

קבועים פיזיקליים

הערות	סימון, ערך ויחידות	שם הקבוע
מסומן גם m_0	$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} [kg]$ $m_e = 511,000 = 511k [eV]$	מסת האלקטרון
	$q = 1.6 \cdot 10^{-19} [Cb]$	מטען האלקטרון
	$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \left[\frac{F}{cm} \right]$	דיאלקטריות הריק
	$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \left[\frac{atoms}{mole} \right]$	מספר אבוגדרו
	$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$ $k = 8.617 \cdot 10^{-5} \left[\frac{eV}{K} \right]$	קבוע בולצמן
מסמנים גם $\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$	קבוע פלאנק
	$c = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{sec} \right]$ $c = 3 \cdot 10^{10} \left[\frac{cm}{sec} \right]$	מהירות האור בריק

תכונות בסיסיות של מוליכים למחצה

<i>GaAs</i> גליום-ארסן	<i>Ge</i> גרמניום	<i>Si</i> סיליקון	תכונה	
$4.7 \cdot 10^{17}$	$1.04 \cdot 10^{19}$	$2.8 \cdot 10^{19}$	בפס ההולכה, N_C	צפיפות מצבים אפקטיבית $[cm^{-3}]$
$7 \cdot 10^{18}$	$6 \cdot 10^{18}$	$1.04 \cdot 10^{19}$	בפס הערכיות, N_V	
$2 \cdot 10^6$	$2.3 \cdot 10^{13}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	n_i	צפיפות אינטרינסיט $[cm^{-3}]$
13.1	16	11.8	ϵ_r	מקדם דיאלקטרי יחסי
$0.07m_e$	$0.12m_e$	$0.26m_e$	m_e^*	מסת אלקטרון אפקטיבית $[kg]$
$0.5m_e$	$0.28m_e$	$0.49m_e$	m_h^*	מסת חור אפקטיבית $[kg]$

סימונים מוסכמים

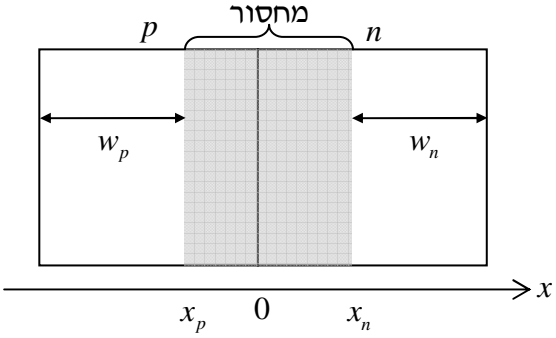
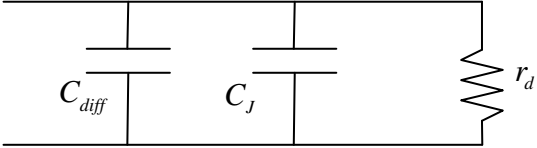
ε_r	מקדם דיאלקטרי יחסי
N_D^+	מספר הסיגים התורמים המיוננים
N_A^-	מספר הסיגים הנוטלים המיוננים
τ_r	זמן ממוצע בין התנגשויות תרמיות (Relaxation)
τ_e, τ_h	זמן חיים של אלקטרונים / חורים
D_e, D_h	מקדם דיפוזיה
$L_e^2 \triangleq D_e \tau_e, L_h^2 \triangleq D_h \tau_h$	מרחק דיפוזיה
$E_{gap} \triangleq E_C - E_V$	רוחב הפס המותר במל"מ
E_i	אמצע הפס המותר
E_F	רמת פרמי/אנרגית פרמי
E_{Fi}	רמת פרמי העצמותית (אינטרינסיט)

