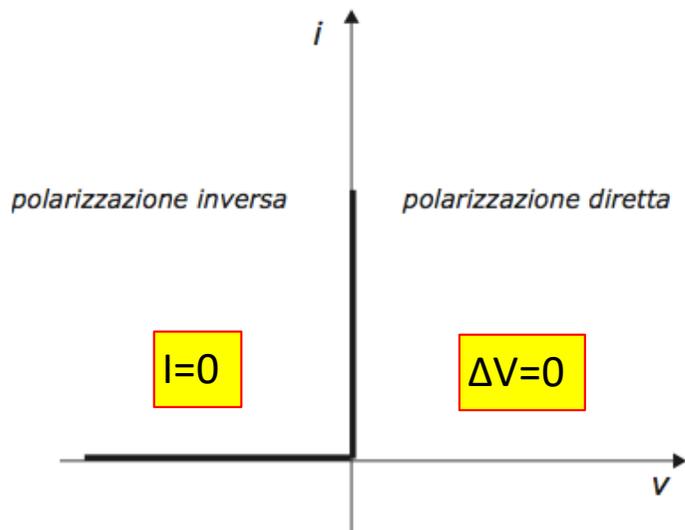
Diode ideale

- Il diodo ideale è un dispositivo che lascia passare corrente solo in un senso, con resistenza nulla, e non lascia passare corrente nell'altro senso. Il diodo a giunzione approssima molto bene un diodo ideale.



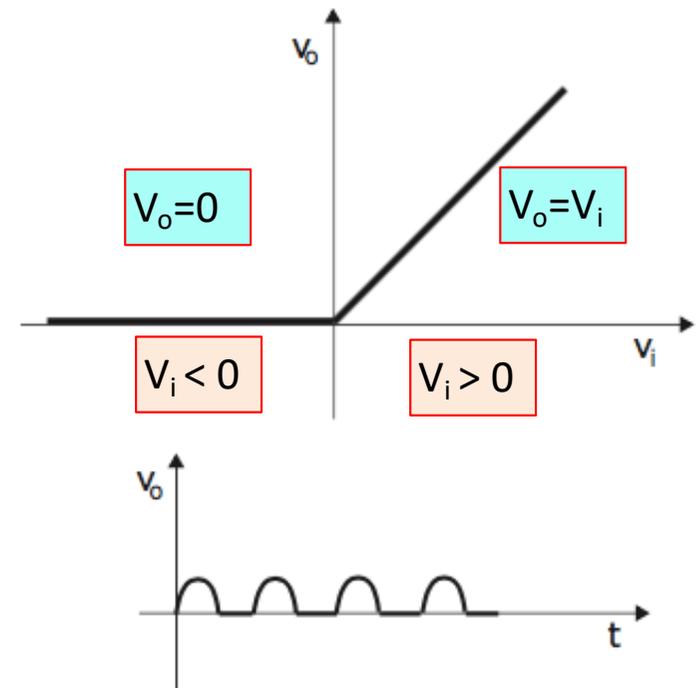
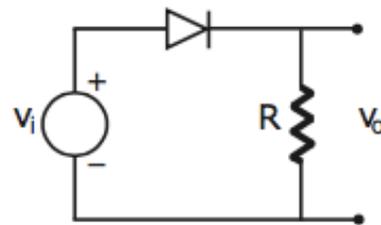
Il diodo a giunzione (a) Simbolo circuitale: il verso della freccia va dal lato p (anodo) al lato n (catodo);
 (b) Diodo commerciale: un contenitore cilindrico lungo alcuni mm, con due conduttori metallici. Una fascia colorata, o nera, contraddistingue il catodo

