

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

ΜΑΘΗΜΑ : Δομή και Ηλεκτρικές Ιδιότητες των Υλικών

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ – Α.Μ. : Χρήστος Τσούφης - 03117176

ΟΜΑΔΑ : B1

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ : Ανάλυση ημιαγωγών στο Octave

ΑΘΗΝΑ 2018

Σκοπός της εργαστηριακής άσκησης είναι η χρήση το Octave για την κατασκευή διαγραμμάτων και καμπυλών που αφορούν συγκεκριμένους ημιαγωγούς.

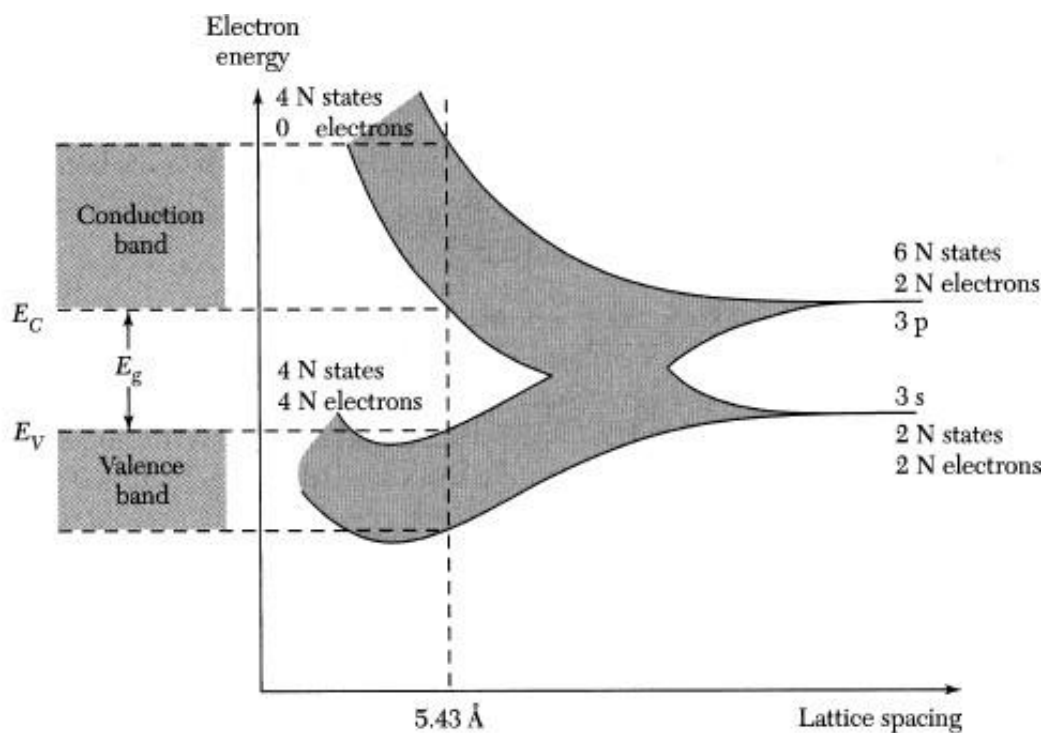
1. Octave

Το GNU Octave είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιεί γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, με κύριο σκοπό την επίλυση αριθμητικών υπολογισμών. Παρέχει ένα βολικό περιβάλλον διεπαφής για την επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων και λοιπών αριθμητικών εφαρμογών. Η χρησιμοποιούμενη γλώσσα είναι αρκετά συμβατή και εφάμιλλη με την Matlab. Το πρόγραμμα είναι ελεύθερο λογισμικό και υπόκειται στα δικαιώματα GNU General Public License.

