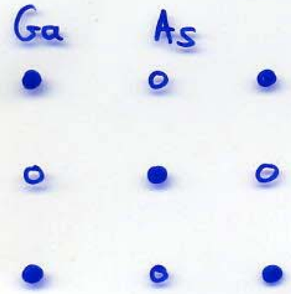
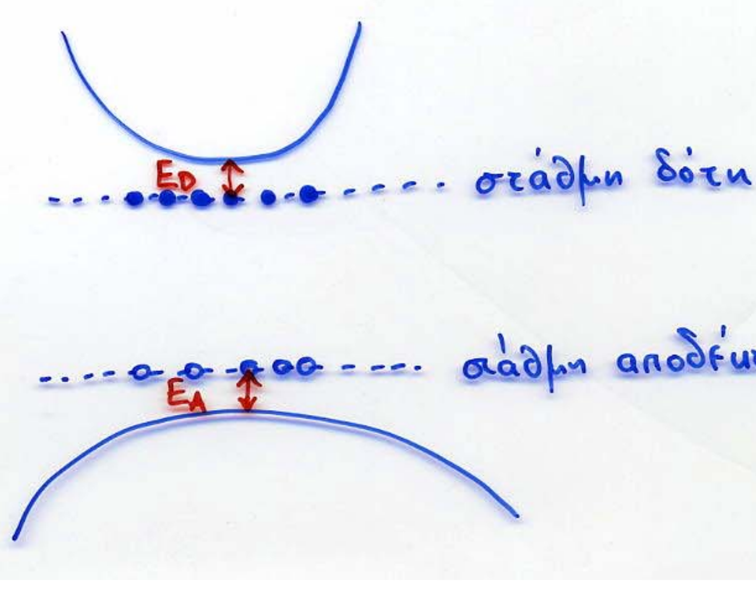
Προσμείξεις



[Si] $\rightarrow$ 4 e^- σθένους
- ένα παραπάνω από [Ga]
- ένα λιγότερο από [As]

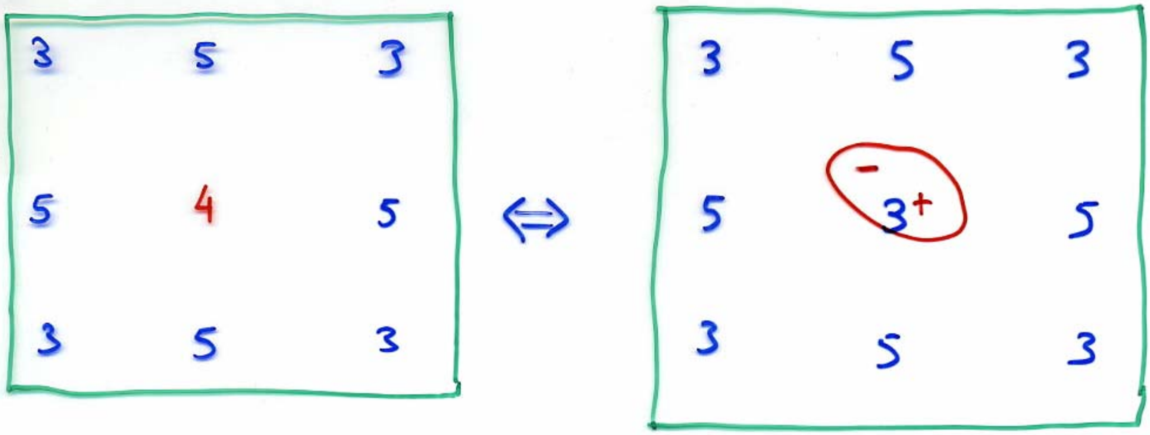
[Si] στη θέση του [Ga] — ΔΟΤΗΣ n - τύπου

[Si] στη θέση του [As] — ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ p - τύπου



