



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Giunzione metallo-semiconduttore e semiconduttore-semiconduttore e loro applicazioni

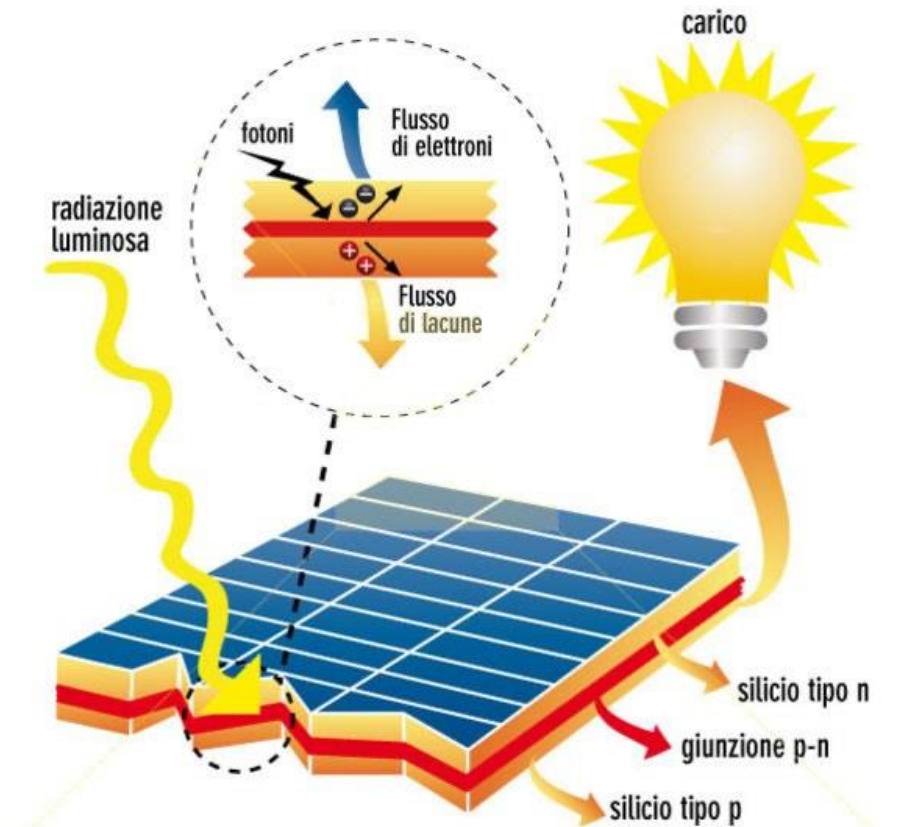
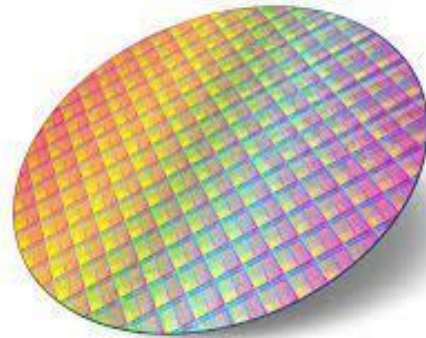
Andrea Baciami