נוסחאות כלליות

$n + N_A^- = p + N_D^+$	משוואת הנייטרליות
$\bar{n} \cdot \bar{p} = n_i^2$	מכפלת ריכוזי המטען בשיווי משקל
$E_{th} = \frac{r}{2} kT$	אנרגיה תרמית של אלקטרונים, r דרגות חופש
$\mu = \frac{q\tau_r}{m}$	ניידות נושאי המטען
$\vec{V}_d = \mu \vec{E}$	מהירות סחיפה, לפני מצב של רוויה
$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(\mu_e n + \mu_h p)$	מוליכות סגולית σ והתנגדות סגולית ρ
$J_e = J_{drift} + J_{diff} = q\mu_e n E + qD_e \frac{\partial n}{\partial x}$	צפיפות זרם של אלקטרונים
$J_h = J_{drift} + J_{diff} = q\mu_h p E - qD_h \frac{\partial p}{\partial x}$	צפיפות זרם של חורים
$\vec{J} = \sigma \vec{E}$	חוק אוהם
$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_e}{\partial x} - R + G = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_e}{\partial x} - \frac{\hat{p}}{\tau_h} + G$	משוואת הרציפות עבור אלקטרונים
$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_h}{\partial x} - R + G = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_h}{\partial x} - \frac{\hat{n}}{\tau_e} + G$	משוואת הרציפות עבור חורים
$\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial x^2} - \frac{\hat{p}}{L_h^2} = 0$	משוואת הדיפוזיה
$D = \frac{kT}{q} \mu$	יחס איינשטיין
$f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}}$	פונקציית הסתברות אכלוס מצבים של פרמי-דירק
$f_{MB}(E) = e^{-\frac{E-E_F}{kT}}$	פונקציית הסתברות אכלוס מצבים של מקסוול-בולצמן
$N_C = \int_{E_C}^{\infty} G(E) e^{-\frac{E-E_C}{kT}} dE$	צפיפות מצבים בפס ההולכה

$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$	צפיפות מצבים אפקטיבית בפס ההולכה
$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$	צפיפות מצבים אפקטיבית בפס הערכיות
$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}}$	ריכוז אלקטרונים במל"מ לא מנוון
$p = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}}$	ריכוז חורים במל"מ לא מנוון
$np = n_i^2 = N_C N_V e^{-\frac{E_{gap}}{kT}}$	ביטוי לריכוזים עצמותיים (אינטרינסיים)
$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right)$	מיקום רמת פרמי האינטרינסיית
$E_F - E_{Fi} = \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{n}{p} \right)$	מרחק רמת פרמי ורמת פרמי האינטרינסיית

דיודה

	<p>סכימת הצומת</p> <p>משוואת פואסון:</p> $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r}$
$V_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$	מתח בנוי בצומת
$d_n = x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r (V_b - V_a) N_A}{q N_D (N_D + N_A)}}$	רוחב אזור המחסור בצד n
$d_p = x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r (V_b - V_a) N_D}{q N_A (N_D + N_A)}}$	רוחב אזור המחסור בצד p
$d = x_n - x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r (V_b - V_a) (N_D + N_A)}{q N_A N_D}}$	רוחב אזור המחסור בכול
$p_n(x_n) = \bar{p}_n e^{\frac{qV_a}{kT}}, \quad n_p(x_n) = \bar{n}_p e^{\frac{qV_a}{kT}}$	יחסי בולצמן
$I_0 = qA \left(\frac{\bar{n}_p D_e}{L_e} + \frac{\bar{p}_n D_h}{L_h} \right)$	זרם זליגה של דיודה ארוכה
$I_0 = qA \left(\frac{\bar{n}_p D_e}{w_p} + \frac{\bar{p}_n D_h}{w_n} \right)$	זרם זליגה של דיודה קצרה
$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right)$	אופיין דיודה אידיאלית
$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right) - qG_{opt} A (L_e + L_h + d)$	אופיין פוטו-דיודה אידיאלית, בקצב הארה G_{opt}
	סכמת תמורה לאות קטן, בממתח קדמי
$r_d = \frac{kT}{qI}$	התנגדות דינאמית באות קטן באות קטן סביב I
$C_J = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$	קיבול הצומת
$C_{diff} = \frac{\tau_F}{r_d}$	קיבול דיפוזיה
$\frac{1}{\tau_F} = \frac{1}{\tau_h} + \frac{2D_h}{d^2} \Rightarrow \tau_F = \begin{cases} \tau_h, & \text{Long Diode} \\ \frac{d^2}{2D_h}, & \text{Short Diode} \end{cases}$	זמן מעבר בדיודה, עבור חורים