Υδρογονικό μοντέλο

ΔΟΤΕΣ



Κάθε άτομο δότη μπορεί να το δει κανείς σαν ένα άτομο υδρογόνου, όπου ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας χαλαρά συνδεδεμένο γύρω από ένα θετικά φορτισμένο πυρήνα.

$$\boxed{E_D = \text{ενέργεια σύνδεσης} = 13{,}6\,\text{eV} \cdot \left(\frac{m_e^*}{m_0}\right) \cdot \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right)^2}$$

απόσταση από E_c

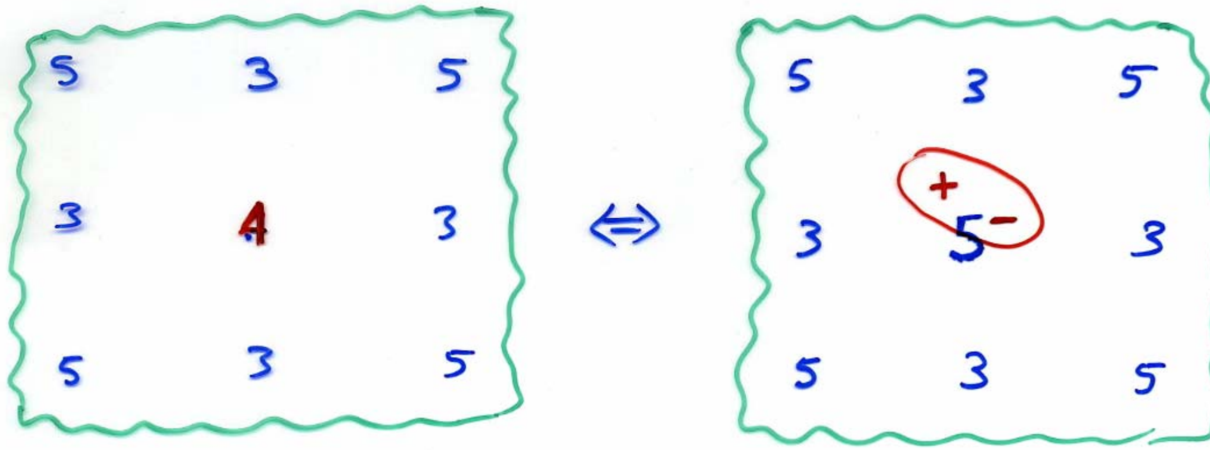
ενεργός μάζα Ζ.Α.

διηλεκτρική σταθερά υλικού

GaAs: $m_e^* = 0.067\, m_0$

Si: $m_e^* \rightarrow 3\left(\frac{2}{m_t^*} + \frac{1}{m_\ell^*}\right)^{-1}$

ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ



Κατ' αναλογία με τους δότες, κάθε αποδέκτης είναι σαν άτομο H_2, όπου μία οπή είναι χαλαρά συνδεδεμένη γύρω από ένα αρνητικά φορτισμένο πυρήνα.

$$\boxed{E_A = \text{ενέργεια σύνδεσης} = 13{,}6\,\text{eV}\left(\frac{m_h^*}{m_0}\right)\cdot\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right)^2}$$

απόσταση από E_V

μία προσέγγιση είναι $m_h^* \simeq m_{HH}^*$

(Για πιό ικανοποιητική προσέγγιση στο m_h^*, χρειάζεται θεωρία πολλαπλών ζωνών.)

Ημιαγωγός.	Ξένη πρόσμιξη (δότης)	Ενέργεια ρηχών σταθμών δότη(meV)		Ξένη πρόσμιξη (αποδέκτης)	Ενέργειες ρηχών σταθμών αποδέκτη(meV)	
GaAs	Si	5.8		C	26	
	Ge	6.0	7	Be	28	36
	S	6.0		Mg	28	
	Sn	6.0		Si	35	
Si	Li	33		B	45	
	Sb	39	25	Al	67	48
	P	45		Ga	72	
	As	54		In	160	
Ge	Li	9.3		B	10	
	Sb	9.6	6	Al	10	
	P	12.0		Ga	11	
	As	13.0		In	11	