**Corso di Laurea in
Scienza dei Materiali**

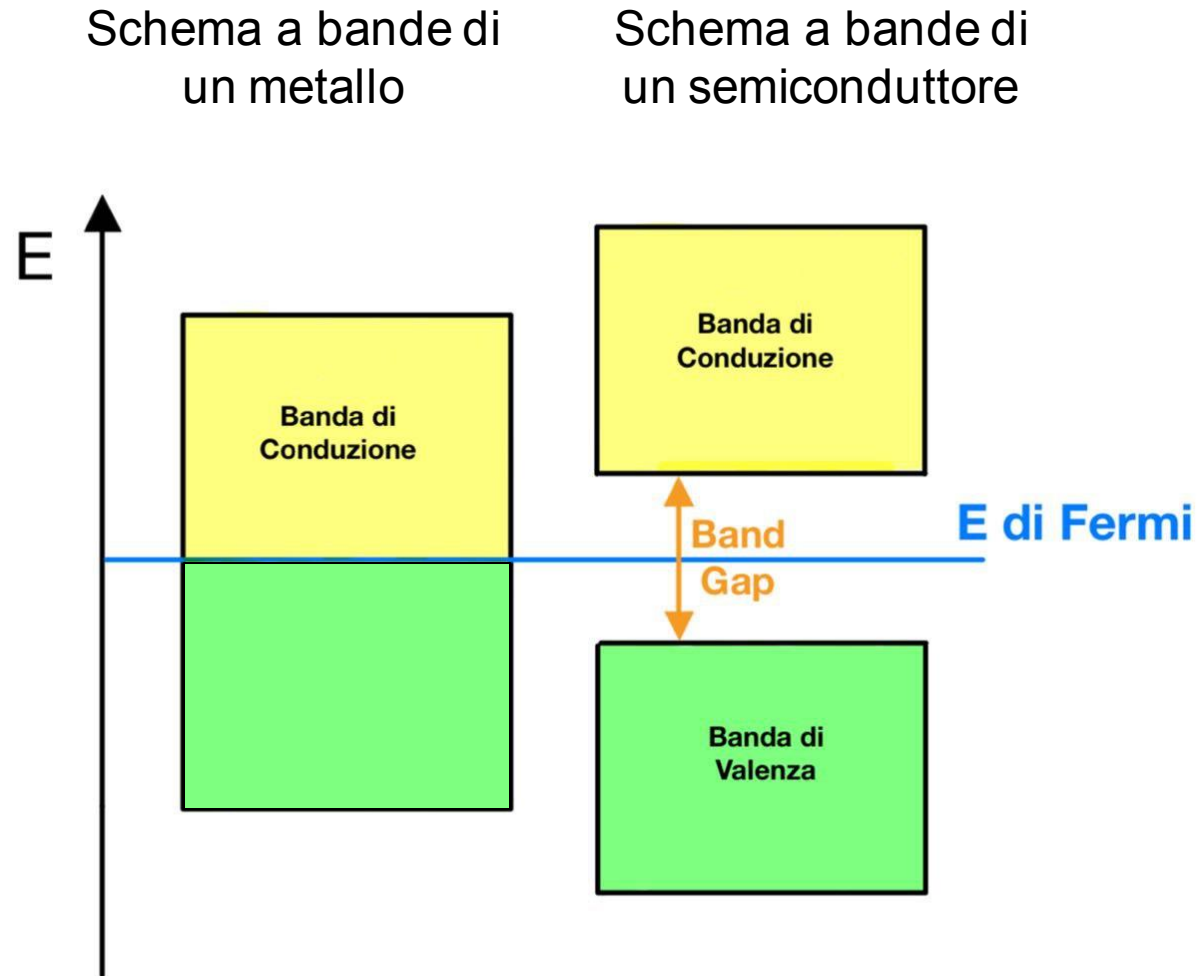
Relatore: Antonella Glisenti

Docente tutor: Giovanni Mattei

- Struttura a bande
- Drogaggio di un semiconduttore
- Giunzione PN
- Applicazione di un bias
- Giunzione metallo-semiconduttore
- Applicazioni



Struttura a bande^[1]



Potenziale chimico:

$$\mu(T) = \left. \frac{\partial G}{\partial N} \right|_{T,P}$$

$$\mu(0) = E_F$$

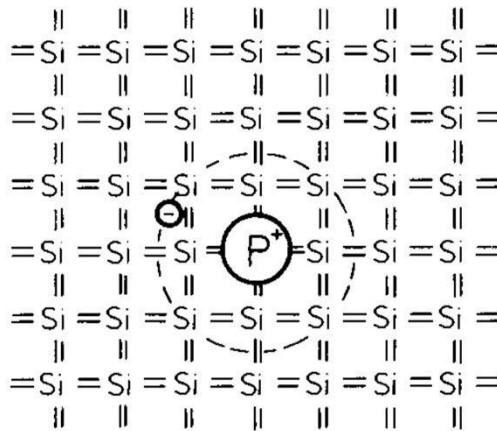
All'equilibrio, in una giunzione tra due materiali, $\mu(T)$ è costante nei due sistemi

[1] Ibach e Lüth, *Solid-State Physics - An Introduction to Principles of Materials Science* (Springer, 2009)

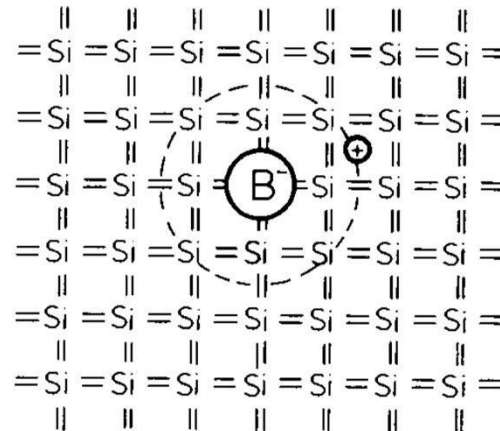
Drogaggio di un semiconduttore^[1]

Il drogaggio consiste nell'immettere delle impurezze all'interno del semiconduttore al fine di aumentare la concentrazione di portatori di carica