2. Ενεργειακές ζώνες

Σε ένα απομονωμένο άτομο, τα ηλεκτρόνιά του έχουν απομονωμένες ενεργειακές στάθμες. Δύο ίδια άτομα όταν είναι μακριά, οι επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες για έναν βασικό κβαντικό αριθμό (πχ $n=1$) αποτελούνται μόνο από μια διπλά αναπαραγόμενη ενεργειακή στάθμη, που σημαίνει ότι το κάθε άτομο έχει ακριβώς την ίδια ενέργεια με το γειτονικό του (γεγονός που δεν απαγορεύεται από την αρχή του Pauli, λόγω μη αλληλεπίδρασης του ενός ατόμου με το άλλο). Καθώς τα δύο άτομα πλησιάζουν το ένα το άλλο (η πλήρης μελέτη επιβάλλει την αναγνώριση των δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των, για να βρεθεί η ελαχιστοποίηση της ενέργειας για τον προσδιορισμό της πλεγματικής θέσης) αυτή η ενεργειακή στάθμη θα σπάσει σε δύο ενεργειακές στάθμες που ισαπέχουν κατά μια ελάχιστη $+δE$ από την αρχική στάθμη (φαινόμενο Zeeman). Όταν μεταφερθούν N άτομα για να σχηματίσουν έναν κρύσταλλο, τότε η αρχική διακριτή ενεργειακή στάθμη θα σπάσει σε N διαφορετικά επίπεδα που θα απέχουν ενεργειακά πολύ λίγο μεταξύ τους λόγω της αλληλεπίδρασης των ατόμων αυτών. Αυτό οδηγεί πρακτικά σε μια συνεχή ενεργειακή ζώνη που παίρνει την θέση της αρχικής ενεργειακής στάθμης.

Το Σχήμα δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα της δημιουργίας μιας κρυσταλλικής δομής αδάμαντα από απομονωμένα άτομα Si. Κάθε απομονωμένο άτομο έχει τα δικά τους ενεργειακά επίπεδα. Καθώς μειώνεται η ενδοατομική απόσταση, το κάθε διακριτό ενεργειακό επίπεδο διαμορφώνεται σε ενεργειακή ζώνη. Περαιτέρω μείωση στην απόσταση αυτή οδηγεί στην δημιουργία ζωνών από διαφορετικά ατομικά επίπεδα, χάνοντας την ταυτότητά τους και διαμορφώνοντας μια και μόνο ζώνη. Όταν η απόσταση μεταξύ των ατόμων πλησιάσει την πλεγματική σταθερά ισορροπίας των ατόμων που αντιστοιχεί στο πλέγμα του αδάμαντα (το οποίο έχει πλεγματική σταθερά ίση με 0.543 nm για το Si), αυτή η ζώνη σπάει και πάλι σε δύο ζώνες. Αυτές οι ζώνες χωρίζονται από μια ενεργειακή περιοχή που είναι απαγορευμένη για τα ηλεκτρόνια του Si και όπου τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να ευρισκονται. Αυτή η ενεργειακή ζώνη ονομάζεται απαγορευμένο χάσμα ή ενεργειακό χάσμα ή ενεργειακό διάκενο E_g . Η επιτρεπτή ενεργειακή ζώνη πάνω από το απαγορευμένο διάκενο ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας ενώ η ζώνη κάτω από το απαγορευμένο διάκενο ονομάζεται ζώνη σθένους, όπως δείχνεται στο άκρο αριστερό του Σχήματος .