Caratteristica diodo ideale



Il diodo NON è un dispositivo lineare

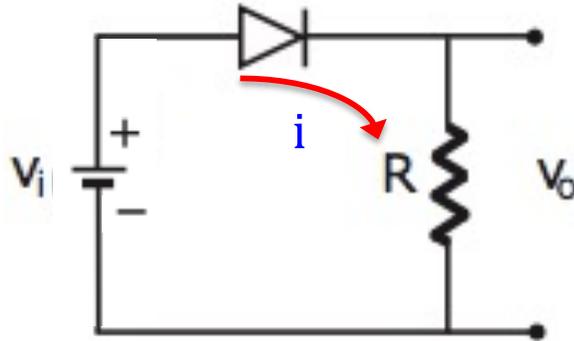
Circuito con un diodo ideale



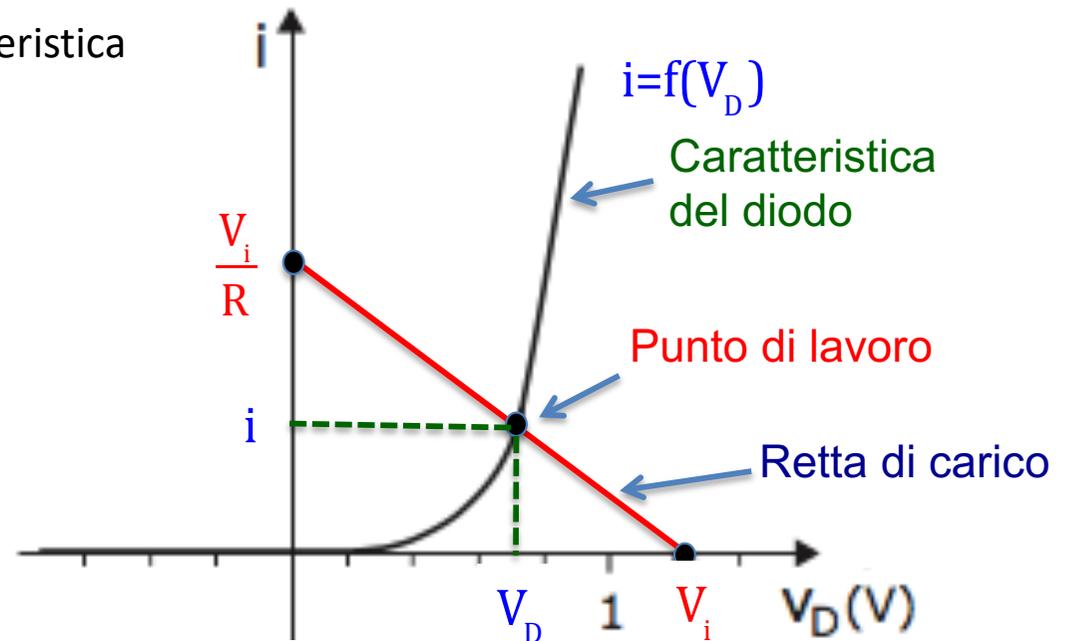
La semionda negativa è stata tagliata

Circuito con diodo reale

- Analizziamo lo stesso circuito usando la caratteristica del diodo reale.

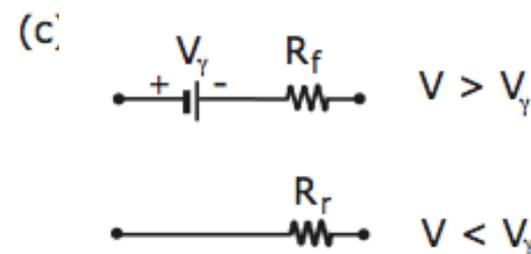
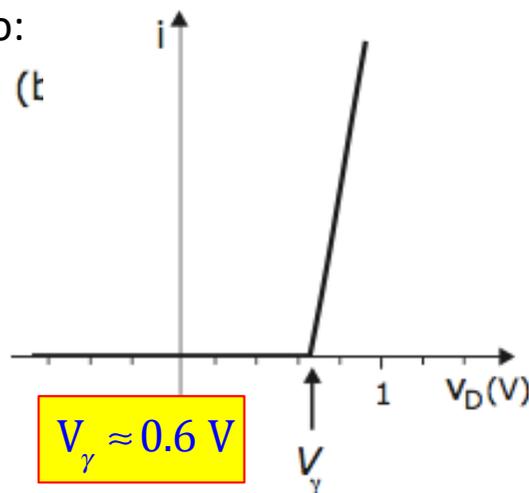


$$\begin{cases} V_i = V_D + R \cdot i & \text{Eq. retta di carico} \\ i = f(V_D) & \text{Caratteristica del diodo} \end{cases}$$