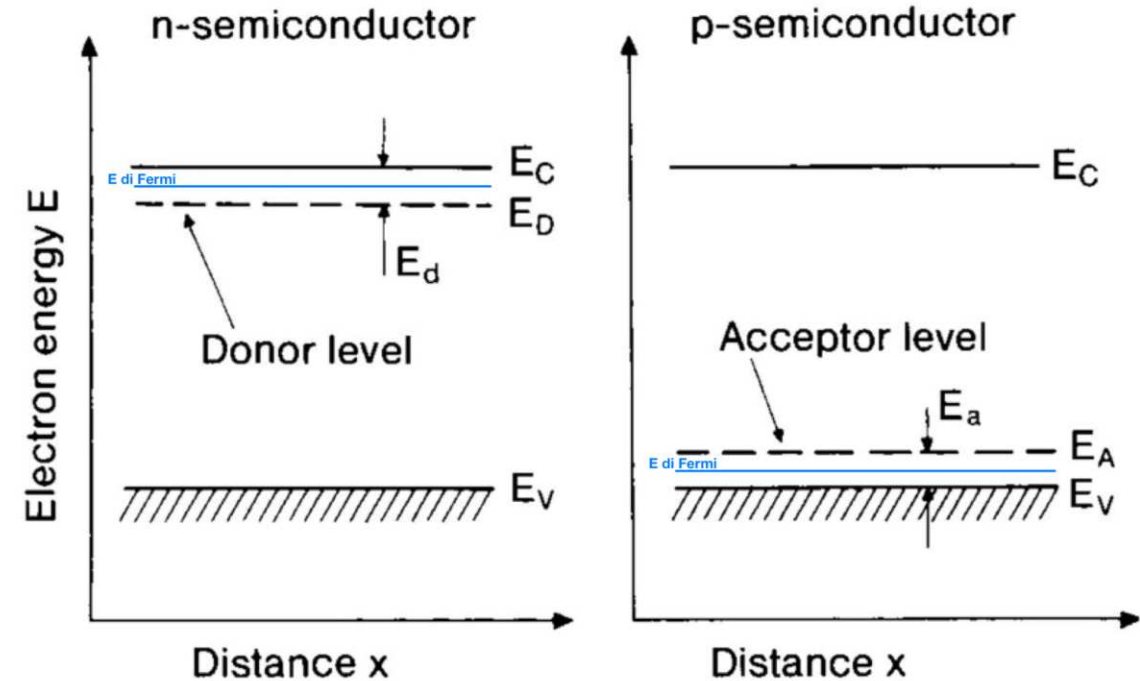
- Donori
- Accettori



Silicio drogato n



Silicio drogato p



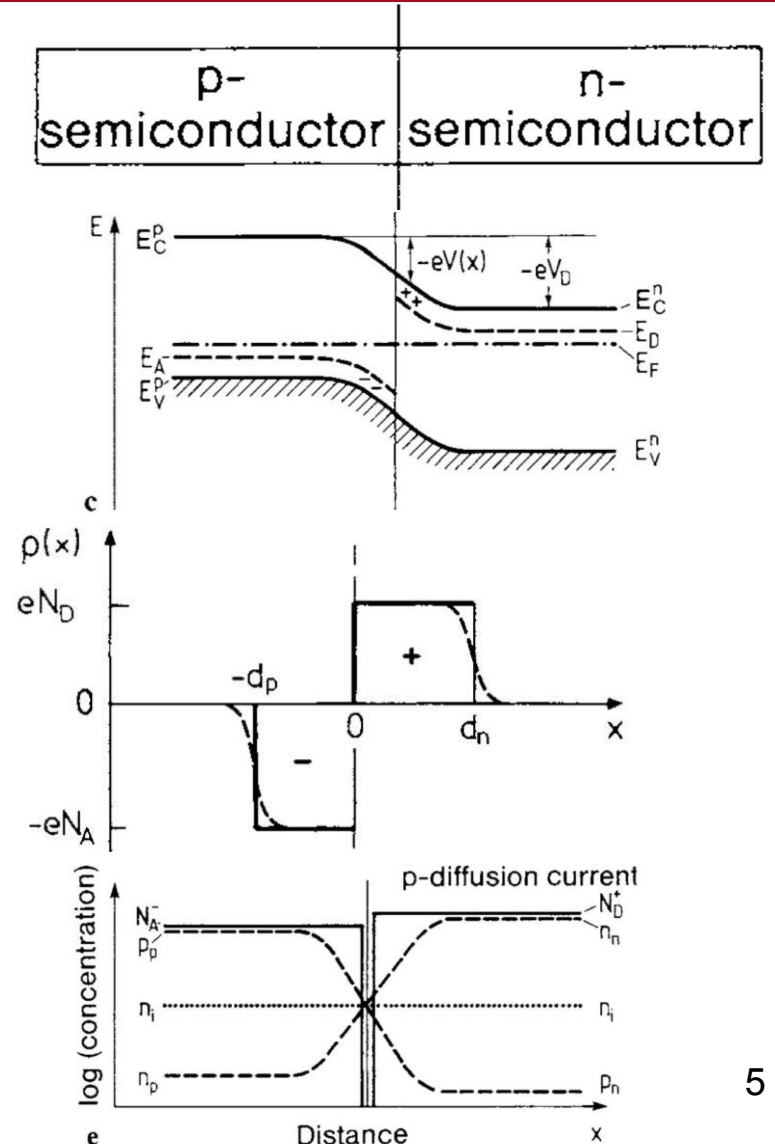
Giunzione PN_[1]

Partendo dall'equazione di Poisson è possibile descrivere il comportamento della giunzione tra due semiconduttori

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon \epsilon_0} \quad \text{Eq. di Poisson}$$

E' necessario conoscere la funzione carica spaziale $\rho(x)$ per cui si usa l' approssimazione del «*modello di Schottky nella regione di carica spaziale*» per cui:

$$\rho(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < -d_p \\ -eN_A & \text{se } -d_p < x < 0 \\ eN_D & \text{se } 0 < x < d_n \\ 0 & \text{se } x > d_n \end{cases}$$



Giunzione PN_[1]

