

FORMULARIO DI FONDAMENTI DI BIOELETTRONICA

A.A. 2025-2026

Il presente formulario può essere utilizzato durante le prove d'esame, privo di qualsivoglia modifica.
Formulari modificati con appunti personali saranno requisiti.

COSTANTI (da utilizzarsi qualora il testo non le specificasse altrimenti)

Costanti universali

Costante	Simbolo	Unità di misura	Valore
Costante dielettrica del vuoto	ϵ_0	F/cm	$8.85 \cdot 10^{-14}$
Costante di Boltzmann	k_B	J/K	$1.38 \cdot 10^{-23}$
Carica elementare	q	C	$1.6 \cdot 10^{-19}$

Proprietà del Silicio e dei suoi composti (valori a temperatura ambiente, ove necessario)

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità intrinseca dei portatori	n_i	cm^{-3}	$1.45 \cdot 10^{10}$
Costante dielettrica	$\epsilon_{r,Si}$		11.9
Costante dielettrica dell'ossido di Silicio	$\epsilon_{r,ox}$		3.5
Band gap	E_g	eV	1.12
Affinità elettronica	χ	eV	4.05
Densità effettiva degli stati in banda di valenza	N_V	cm^{-3}	$1.04 \cdot 10^{19}$
Densità effettiva degli stati in banda di conduzione	N_C	cm^{-3}	$2.8 \cdot 10^{19}$

Proprietà del Germanio (valori a temperatura ambiente, ove necessario)

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità intrinseca dei portatori	n_i	cm^{-3}	$2.4 \cdot 10^{10}$
Costante dielettrica	$\epsilon_{r,Ge}$		16
Band gap	E_g	eV	0.66
Affinità elettronica	χ	eV	4.0
Densità effettiva degli stati in banda di valenza	N_V	cm^{-3}	$6.0 \cdot 10^{18}$
Densità effettiva degli stati in banda di conduzione	N_C	cm^{-3}	$1.04 \cdot 10^{19}$

Proprietà dell'Arseniuro di Gallio (valori a temperatura ambiente, ove necessario)

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità intrinseca dei portatori	n_i	cm^{-3}	$1.79 \cdot 10^6$
Costante dielettrica	$\epsilon_{r,GaAs}$		13.1
Band gap	E_g	eV	1.424
Affinità elettronica	χ	eV	4.07
Densità effettiva degli stati in banda di valenza	N_V	cm^{-3}	$7.0 \cdot 10^{18}$
Densità effettiva degli stati in banda di conduzione	N_C	cm^{-3}	$4.7 \cdot 10^{17}$

FORMULE PER I SEMICONDUTTORI

Descrizione	Unità di Misura	Formula
Densità intrinseca dei portatori	cm^{-3}	$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_G}{2k_B T}\right)$
Densità dei donori in funzione della posizione del livello di Fermi	cm^{-3}	$N_D = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right)$
Densità degli accettori in funzione della posizione del livello di Fermi	cm^{-3}	$N_A = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$
Densità degli elettroni in funzione della posizione del livello di Fermi	cm^{-3}	$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_B T}\right)$
Densità delle lacune in funzione della posizione del livello di Fermi	cm^{-3}	$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{k_B T}\right)$
Distanza tra livello di Fermi e bottom banda di conduzione in un semiconduttore drogato n (ipotesi di completa ionizzazione)	eV	$E_C - E_F = k_B T \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$
Distanza tra livello di Fermi e top della banda di valenza in un semiconduttore drogato p (ipotesi di completa ionizzazione)	eV	$E_F - E_V = k_B T \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right)$
Distanza tra livello di Fermi e livello intrinseco in un semiconduttore drogato n (ipotesi di completa ionizzazione)	eV	$E_F - E_i = k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$
Distanza tra livello di Fermi e livello intrinseco in un semiconduttore drogato p (ipotesi di completa ionizzazione)	eV	$E_i - E_F = k_B T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$
Diffusività in base alla legge di Einstein	cm^2/s	$D = \frac{k_B T}{q} \mu$
Tempo di ricombinazione	s	$\tau_r = \frac{1 + \frac{2n_i}{n_n} \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{k_B T}\right)}{v_{th} \sigma_0 N_t}$
Tempo di generazione	s	$\tau_g = \frac{2 \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{k_B T}\right)}{v_{th} \sigma_0 N_t}$
Funzione lavoro (drogaggio p)	eV	$q\Phi_{S,p} = q\chi + E_g - E_F - E_V _p = q\chi + E_g - k_B T \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right)$ $= q\chi + \frac{E_g}{2} + E_i - E_F _p = q\chi + \frac{E_g}{2} + k_B T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$
Funzione lavoro (drogaggio n)	eV	$q\Phi_{S,n} = q\chi + E_C - E_F _n = q\chi + k_B T \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$ $= q\chi + \frac{E_g}{2} - E_F - E_i _p = q\chi + \frac{E_g}{2} - k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$
Lunghezza di diffusione dei minoritari	cm	$L = \sqrt{D\tau}$
Resistività semiconduttore drogato N_B	$\Omega \cdot cm$	$\rho = \frac{1}{qN_B\mu}$