Si può risolvere il sistema per via grafica

- Per risolvere il sistema in via analitica occorre fare delle approssimazioni per la caratteristica del diodo. Ad esempio:



Oppure, come nel caso della V_{BE} del BJT

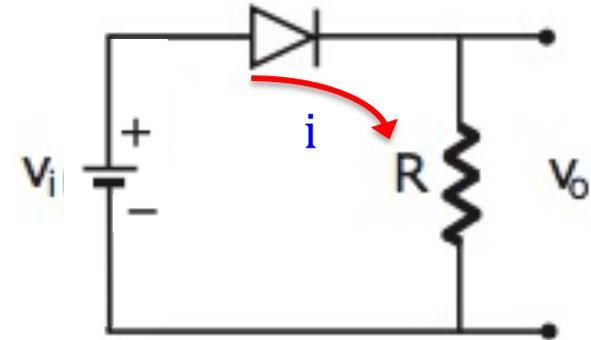
$$V_\gamma \approx 0.7 \text{ V e } R_F = 0$$

Prima esercitazione: caratteristica del diodo

- Nella prima esercitazione dovrete ricavare la caratteristica del diodo.

Dovete misurare:

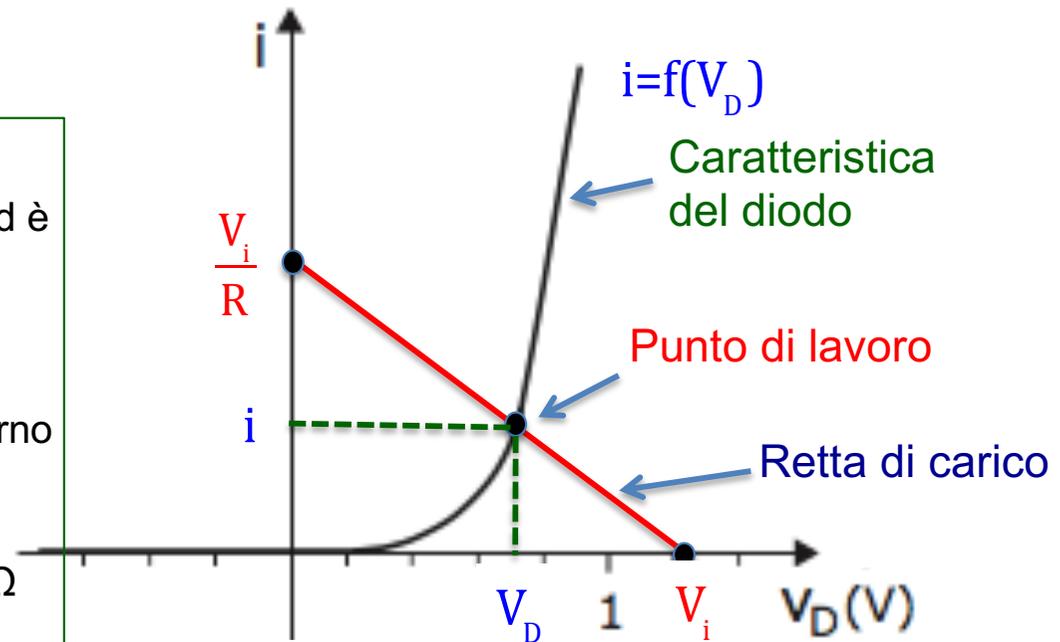
- la tensione ai capi del diodo (con il voltmetro)
 - la corrente che scorre nel diodo (con il voltmetro, misurando la tensione ai capi della resistenza e utilizzando la legge di Ohm).
- Dovete valutare i valori migliori di R e V_i per effettuare la misura**
 - **hint: la retta di carico non deve essere né troppo "verticale" e né troppo "orizzontale"**
 - **quindi dovrete variare sia V_i che R per costruire la curva completa come illustrata in figura, tenendo presente che è più facile verificare V_i .**



$$V_i = V_D + R \cdot i$$

Ricordate che:

- i è dell'ordine del mA al di sopra di V_γ ed è quasi zero al di sotto
- Se variate V_i la retta di carico si sposta parallelamente a sé stessa
- variando R la retta di carico "ruota" intorno a V_i .
- Nel tratto iniziale provate con una V_i "piccola" (1 o 2 V) e R dell'ordine del k Ω (o più grande)



Provare a ricavare R_F dal grafico

Raddrizzatore a singola semionda

- Vediamo un esempio di utilizzo del diodo, ovvero come convertire un segnale alternato in un segnale continuo:

- **Semionda positiva:**

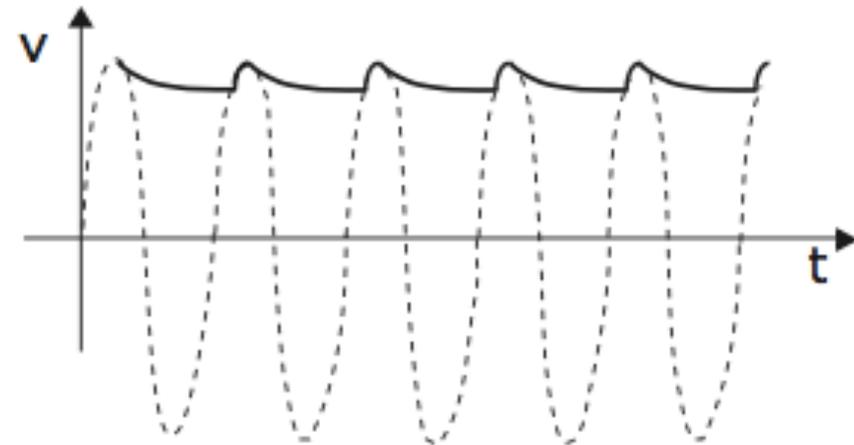
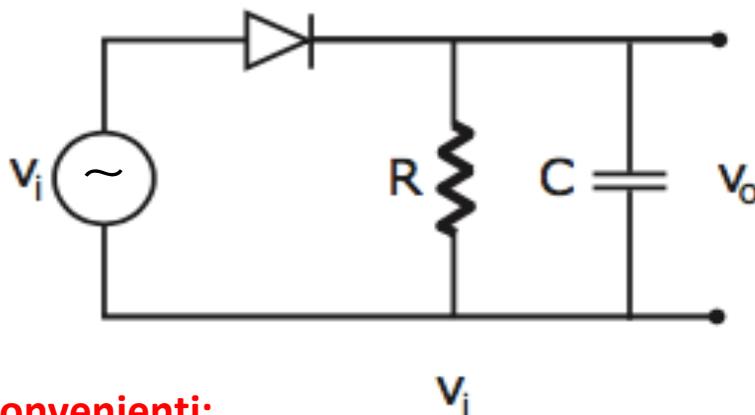
Il diodo lascia passare la corrente e il condensatore si carica;

- **Semionda negativa:**

il diodo non lascia passare la corrente e si comporta di fatto come un circuito aperto. Il condensatore si scarica sulla resistenza R con una costante di tempo pari a RC.

- **Nuova semionda positiva:**

se la costante di tempo $\tau=RC$ è molto maggiore del periodo T della sinusoide, il condensatore non farà in tempo a scaricarsi e tornerà a caricarsi di nuovo, e così via.



- **Inconvenienti:**

- non si sfrutta la semionda negativa, quindi si utilizzano altri circuiti, tipo il ponte dei diodi;
 - rimane comunque un segnale periodico sovrapposto al segnale continuo, quindi occorrono dei filtri (passa basso) per eliminarlo.



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Fine del capitolo 2