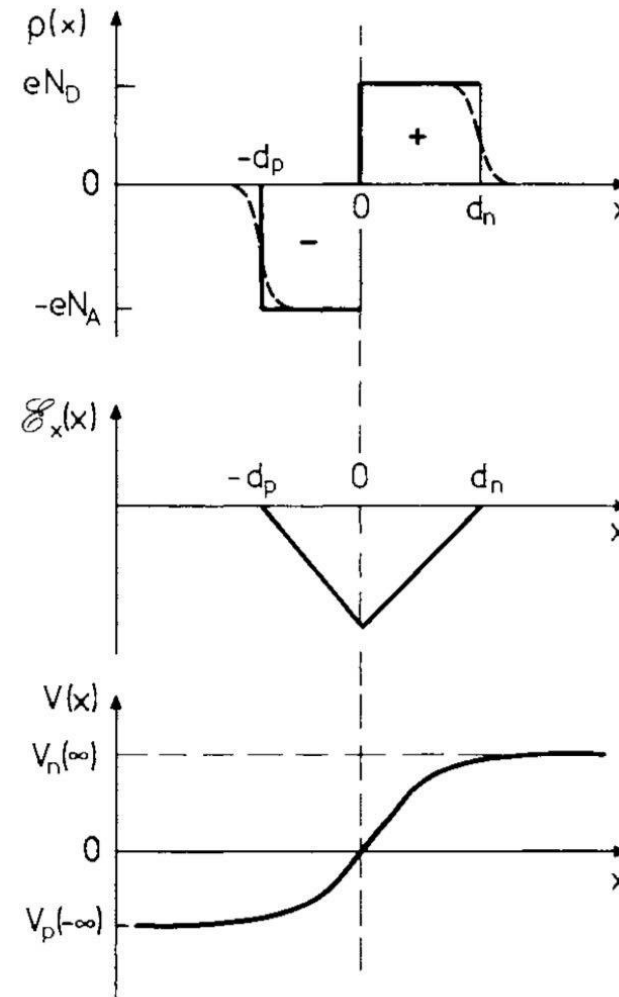
Dall'eq. Di Poisson si può facilmente ottenere il campo elettrico $E(x)$ generato dalla giunzione

$$E(x) = -\frac{e N_D}{\varepsilon \varepsilon_0} (d_n - x)$$

Da cui si ricava la forma del potenziale $V(x)$

$$V(x) = V_n(\infty) - \frac{e N_D}{2 \varepsilon \varepsilon_0} (d_n - x)^2$$

Che permette di descrivere la curvatura delle bande lungo la space charge zone



Applicazione di un bias esterno^[1]

L'applicazione di un bias esterno U possiede diversi effetti:

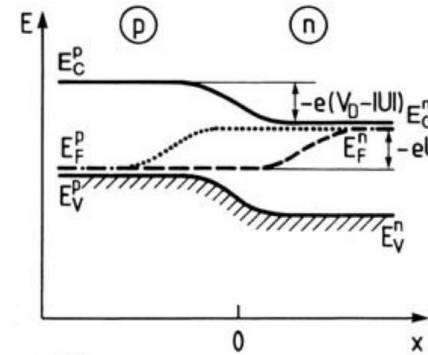
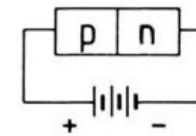
- Modificare il potenziale di diffusione $V_n(\infty) - V_p(\infty) = V_D - U$

- Modifica le dimensioni della space charge zone

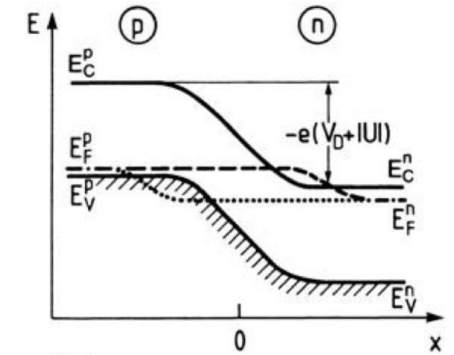
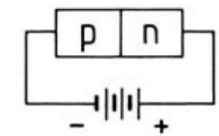
$$d_n = d_n^0 \left(1 - \frac{U}{V_D}\right)^{1/2} \quad (\text{analogo per } d_p)$$

- Influenza la corrente di ricombinazione $I_n^{rec} \propto \exp\left(\frac{-e(V_D - U)}{K_B T}\right)$; mentre quella di generazione I_n^{gen} non viene influenzata

Forward bias



Reverse bias



Applicazione di un bias esterno^[1]

La corrente risultante dei portatori di carica n (sarebbe analogo per i p) è dato dalla somma di I_n^{rec} e I_n^{gen} .