Με προσμείξεις η E_F μετατοπίζεται,
είτε προς τη ΖΑ (n - τύπου)
είτε προς τη ΖΣ (p - τύπου)

Για μη εκφυλισμένους (non-degenerate) ημιαγωγούς με $N_D\,(N_A) \leq 10^{17}\ cm^{-3}$, ισχύει ακόμη η προσέγγιση Boltzman και επομένως,

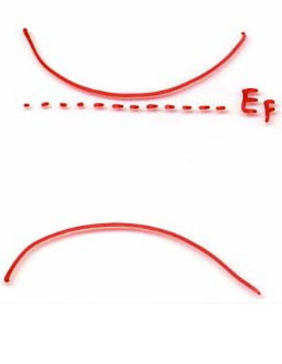
$$\left.\begin{aligned} n_o &= N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT} \\ p_o &= N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT} \end{aligned}\right\} \quad \boxed{n_o \cdot p_o = n_i^2}$$

(ανεξάρτητα των προσμείξεων)

Παράδειγμα, $N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

$$-(E_c - E_F)/kT = \ln \frac{n_o}{N_c} = \ln \frac{N_D}{N_c}$$

(GaAs) $4.4 \times 10^{17}\ cm^{-3}$ στους 300K



$\Rightarrow \quad E_c - E_F \simeq 0.038\,eV$ στους 300K

$$\left.\begin{aligned} n_o \cdot p_o &= n_i^2 \\ n_o - p_o &= \Delta n \neq 0 \quad \text{(σε ημιαγωγό με προσμίξεις)} \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$\left(p_o = \frac{n_i^2}{n_o} \right) \qquad n_o - \frac{n_i^2}{n_o} = \Delta n \Rightarrow$$

$$n_o^2 - \Delta n \cdot n_o - n_i^2 = 0 \Rightarrow$$

$$n_o = \frac{+\Delta n \pm \sqrt{\Delta n^2 + 4 n_i^2}}{2}$$

(μόνο η λύση ⊕ έχει φυσικό νόημα)

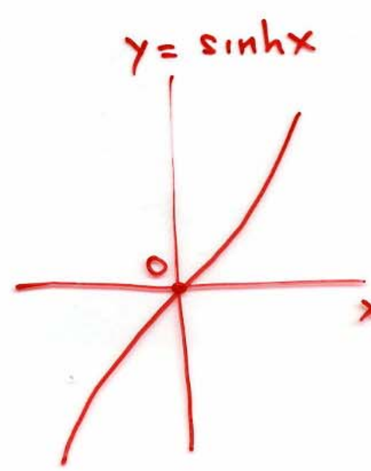
$$\Rightarrow \quad \boxed{n_o = \frac{1}{2}\Delta n + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\Delta n^2 + 4 n_i^2}}$$

(ομοίως) $\boxed{p_o = -\frac{1}{2}\Delta n + \frac{1}{2}\sqrt{\Delta n^2 + 4 n_i^2}}$

$$\left.\begin{aligned} n_o &= N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT} \\ n_i &= N_c \cdot e^{-(E_c - E_{Fi})/kT} \end{aligned}\right\} \quad \frac{n_o}{n_i} = e^{(E_F - E_{Fi})/k_B T}$$

όμοια $\quad \dfrac{p_o}{\underset{n_i =}{p_i}} = e^{-(E_F - E_{Fi})/k_B T}$

$$\boxed{\frac{n_o - p_o}{n_i} = \frac{\Delta n}{n_i} = 2 \cdot \sinh\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{k_B T}\right)}$$