LA GIUNZIONE PN

Descrizione	Unità di Misura	Formula
Potenziale di built-in (generale)	V	$V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$
Campo massimo (giunzione brusca polarizzata)	V/cm	$E_{max} = \frac{q N_A}{\epsilon_S} x_p = \frac{q N_D}{\epsilon_S} x_n = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{W}$
Regione di svuotamento (giunzione brusca polarizzata)	cm	$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_{bi} - V_A)}$
Estensione della regione di svuotamento nel lato n	cm	$x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} W$
Estensione della regione di svuotamento nel lato p	cm	$x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} W$
Capacità di svuotamento (giunzione brusca polarizzata)	F/cm ²	$C_j = \sqrt{\frac{q\epsilon_S}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{(V_{bi} - V_A)}}$
Regione di svuotamento (giunzione brusca simmetrica polarizzata, $N_A = N_D = N_B$)	cm	$W = \sqrt{\frac{4\epsilon_S}{q N_B} (V_{bi} - V_A)}$
Capacità di svuotamento (giunzione brusca simmetrica polarizzata, $N_A = N_D = N_B$)	F/cm ²	$C_j = \sqrt{\frac{q\epsilon_S N_B}{4} \frac{1}{(V_{bi} - V_A)}}$
Regione di svuotamento (giunzione brusca fortemente asimmetrica, polarizzata, con $N_B = \min(N_A, N_D)$)	cm	$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{q N_B} (V_{bi} - V_A)}$
Capacità di svuotamento (giunzione brusca fortemente asimmetrica, polarizzata, con $N_B = \min(N_A, N_D)$)	F/cm ²	$C_j = \sqrt{\frac{q\epsilon_S}{2} \frac{N_B}{(V_{bi} - V_A)}}$
Potenziale di built-in (giunzione a gradiente lineare)	V	$V_{bi} = \frac{2k_B T}{q} \ln \left(\frac{aW}{2n_i} \right)$
Campo massimo (giunzione a gradiente lineare)	V/cm	$E_{max} = \frac{qaW^2}{8\epsilon_{Si}}$
Regione di svuotamento (giunzione a gradiente lineare polarizzata)	cm	$W = \sqrt[3]{\frac{12\epsilon_S}{qa} (V_{bi} - V_A)}$
Capacità di svuotamento (giunzione a gradiente lineare polarizzata)	F/cm ²	$C_j = \sqrt[3]{\frac{qa\epsilon_S^2}{12} \frac{1}{(V_{bi} - V_A)}}$
Caratteristica corrente-tensione nella giunzione p-n ideale	A/cm ²	$J = J_S \left[\exp \left(\frac{qV_A}{k_B T} \right) - 1 \right]$
Densità di corrente di saturazione inversa	A/cm ²	$J_S = qn_i^2 \left[\frac{D_p}{L_p N_D} \coth \left(\frac{w_n - x_n}{L_p} \right) + \frac{D_n}{L_n N_A} \coth \left(\frac{ w_p - x_p }{L_n} \right) \right]$
Approssimazione base lunga (dimensione fisica del lato w, estensione regione di svuotamento in quel lato al potenziale dato x, lunghezza		$\coth \left(\frac{ w - x }{L} \right) \approx 1$