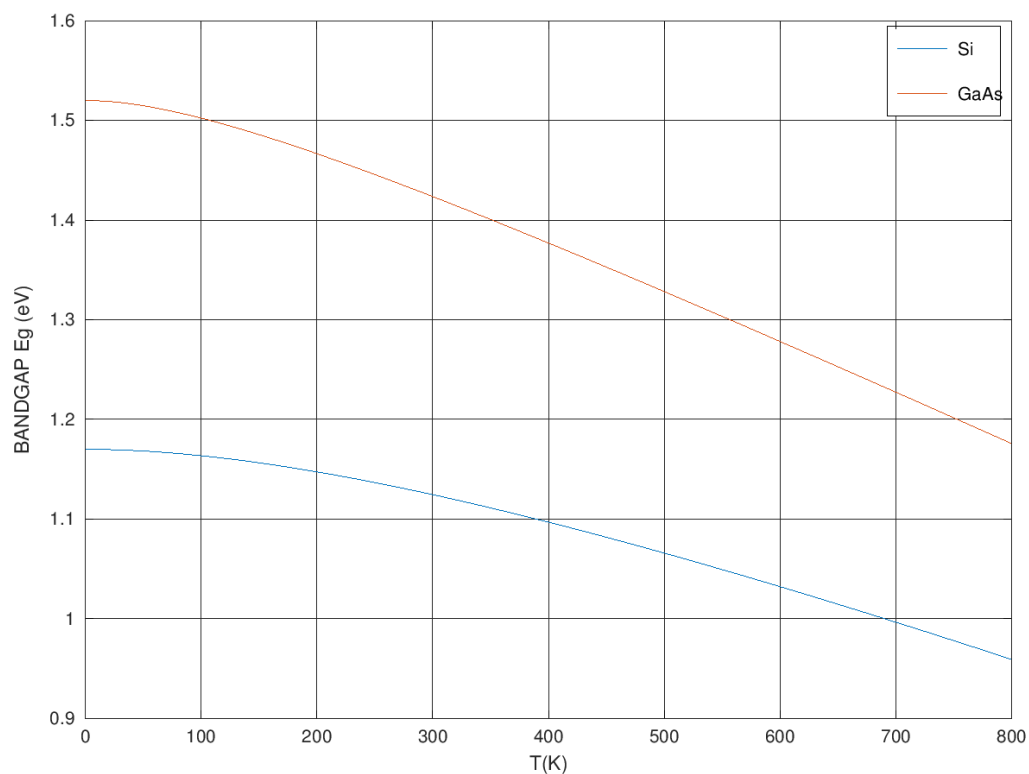


Σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, οι τιμές του ενεργειακού διακένου στο πυρίτιο και το αρσενικούχο γάλλιο είναι 1.12 eV και 1.42 eV αντίστοιχα. Στο Σχήμα 11 δίνεται το ενεργειακό διάκενο σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Το ενεργειακό διάκενο φτάνει τα 1.17 eV και τα 1.52 eV στο Si και το GaAs αντίστοιχα στους 0 K. Η σχέση μεταξύ διακένου και θερμοκρασίας δίνεται ως εξής:

$$E_g = 1.17 - \frac{(4.73 \times 10^{-4})T^2}{(T+636)} \quad \text{για το Si}$$

$$E_g = 1.52 - \frac{(5.4 \times 10^{-4})T^2}{(T+204)} \quad \text{για το GaAs}$$

Το διάγραμμα που ζητείται είναι :



Και ο κώδικας:

```
1 T=linspace(0, 800, 100);
2 Eg1 = 1.17.-(((4.73.*10.^(-4))*T.^2)./(T.+636));
3 Eg2 = 1.52.-(((5.4.*10.^(-4))*T.^2)./(T.+204));
4
5 plot(T, Eg1, T, Eg2)
6 grid on
7 legend('Si', 'GaAs');
8 xlabel('T(K)');
9 ylabel('BANDGAP Eg (eV)');
```

Όπως εύκολα φαίνεται, το ενεργειακό διάκενο μειώνεται με την θερμοκρασία και στους δύο ημιαγωγούς. Αυτό συμβαίνει γιατί ο θερμοκρασιακός συντελεστής dE_g/dT είναι αρνητικός. Πράγμα λογικό, αφού όσο αυξάνεται η θερμική ενέργεια προκαλεί αύξηση της κίνησης των ατόμων του υλικού και άρα αύξηση της απόστασης μεταξύ των πυρήνων των ατόμων. Αυτή η αυξημένη απόσταση μεταξύ των πυρήνων μειώνει την πιθανότητα ενός ηλεκτρονίου να βρεθεί στο υλικό, που με τη σειρά του μειώνει το ενεργειακό διάκενο.

3. Συγκέντρωση ενδογενών φορέων

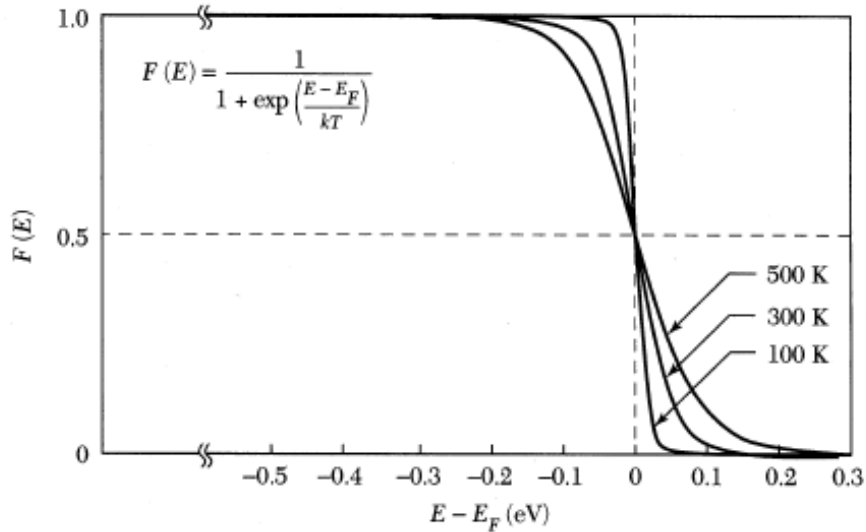
Σε πεπερασμένες θερμοκρασίες, η συνεχής θερμική διέγερση έχει σαν αποτέλεσμα την διέγερση ηλεκτρονίων από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας έναν ίδιο αριθμό οπών στην ζώνη σθένους. Ενδογενής ημιαγωγός είναι αυτός που έχει σχετικά μικρό αριθμό ατελειών ή ακαθαρσιών (impurities) σε σχέση με τον αριθμό των διεγερμένων ηλεκτρονίων και οπών. Για να βρεθεί η πυκνότητα των ηλεκτρονίων, δηλαδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου) σε έναν ενδογενή ημιαγωγό, υπολογίζεται η πυκνότητα των ηλεκτρονίων σε μια απειροελάχιστη μεταβολή της ενέργειας dE . Αυτή η πυκνότητα $n(E)$ δίνεται από το γινόμενο της πυκνότητας των επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων $N(E)$ και την πιθανότητα της κατάληψης αυτού του ενεργειακού εύρους $F(E)$. Έτσι, η πυκνότητα ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας δίνεται από το ολοκλήρωμα της $N(E)F(E)dE$ από την ελάχιστη τιμή της ζώνης αγωγιμότητας E_c (θεωρούμενης αρχικά ως $E=0$ για λόγους απλότητας), μέχρι την κορυφή της ζώνης αγωγιμότητας E_{top} :