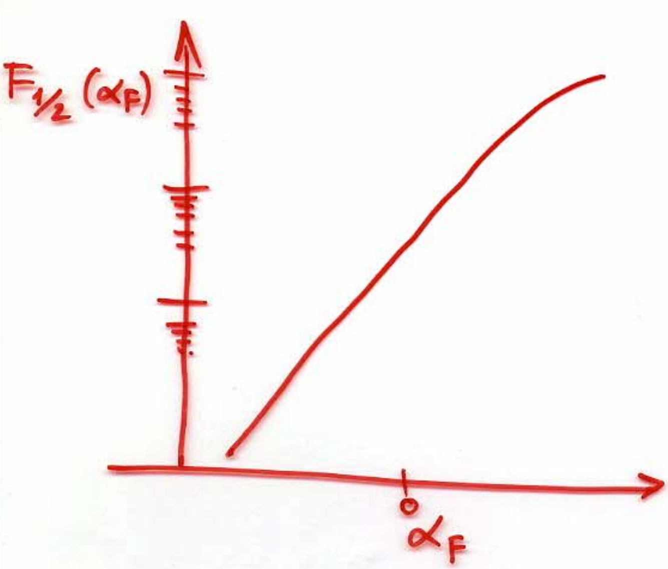
Όταν το E_F είναι πολύ κοντά στη Ζ.Α. τότε η προσέγγιση Boltmann δεν είναι καλή.

$$\boxed{n = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m^*}{\hbar^2}\right)^{3/2}\int_{E_c}^{\infty}\frac{(E-E_c)^{1/2}\cdot dE}{\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)+1}}$$

ορίζοντας $\alpha = \frac{E-E_c}{k_B T}$, $\alpha_F = \frac{E_F-E_c}{k_B T}$ $\Rightarrow$

$$\boxed{n = \frac{1}{2\pi^2}\cdot\left(\frac{2m^* k_B T}{\hbar^2}\right)^{3/2}\cdot\underbrace{\int_{0}^{\infty}\frac{\alpha^{1/2}\cdot d\alpha}{\exp(\alpha-\alpha_F)+1}}_{\text{ολοκλήρωμα Fermi-Dirac}}}$$

$F_{1/2}(\alpha_F)$



Οπότε

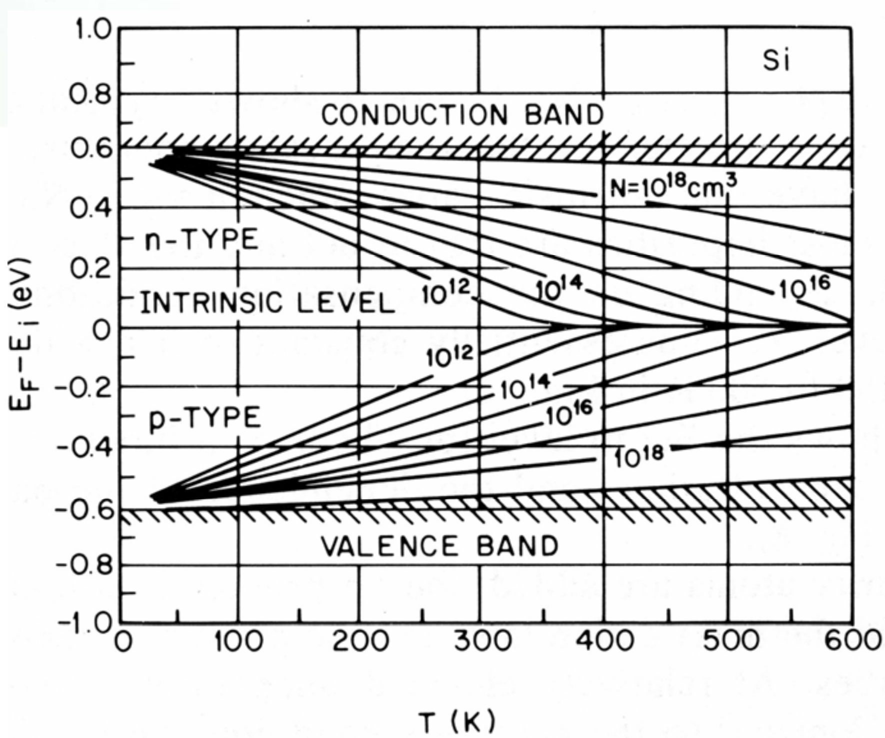
$$\boxed{n = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot N_c \cdot F_{1/2}(\alpha_F)}$$