diffusione minoritari in quel lato L)		
Approssimazione base corta (dimensione fisica del lato w , estensione regione di svuotamento in quel lato al potenziale dato x , lunghezza diffusione minoritari in quel lato L)		$\operatorname{cotanh}\left(\frac{ w-x }{L}\right) \approx \frac{L}{ w-x }$
Resistenza della regione neutra (dimensione fisica del lato w , estensione regione di svuotamento in quel lato al potenziale dato x , resistività del lato ρ)	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	$R = \rho \cdot w-x $
Densità di corrente di generazione	A/cm^2	$J_{gen} = \frac{qWn_i}{\tau_g}$
Densità di corrente di ricombinazione	A/cm^2	$J_{rec} = \frac{qWn_i}{2\tau_r} \exp\left(\frac{qV_A}{2k_B T}\right)$
Caratteristica corrente-tensione nella giunzione p-n con fattore di idealità	A/cm^2	$J = J_S \left[\exp\left(\frac{qV_A}{\eta k_B T}\right) - 1 \right]$
Caratteristica corrente-tensione nella giunzione p-n con effetto delle resistenze delle regioni neutre	A/cm^2	$J = J_S \left\{ \exp\left[\frac{q(V_A - RJ)}{\eta k_B T}\right] - 1 \right\}$
Conduttanza equivalente alla giunzione PN di area A , al potenziale $V_A = V_A^*$	S	$g(V_A = V_A^*) = \frac{q}{k_B T} A J_S \exp\left(\frac{qV_A^*}{k_B T}\right)$
Potenziale di breakdown per una giunzione brusca asimmetrica (con N_B drogaggio del lato meno drogato)	V	$V_B = \frac{1}{2} E_{cr} W \approx \frac{E_{cr}^2 \epsilon_s}{q N_B}$
Potenziale di breakdown per una giunzione a gradiente lineare	V	$V_B = \frac{2}{3} E_{cr} W \approx \frac{4}{3} E_{cr}^{3/2} \left(\frac{2\epsilon_s}{qa}\right)^{1/2}$

IL CONTATTO METALLO SEMICONDUCTORE

Descrizione	Unità di Misura	Contatto M-Sn	Contatto M-Sp
Potenziale di built-in	V	$V_{bi} = \Phi_M - \Phi_{S,n}$	$V_{bi} = \Phi_{S,p} - \Phi_M$
Altezza di barriera	eV	$q\Phi_{B,n} = q\Phi_M - q\chi$	$q\Phi_{B,p} = E_g - q\Phi_{B,n}$
Campo massimo	V/cm	$E_{max} = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{W}$	
Regione di svuotamento	cm	$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{qN_D} (V_{bi} - V_A)}$	$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{qN_A} (V_{bi} - V_A)}$
Capacità di svuotamento	F/cm ²	$C_j = \sqrt{\frac{q\epsilon_S}{2} \frac{N_D}{(V_{bi} - V_A)}}$	$C_j = \sqrt{\frac{q\epsilon_S}{2} \frac{N_A}{(V_{bi} - V_A)}}$
Caratteristica corrente-tensione	A/cm ²	$J = J_S \left[\exp\left(\frac{qV_A}{k_B T}\right) - 1 \right]$	
Densità di corrente di saturazione inversa	A/cm ²	$J_S = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B,n}}{k_B T}\right)$	$J_S = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B,p}}{k_B T}\right)$
Densità di corrente dei minorati	A/cm ²	$J_p = \frac{qn_i^2 D_p}{L_p N_D} \coth\left(\frac{ w_n - W }{L_p}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{k_B T}\right) - 1 \right]$	$J_n = \frac{qn_i^2 D_n}{L_n N_A} \coth\left(\frac{ w_p - W }{L_n}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{k_B T}\right) - 1 \right]$
Approssimazione base lunga		$\coth\left(\frac{ w_n - W }{L_n}\right) \approx 1$	$\coth\left(\frac{ w_p - W }{L_p}\right) \approx 1$
Approssimazione base corta		$\coth\left(\frac{ w_n - W }{L_n}\right) \approx \frac{L_n}{ w_n - W }$	$\coth\left(\frac{ w_p - W }{L_p}\right) \approx \frac{L_p}{ w_p - W }$
Densità di corrente di ricombinazione	A/cm ²	$J_{rec} = \frac{qWn_i}{2\tau_r} \exp\left(\frac{qV_A}{2k_B T}\right)$	
Resistenza specifica di contatto	$\Omega \cdot cm^2$	$R_c = \frac{k_B T}{qA^* T^2} \exp\left(\frac{q\Phi_{B,n}}{k_B T}\right)$	$R_c = \frac{k_B T}{qA^* T^2} \exp\left(\frac{q\Phi_{B,p}}{k_B T}\right)$