$$n = \int_0^{E_{top}} n(E)dE = \int_0^{E_{top}} N(E)F(E)dE$$

Η πιθανότητα μια ενεργειακή κατάσταση με ενέργεια E να έχει καταληφθεί από ένα ηλεκτρόνιο δίνεται από την συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac, η οποία ονομάζεται επίσης, συνάρτηση κατανομής Fermi:

$$F(E) = \frac{1}{1+e^{\frac{(E-E_F)}{kT}}}$$

Όπου k η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin, και E_F το επίπεδο Fermi. Το επίπεδο Fermi είναι η ενέργεια στην οποία η πιθανότητα κατάληψής της από ένα ηλεκτρόνιο είναι ακριβώς $\frac{1}{2}$. Αυτό συμβαίνει όταν $E - E_F = 0,55 \text{ eV}$ ($F(E) = 0,5$), όπως μπορούμε να δούμε από το παραπάνω διάγραμμα. Η κατανομή της συνάρτησης Fermi δίνεται στο Σχήμα για διαφορετικές θερμοκρασίες.

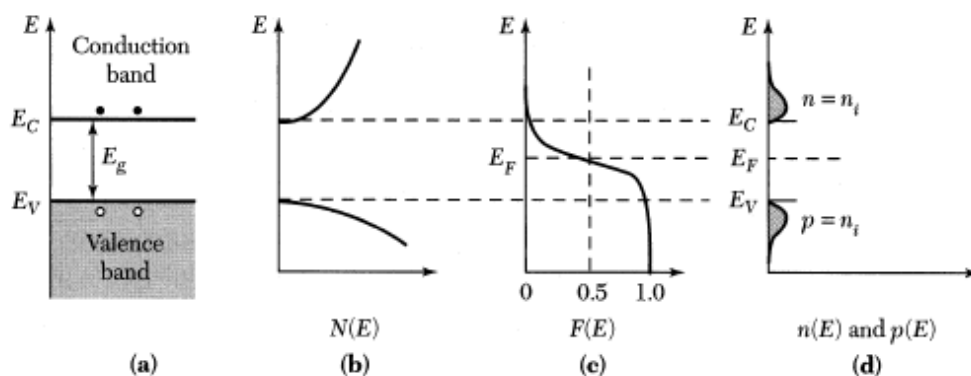


Η $F(E)$ είναι συμμετρική γύρω από το E_F . Για ενέργειες που είναι $3kT$ πάνω και κάτω από το επίπεδο Fermi, το εκθετικό της συνάρτησης Fermi γίνεται μεγαλύτερο από 20 και μικρότερο από 0.05 αντίστοιχα. Κατά συνέπεια η συνάρτηση Fermi μπορεί να γραφτεί προσεγγιστικά από απλούστερες εξισώσεις:

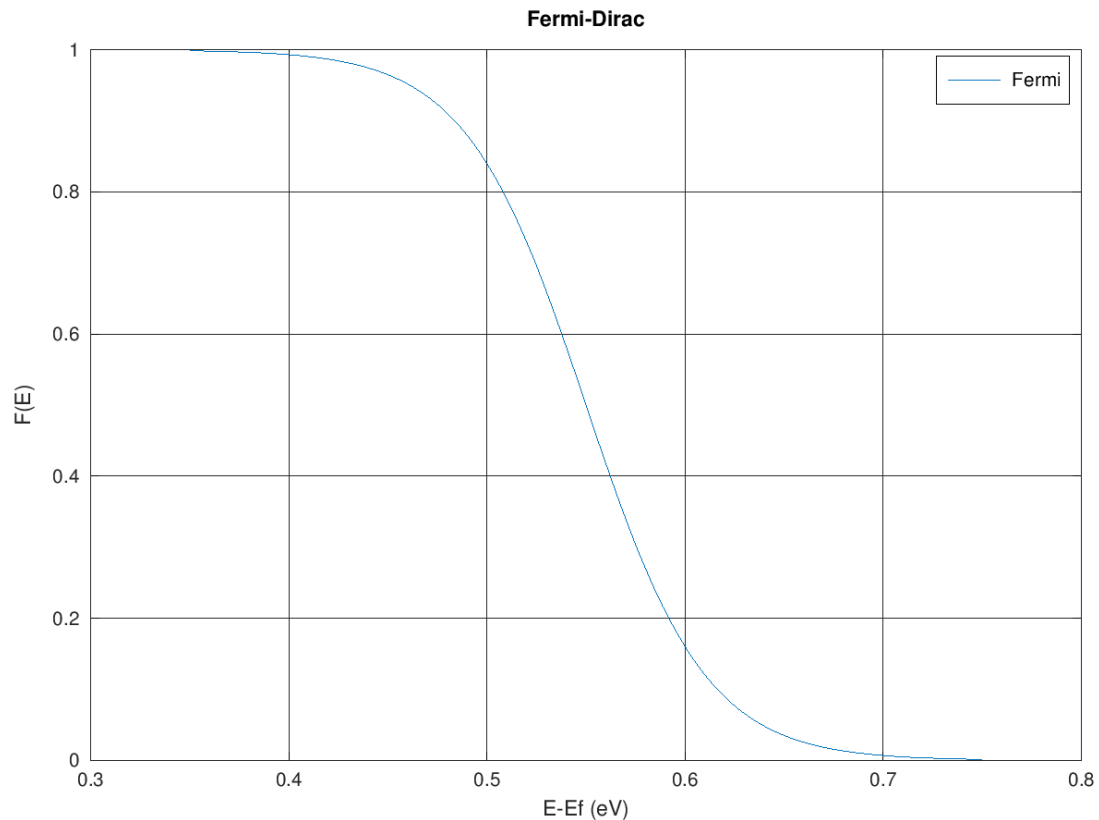
$$F(E) \cong e^{-\frac{(E-E_F)}{kT}}, \text{ για } E - E_F > 3kT$$

$$F(E) \cong 1 - e^{-\frac{(E-E_F)}{kT}}, \text{ για } E - E_F < 3kT$$

(πιθανότητα κατάληψης μιας ενεργειακής κατάστασης από μια οπή σε ενέργεια E)



Το διάγραμμα που ζητείται είναι:



Και ο κώδικας:

```
1 E=linspace(0.35,0.75,100);
2 a=E-0.55;
3 b=8.617*(10.^(-5))*350;
4 c=1.0./(1.+e.^(a/b));
5
6 plot(E,c);
7
8 grid on
9 legend('Fermi');
10 xlabel('E-Ef (eV)');
11 ylabel('F(E)');
12 title('Fermi-Dirac');
```

Η συνάρτηση κατανομής Fermi, όπως φαίνεται, είναι συμμετρική γύρω από το E_F . Με βάση τον τύπο και το διάγραμμα, για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας η συνάρτηση κατανομής Fermi παρουσιάζει μικρή διαφορά. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία η καμπύλη γίνεται λιγότερο απότομη και εκτείνεται σε υψηλότερες ενέργειες. Παρόλα αυτά, το επίπεδο της ενέργειας Fermi παραμένει σταθερό για οποιαδήποτε μεταβολή της θερμοκρασίας.