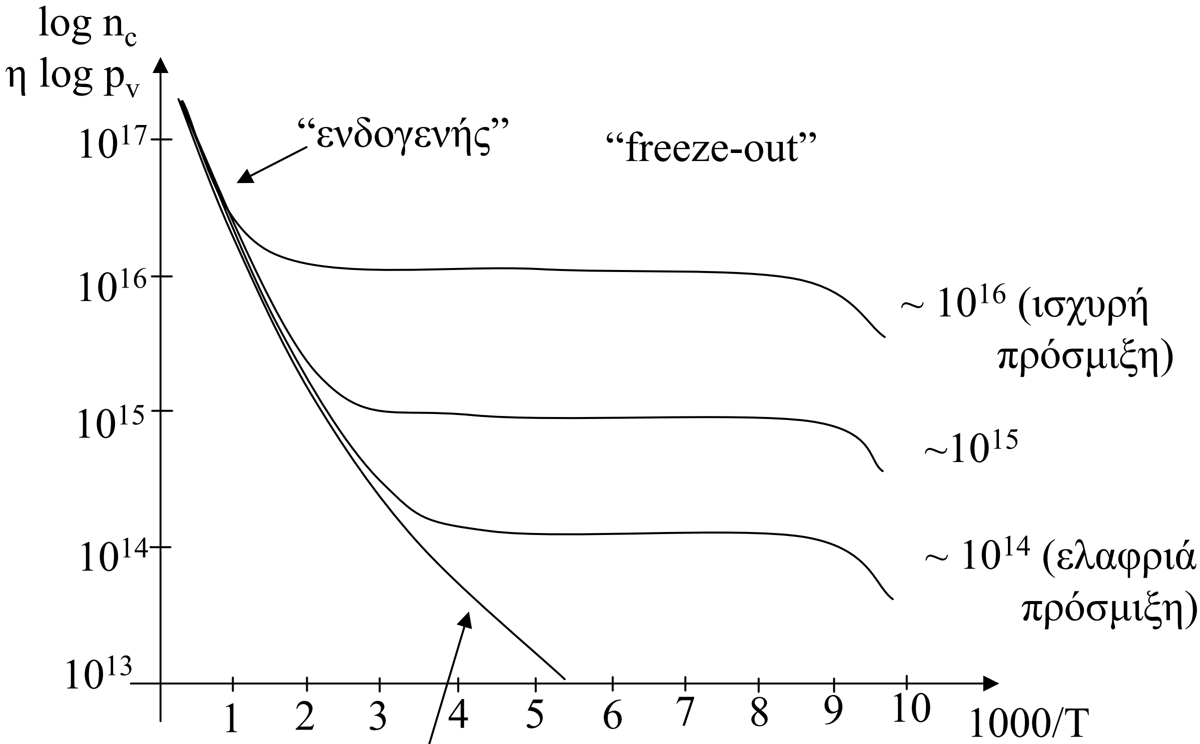
Αντίστοιχα, $$\boxed{p = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot N_v \cdot F_{1/2}(\alpha_F)}$$

Θέλουμε $n, p \rightarrow E_F$

Προσέγγιση Joyce-Dixon

$$\boxed{\begin{aligned} E_F &= E_C + k_B T\left[\ln\frac{n}{N_C} + \frac{1}{\sqrt{8}}\cdot\frac{n}{N_C}\right] = \\ &= E_V - k_B T\left[\ln\frac{p}{N_v} + \frac{1}{\sqrt{8}}\cdot\frac{p}{N_v}\right]\end{aligned}}$$





“ενδογενής” $\sim T^{3/2} e^{-E_g/2kT} (m_e^* m_h^*)^{3/4}$