Costanti di Richardson efficaci (A/K²)

Semiconduttore	Drogaggio p	Drogaggio n
Si	32	110
GaAs	72	8

CAPACITORE MOS

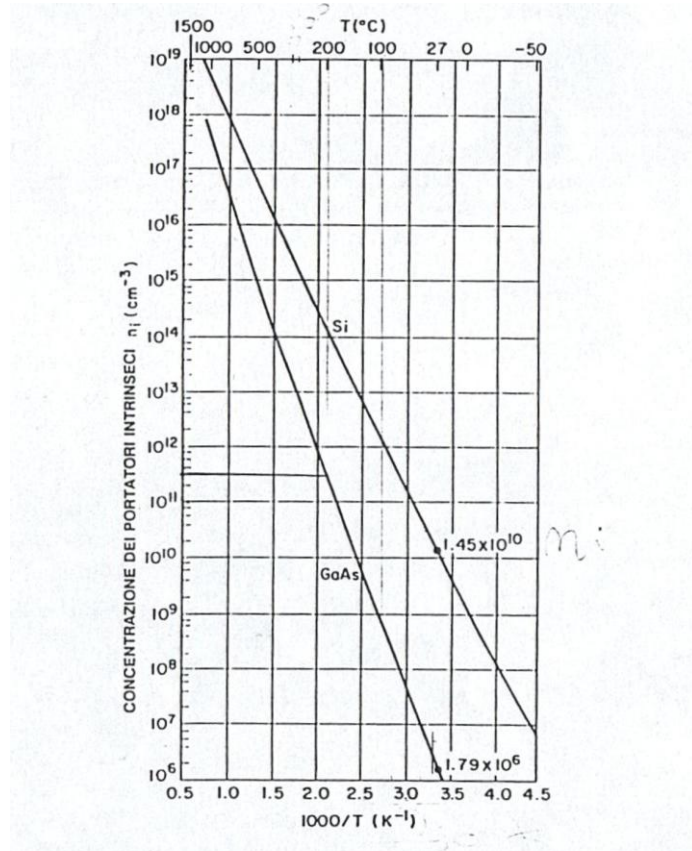
Descrizione	Unità di Misura	MOS substrato p	MOS substrato n
Caratteristica Capacità-Tensione (in svuotamento)	F/cm^2	$C = \frac{C_{ox}}{\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2}{qN_A\epsilon_s d^2} V_A}}$	$C = \frac{C_{ox}}{\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2}{qN_D\epsilon_s d^2} V_A}}$
Potenziale di inversione	V	$\psi_S^{inv} = 2\psi_B = \frac{2k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$	$\psi_S^{inv} = 2\psi_B = \frac{2k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$
Capacità minima	F/cm^2	$C_{min} = \frac{C_{ox}}{1 + \sqrt{\frac{2\epsilon_{ox}^2}{qN_A\epsilon_s d^2} (2\psi_B)}}$	$C_{min} = \frac{C_{ox}}{1 + \sqrt{\frac{2\epsilon_{ox}^2}{qN_D\epsilon_s d^2} (2\psi_B)}}$
Tensione di banda piatta (x = posizione della carica rispetto all'interfaccia metallo-isolante)	V	$V_{FB} = \phi_M - \phi_{S,p} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \frac{x}{d_{ox}}$	$V_{FB} = \phi_M - \phi_{S,n} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \frac{x}{d_{ox}}$
Tensione di soglia	V	$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_s(2\psi_B)}}{C_{ox}}$	$V_T = V_{FB} - 2\psi_B - \frac{\sqrt{2qN_D\epsilon_s(2\psi_B)}}{C_{ox}}$