Sapendo che I_n^{gen} non è influenzata da U, si può approssimare che

$$I_n^{rec}(U = 0) \sim I_n^{gen}(U \neq 0);$$

Mentre

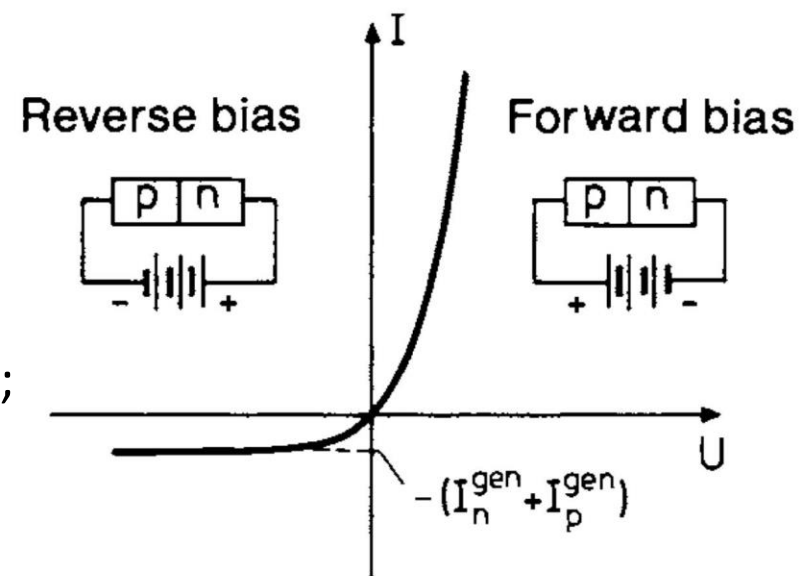
$$I_n^{rec} \propto \exp\left(\frac{-e(V_D - U)}{K_B T}\right) \rightarrow I_n^{rec} = I_n^{gen} \exp\left(\frac{e U}{K_B T}\right);$$

Sommando le due componenti

$$I_n = I_n^{rec} - I_n^{gen} = I_n^{gen} \left[\exp\left(\frac{e U}{K_B T}\right) - 1 \right]$$

Per determinare la corrente risultante all'interno della giunzione è sufficiente sommare la componente delle buche a quella degli elettroni

$$I(U) = I_n + I_p = (I_n^{gen} + I_p^{gen}) \left[\exp\left(\frac{e U}{K_B T}\right) - 1 \right]$$



Applicazione di un bias esterno^[1]

Per determinare I_p (può essere fatto analogamente per I_n) usiamo la «diffusion current approximation»

La corrente di diffusione è descritta come segue

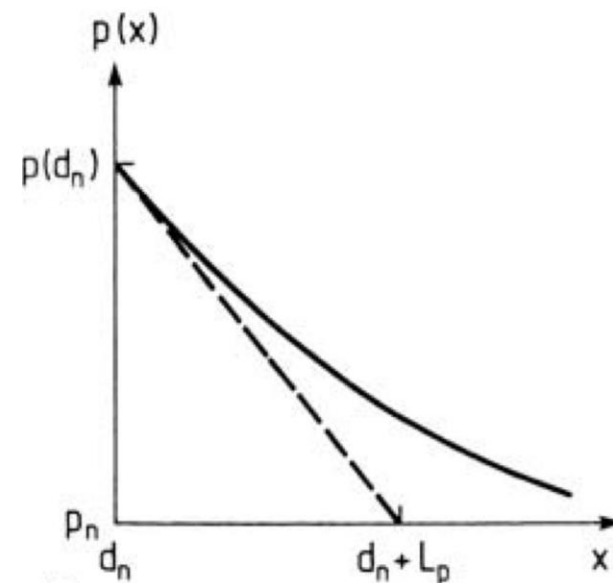
$$j_p^{dif} = -eD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Dove p è la concentrazione di buche ed è proporzionale all'eq. Di Boltzmann

$$p = p(d_n) - p_n = p_n \left[\exp\left(\frac{eU}{K_B T}\right) - 1 \right]$$

Sviluppando la derivata e sommando il contributo degli elettroni si ottiene

$$j(U) = \left(\frac{eD_p}{L_p} p_n + \frac{eD_n}{L_n} n_p \right) \left[\exp\left(\frac{eU}{K_B T}\right) - 1 \right]$$



Giunzione metallo-semiconduttore^[1]