MOS קבל

Φ_M	פונקצית עבודה של המתכת
Φ_S	פונקצית עבודה של הסיליקון
$V_{FB} = \frac{\Phi_M - \Phi_S}{q} + \frac{Q_{SS}}{C_{Oxide}}$	מתח יישור פסים, כאשר Q_{SS} צפיפות מטען התחלתי על התחמוצת
φ_S	המתח הנופל על הסיליקון
$-Q_G = Q_B + Q_{inv}$	פיזור המטענים בקבל, Q_G בשער, Q_B במצע.
$C_{Oxide} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{Oxide}}{d_{Oxide}}$	צפיפות קיבול התחמוצת
$C_S = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{x_d}$	צפיפות קיבול הסיליקון
$\frac{1}{C_{MOS}} = \frac{1}{C_{Oxide}} + \frac{1}{C_S}$	צפיפות קיבול כוללת
$q\varphi_F \triangleq E_i - E_F = \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{n}{p}\right)$	מרחק רמת פרמי מאמצע הפס המותר
$\varphi_{S\max} = 2\varphi_F$	סף האינברסיה
$V_G = V_{FB} + \varphi_S - \frac{(Q_B + Q_{inv})}{C_{Oxide}}$	מתח השער

מצע n	מצע p	
$Q_B = qN_D x_d = \sqrt{2\epsilon_0 \epsilon_r q N_D \varphi_S}$	$Q_B = -qN_A x_d = -\sqrt{2\epsilon_0 \epsilon_r q N_A \varphi_S}$	מטען על המצע
	$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{Si} \varphi_S}{qN_A}}$	רוחב שכבר המחסור
	$x_{d\max} = \sqrt{\frac{4\epsilon_0 \epsilon_{Si} \varphi_F}{qN_A}}$	רוחב שכבר המחסור המכסימלי
	$V_T = V_{FB} - \frac{Q_{B\max}}{C_{Oxide}} + 2\varphi_F$ $= V_{FB} + \frac{\sqrt{4\epsilon_0 \epsilon_{Si} q N_A \varphi_F}}{C_{Oxide}} + 2\varphi_F$	מתח הסף
$q\varphi_F \triangleq E_i - E_F = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$	$q\varphi_F \triangleq E_i - E_F = kT \ln\left(\frac{n_i}{N_A}\right)$	מרחק רמת פרמי מאמצע הפס המותר

טרנזיסטור MOS

$I_{DS} = \begin{cases} \mu_e^* \frac{W}{L} C_{Oxide} (V_{GS} - V_T) V_{DS}, & V_{DS} \ll V_{GS} - V_T \\ \mu_e^* \frac{W}{L} C_{Oxide} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right], & V_{DS} < V_{GS} - V_T \\ \frac{1}{2} \mu_e^* \frac{W}{L} C_{Oxide} (V_{GS} - V_T)^2, & V_{DS} \geq V_{GS} - V_T \end{cases}$	זרם בטרנזיסטור
	סכמת תמורה לאות קטן
$g_m = \mu_e^* \frac{W}{L} C_{Oxide} (V_{GS} - V_T)$	מוליכות באות קטן

טרנזיסטור בי-פולארי

$\beta \triangleq \frac{\alpha}{1-\alpha}$	הגבר זרם	τ_B	זמן המעבר בבסיס
$\alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{ES}$	הפיכות	$\alpha \triangleq b\gamma$	מקדם המעבר

NPN	PNP	
$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_h W_B N_{A,B}}{D_e W_E N_{D,E}}}$	$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_e W_B N_{D,B}}{D_h W_E N_{A,E}}}$	נצילות ההזרקה
$b = 1 - \frac{W_B^2}{2D_e \tau_e} = 1 - \frac{\tau_B}{\tau_e}$	$b = 1 - \frac{W_B^2}{2D_h \tau_h} = 1 - \frac{\tau_B}{\tau_h}$	גורם המעבר בבסיס
$I_E = -I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right) + \alpha_R I_{CS} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right)$	$I_E = I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) - \alpha_R I_{CS} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right)$	זרם ב Emitter
$I_C = \alpha_F I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right)$	$I_C = -\alpha_F I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) + I_{CS} \left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1 \right)$	זרם ב Collector
$I_{ES} = \frac{qAD_{e,B} \bar{n}_{p,B}}{w_B} + \frac{qAD_{h,E} \bar{p}_{n,E}}{L_{h,E}}$ $I_{CS} = \frac{qAD_{e,B} \bar{n}_{p,B}}{w_B} + \frac{qAD_{h,C} \bar{p}_{n,C}}{L_{h,C}}$	$I_{ES} = \frac{qAD_{h,B} \bar{p}_{n,B}}{w_B} + \frac{qAD_{e,E} \bar{n}_{p,E}}{L_{e,E}}$ $I_{CS} = \frac{qAD_{h,B} \bar{p}_{n,B}}{w_B} + \frac{qAD_{e,C} \bar{n}_{p,C}}{L_{e,C}}$	זרמי הזליגה

מודל אברס-מול עבור NPN :