IL MOSFET

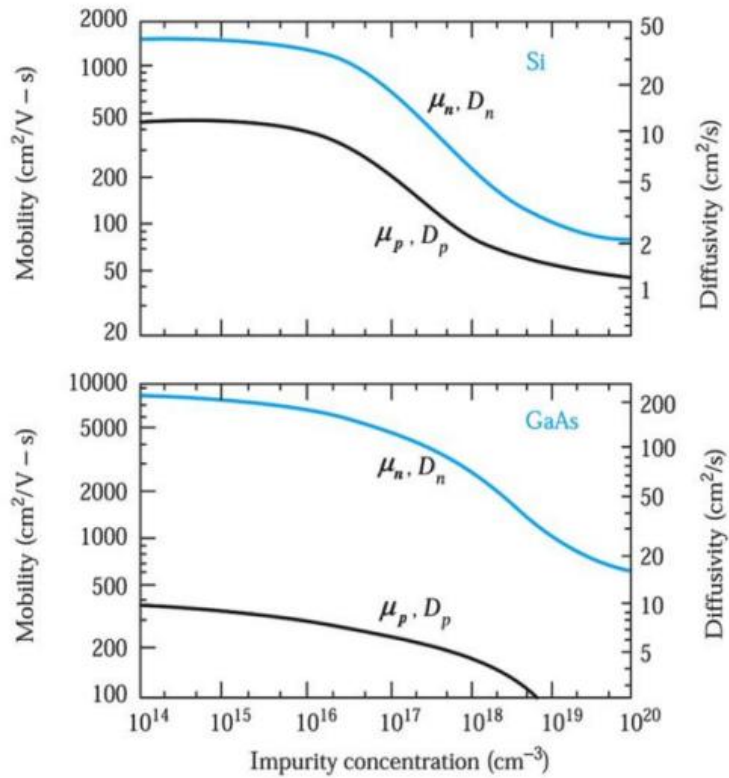
Descrizione	Unità di Misura	MOSFET a canale n	MOSFET a canale p
Caratteristica (valida per $V_{DS} < V_{DS,sat}$)	A	$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$	$I_D = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{SG} - V'_{Tp}) V_{SD} - \frac{V_{SD}^2}{2} \right]$
Approssimazione in regione lineare	A	$I_{D,lin} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS}$	$I_{D,lin} = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - V'_{Tp}) V_{SD}$
Corrente di saturazione ($V_{DS} > V_{DS,sat}$)	A	$I_{D,sat} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})^2$	$I_{D,sat} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - V'_{Tp})^2$
Conduttanza di canale	S	$g_{D,lin} = \left. \frac{\partial I_{D,lin}}{\partial V_{DS}} \right _{V_{GS} \equiv const} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})$	$g_{D,lin} = \left. \frac{\partial I_{D,lin}}{\partial V_{SD}} \right _{V_{SG} \equiv const} = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - V'_{Tp})$
Transconduttanza in regione lineare	S	$g_{m,lin} = \left. \frac{\partial I_{D,lin}}{\partial V_{GS}} \right _{V_{DS} \equiv const} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS}$	$g_{m,lin} = \left. \frac{\partial I_{D,lin}}{\partial V_{SG}} \right _{V_{SD} \equiv const} = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} V_{SD}$
Transconduttanza in saturazione	S	$g_{m,sat} = \left. \frac{\partial I_{D,sat}}{\partial V_{GS}} \right _{V_{DS} \equiv const} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})$	$g_{m,sat} = \left. \frac{\partial I_{D,sat}}{\partial V_{SG}} \right _{V_{SD} \equiv const} = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - V'_{Tp})$
Corrente sottosoglia	A	$I_{D,sub} = q n_i D_n \frac{W}{L} \exp\left(-\frac{q\psi_B}{k_B T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{k_B T}\right) \right] \exp\left[\frac{q(V_{GS} - V_{Tn})}{k_B T}\right]$	$I_{D,sub} = q n_i D_p \frac{W}{L} \exp\left(-\frac{q\psi_B}{k_B T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_{SD}}{k_B T}\right) \right] \exp\left[\frac{q(V_{SG} - V'_{Tp})}{k_B T}\right]$
Corrente di saturazione in condizioni di modulazione della lunghezza di canale	A	$I_{D,sat} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})^2 (1 + \lambda V_{DS})$	$I_{D,sat} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - V'_{Tp})^2 (1 + \lambda V_{SD})$
Tensione di soglia	V	$V_{Tn} = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_s(2\psi_B)}}{C_{ox}}$	$V'_{Tp} = -V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2qN_D\epsilon_s(2\psi_B)}}{C_{ox}}$
Effetto body	V	$V_{Tn} = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_B - V_{BS})}}{C_{ox}}$ $\Delta V_{Tn} = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{C_{ox}} [\sqrt{2\psi_B - V_{BS}} - \sqrt{2\psi_B}]$	$V'_{Tp} = -V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_D (2\psi_B - V_{SB})}}{C_{ox}}$ $\Delta V'_{Tp} = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_D}}{C_{ox}} [\sqrt{2\psi_B - V_{SB}} - \sqrt{2\psi_B}]$