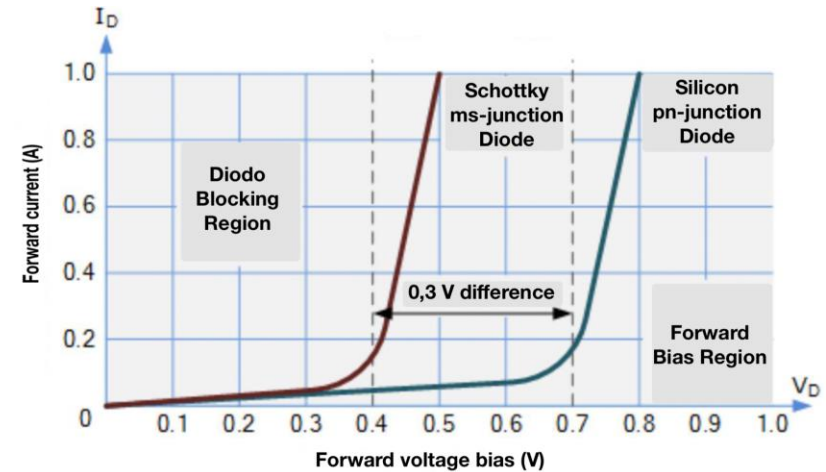
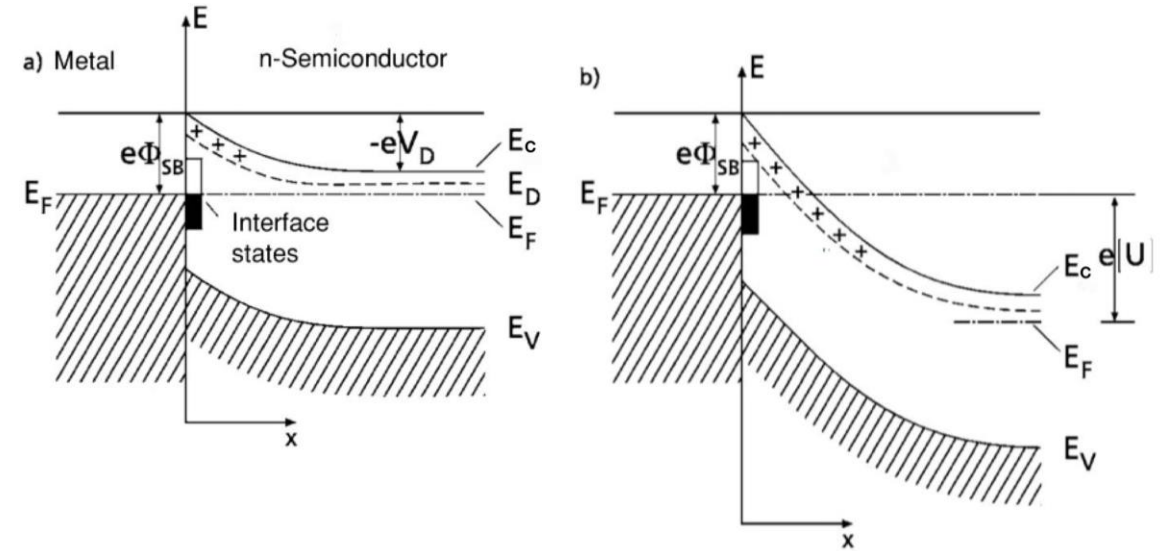
Si formano dei MIGS (metal induced gap states), possono formarsi vicino alla:

- VB: (-) se occupati da elettroni
- CB: (+) se occupati da buche

Applicando un bias esterno si modifica l' E_F lungo la giunzione creando un'interfaccia

- (-) se $E_F > E_F^0$
- (+) se $E_F < E_F^0$

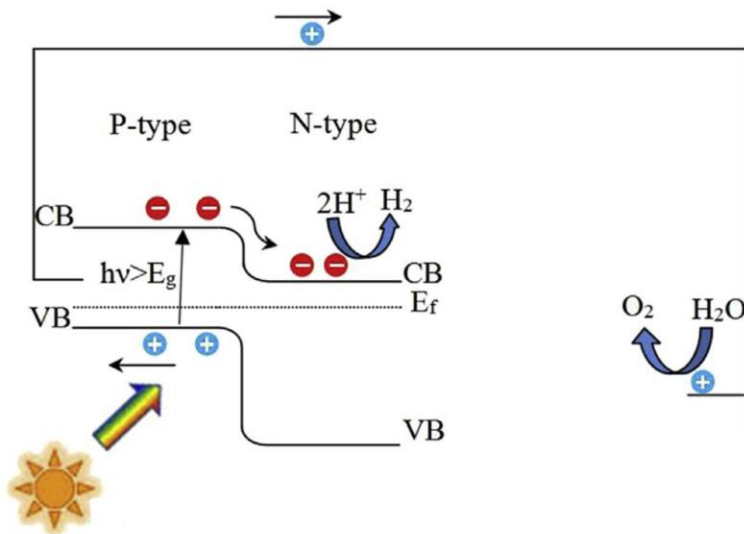
Barriera di Schottky ($e\phi_{SB}$): barriera energetica che gli elettroni devono superare per passare dal metallo al semiconduttore



Water splitting e fotocatalisi [2]

Le giunzioni PN possono essere usate al fine di migliorare questi processi: aumentando il tempo prima della ricombinazione dei portatori di carica.

Esempio: ZnS (n-type) depositato su CuS (p-type)



Meccanismo di water splitting con una giunzione PN (CuS-ZnS)