GRAFICI

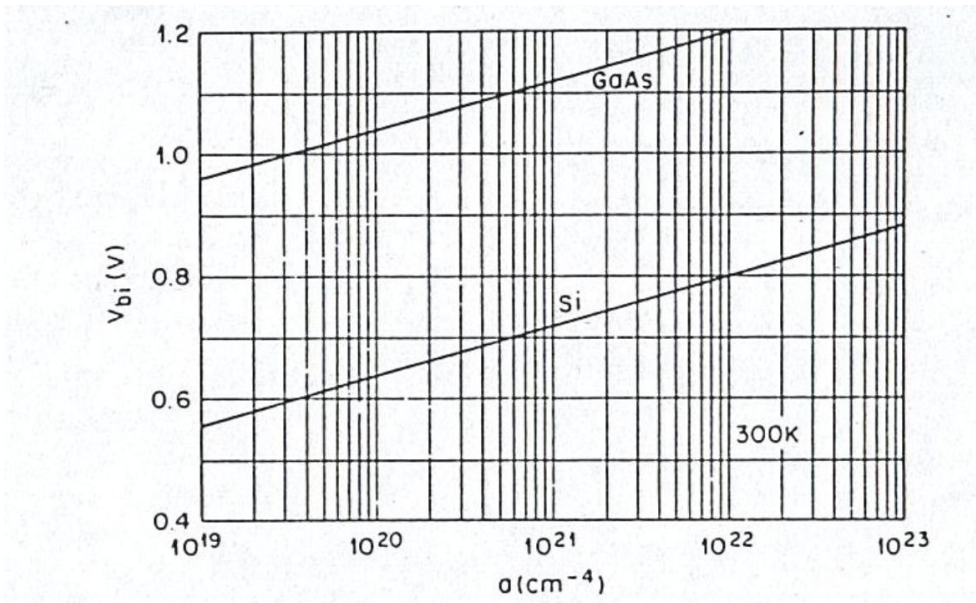
Semiconduttori



Concentrazione dei portatori intrinseci nel Si e nel GaAs in funzione del reciproco della temperatura.⁴

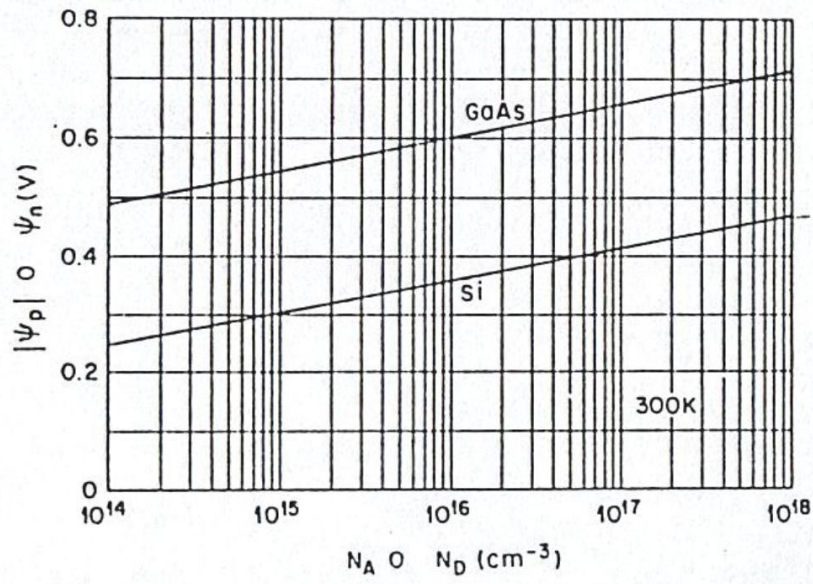


Giunzioni p-n

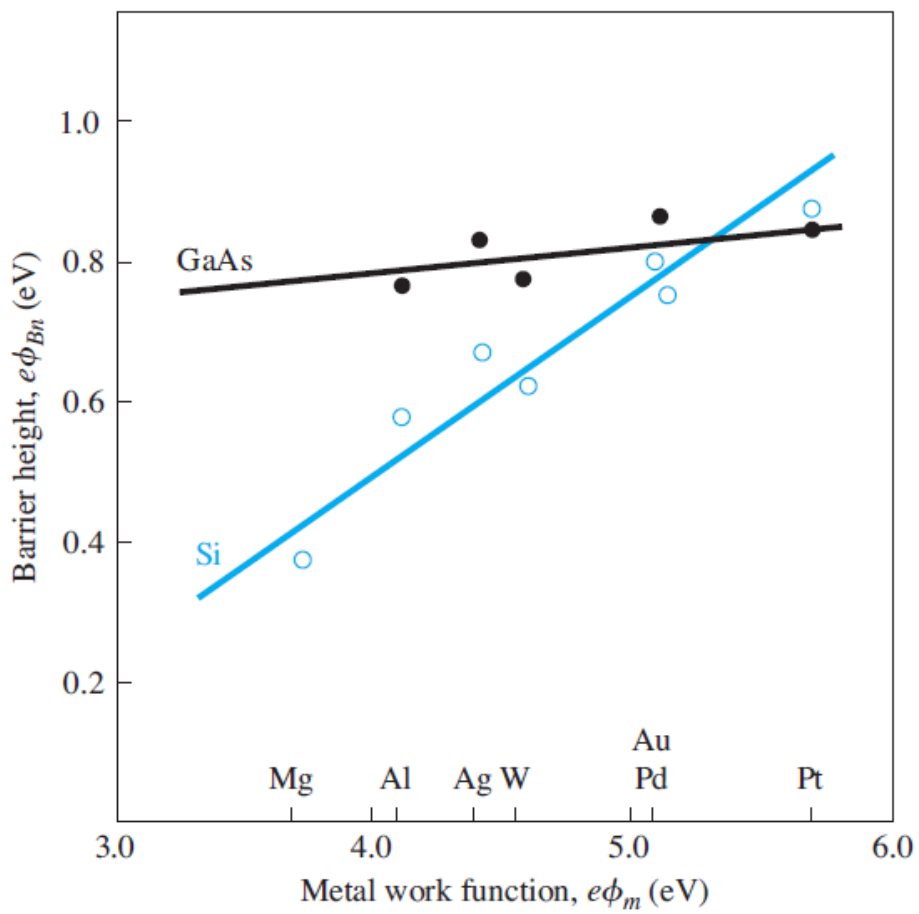


Potenziale interno per giunzioni a gradiente lineare in Si e in GaAs in funzione del gradiente delle impurità.