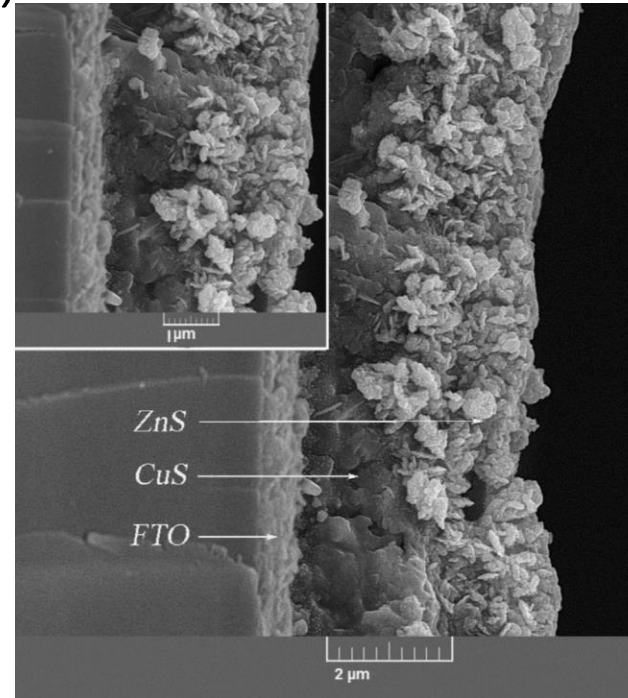
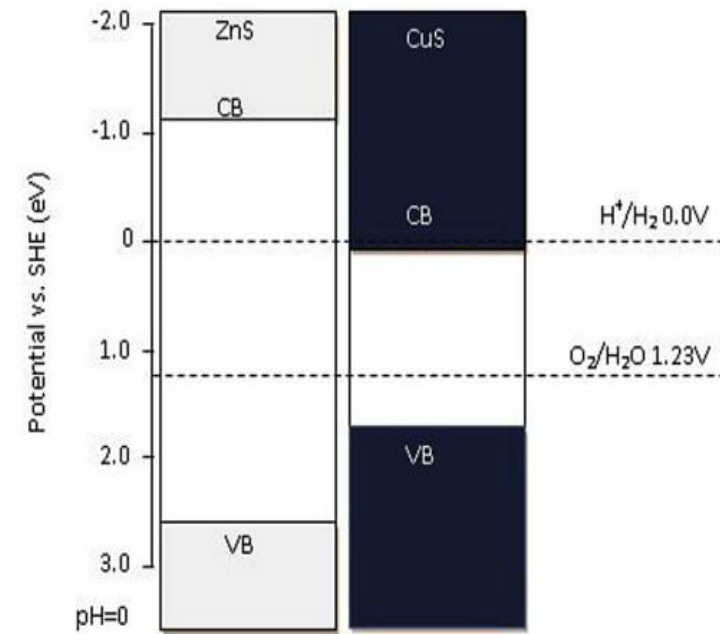


Immagine FESEM della giunzione PN



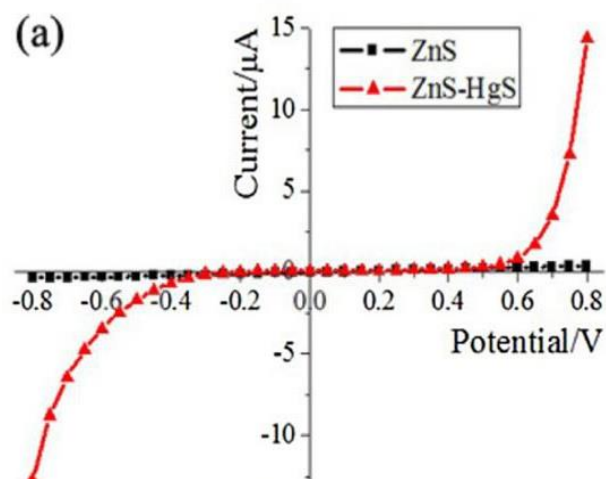
Allineamento delle bande a pH=0

Sensori fotoelettrochimici^[3]

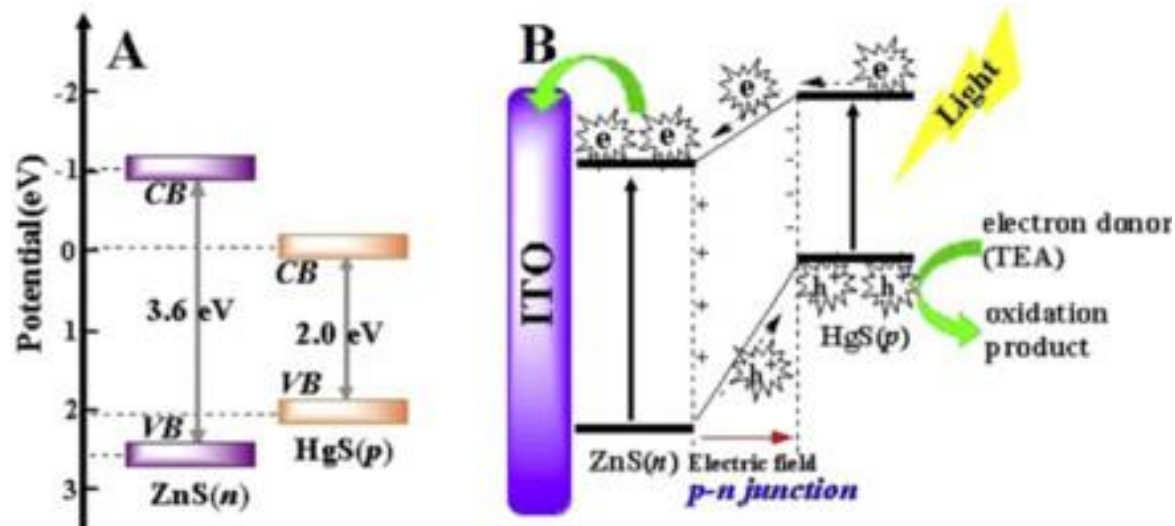
Questi sensori rilevano la concentrazione dell'analita in funzione della variazione della corrente fotogenerata, anche in questo caso l'utilizzo di una giunzione PN permette di ridurre notevolmente la ricombinazione dei portatori di carica.

Esempio: Cys capped ZnS quantum dots (n-type) su cui viene depositato su HgS (p-type)

Questa tecnologia ha lo scopo di determinare la concentrazione di mercurio nelle acque

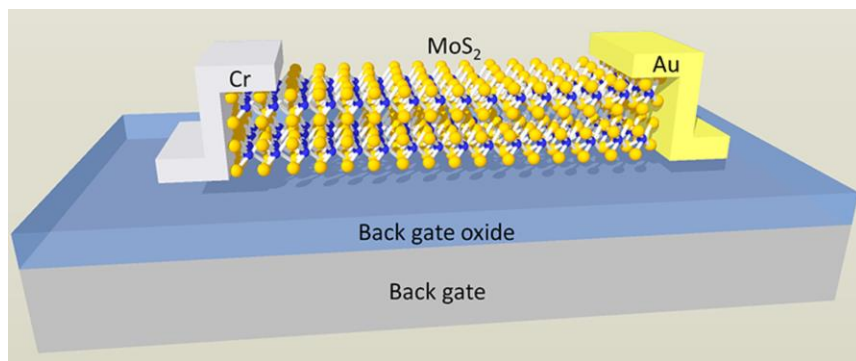


Curva I-V che mette a confronto il sistema con la giunzione PN e senza

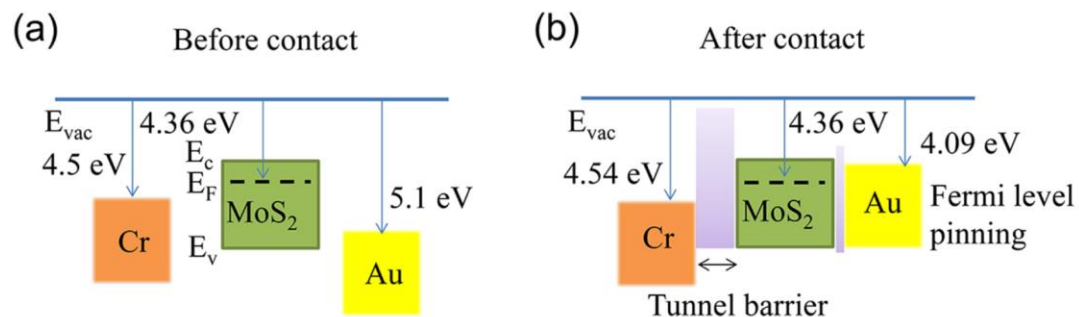


A) Schema della struttura a bande senza giunzione, B) schema del meccanismo di generazione della fotocorrente

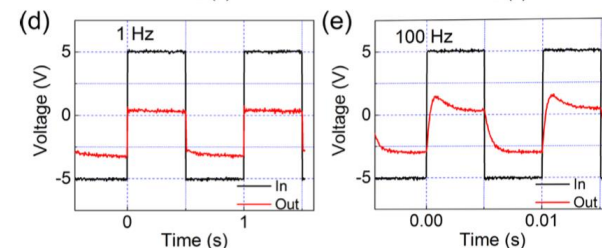
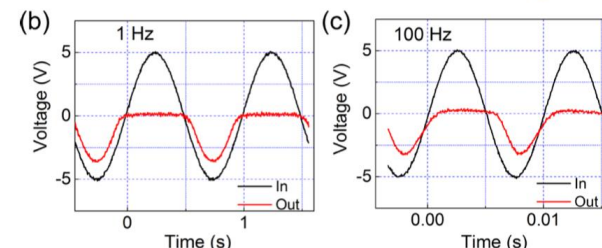
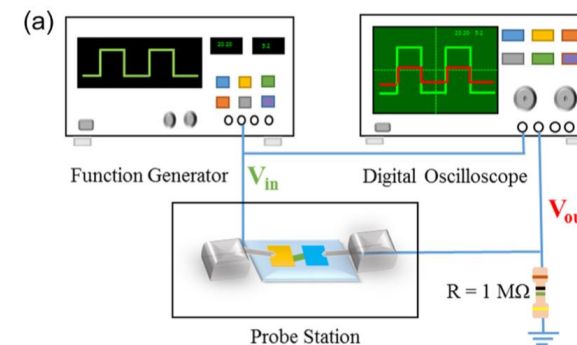
Diodo Schottky per attività di rettificazione elettrica [4]



Schema del transistor



Struttura a bande prima (a) e dopo (b) il contatto



(a) Schema del circuito su cui è stato testato il diodo schottky, (b,c,d,e) grafici V-t a 1Hz e 100Hz che dimostrano le capacità di rettificazione del diodo



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Bibliografia

- [1] *Ibach e Lüth, Solid-State Physics - An Introduction to Principles of Materials Science (Springer, 2009)*
- [2] *Heidari et al., Application of CuS–ZnS PN Junction for Photoelectrochemical water splitting, Int. J. Hydrogen Energy 42, 9545 (2017)*
- [3] *Wang et al., In Situ Formation of p–n Junction, A Novel Principle for photoelectrochemical sensor and its application for mercury(II) ion detection, Analytica Chimica Acta 827, 34 (2014)*
- [4] *Jing Yuan-Wu et al., Electrical rectifying And Photosensing Property of Schottky Diode, ACS Appl. Mater. Interfaces 10, 24613 (2018)*