Contatto metallo-semiconduttore



Contributi del lato p e del lato n al potenziale interno di giunzioni brusche in Si e in GaAs in funzione della concentrazione di impurità.



Capacitore MOS/ MOSFET

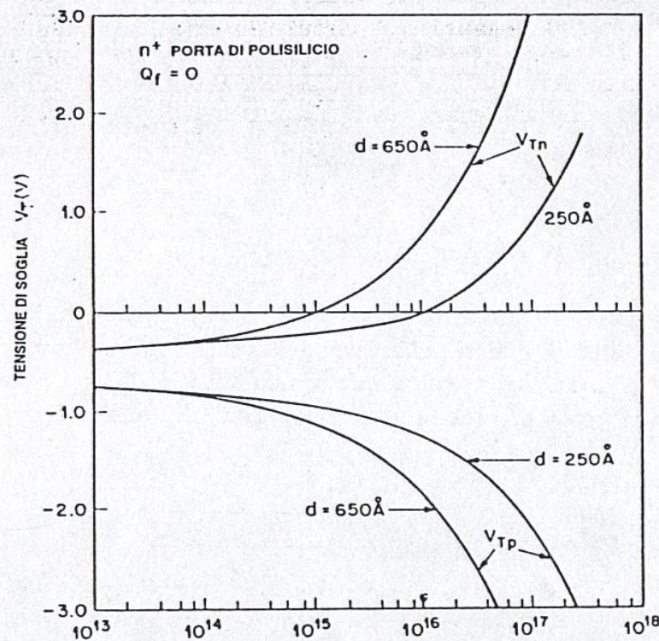
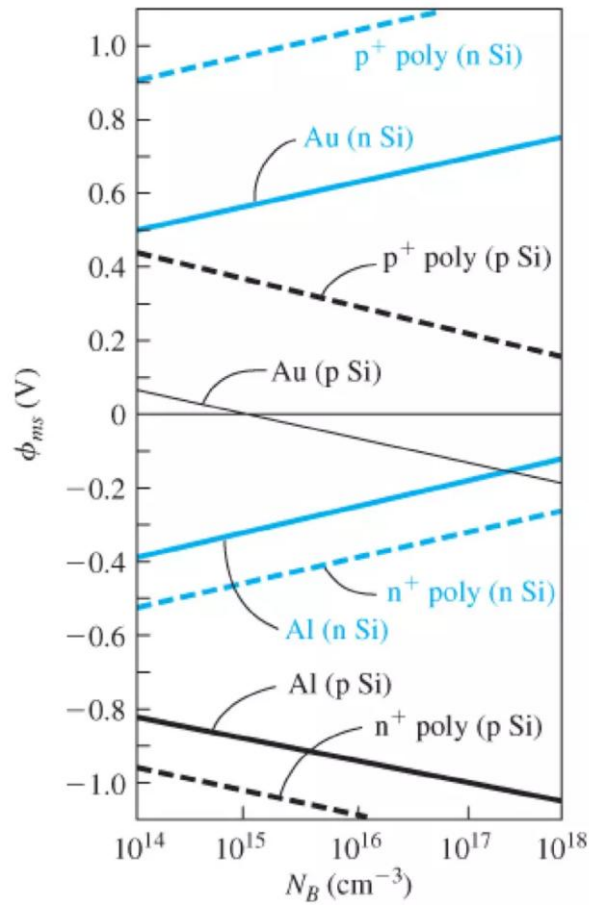


Fig. 5.41 Tensione di soglia calcolata di MOSFET a canale n (V_{Tn}) e a canale p (V_{Tp}) in funzione della concentrazione delle impurità, assumendo una porta di polisilicio e cariche fisse nell'ossido nulle.¹³