Στη ζώνη αγωγιμότητας υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από επιτρεπτές καταστάσεις. Παρ'όλα αυτά, στους ενδογενείς ημιαγωγούς θα υπάρχουν μόνο μερικά ελεύθερα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας και κατά συνέπεια η πιθανότητα κατάληψης ενός ηλεκτρονίου μιας από αυτές τις καταστάσεις είναι μικρή. Επίσης, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ενεργειακών στην ζώνη σθένους. Αντίθετα από την ζώνη αγωγιμότητας, οι περισσότερες από αυτές είναι κατειλημμένες από ηλεκτρόνια. Έτσι, η πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να έχει καταλάβει μια από αυτές τις ενεργειακές καταστάσεις στην ζώνη σθένους είναι σχεδόν μονάδα. Έτσι, στην ζώνη σθένους θα υπάρχουν μόνο λίγες μη κατειλημμένες ενεργειακές καταστάσεις, δηλαδή οπές. Όπως φαίνεται από το Σχήμα το επίπεδο Fermi είναι περίπου στην μέση του ενεργειακού διακένου, δηλαδή η E_F είναι αρκετά kT κάτω από την E_C . Δεδομένου ότι η E_F είναι μια εκθετικώς μειούμενη συνάρτηση της E , η τιμή της E_{top} , μπορεί να αντικατασταθεί από το άπειρο. Έτσι:

$$n = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^\infty E^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E-E_F}{kT}} dE$$

Θέτοντας $x=E/kT$, η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$n = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (kT)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{E_F}{kT}} \int_0^\infty x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx$$

Το ολοκλήρωμα της παραπάνω σχέσης ισούται με $\sqrt{\pi}/2$. Έτσι:

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{E_F}{kT}}$$

Αν δώσουμε την τιμή E_C στην ελάχιστη ενέργεια της ζώνης αγωγιμότητας (αντί της τιμής 0):

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}} = N_C e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}}$$

Και

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

όπου N_C είναι η ολική πυκνότητα καταστάσεων στην ζώνη αγωγιμότητας. Σε θερμοκρασία δωματίου (300K), η N_C είναι $2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ για το Si και $4.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ για το GaAs και $E_C - E_F = E_g / 2$.

Ομοίως, βρίσκεται η πυκνότητα οπών p στην ζώνη σθένους:

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}} = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}}$$

Όπου

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

είναι η ολική πυκνότητα καταστάσεων στην ζώνη σθένους. Σε θερμοκρασία δωματίου (300K), η N_V είναι $1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ για το Si και $7.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ για το GaAs.

Εφαρμόζοντας τους παραπάνω τύπους η πυκνότητα των ηλεκτρονίων n στην ζώνη αγωγιμότητας και την πυκνότητα των οπών p στην ζώνη σθένους είναι αντίστοιχα:

Για το Si :

$$n = (2.8 * 10^{19}) * e^{\{-[(1.12/2)/((8.62*10^{-5})*300)]\}} = 1.102*10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = (1.04 * 10^{19}) * e^{\{-[(1.12/2)/((8.62*10^{-5})*300)]\}} = 4.095*10^9 \text{ cm}^{-3}$$

Για το GaAs :

$$n = (4.7 * 10^{17}) * e^{\{-[(1.42/2)/((8.62*10^{-5})*300)]\}} = 1.102*10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = (7.0 * 10^{17}) * e^{\{-[(1.42/2)/((8.62*10^{-5})*300)]\}} = 0.834*10^6 \text{ cm}^{-3}$$

Μάλιστα, για τους ενδογενείς ημιαγωγούς ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου στη ζώνη αγωγιμότητας (n) ισούται με τον αριθμό των οπών ανά μονάδα όγκου στη ζώνη σθένους (p), δηλαδή $n = p$.

Για τους ενδογενείς ημιαγωγούς, ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου στην ζώνη αγωγιμότητας ισούται με τον αριθμό των οπών ανά μονάδα όγκου στην ζώνη σθένους, ήτοι $n = p = n_i$, όπου n_i είναι η ενδογενής πυκνότητα φορέων. Η σχέση μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών δίνεται στο Σχήμα. Παρατηρείται ότι η σκιασμένη επιφάνεια στην ζώνη αγωγιμότητας είναι ίδια με την επιφάνεια στην ζώνη σθένους.

Η τιμή του επιπέδου Fermi για έναν ενδογενή ημιαγωγό δίνεται συνδυάζοντας τις εξισώσεις που δίνουν το N_C και το N_V :

$$E_F = E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right) = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right)$$

Σε θερμοκρασία δωματίου, ο δεύτερος όρος είναι πολύ μικρότερος του πρώτου. Έτσι, το ενδογενές επίπεδο Fermi, E_i , δηλαδή το επίπεδο Fermi σε έναν ενδογενή ημιαγωγό, είναι περίπου στην μέση του ενεργειακού διακένου.

Η πυκνότητα ενδογενών φορέων δίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις:

$$np = n_i^2$$

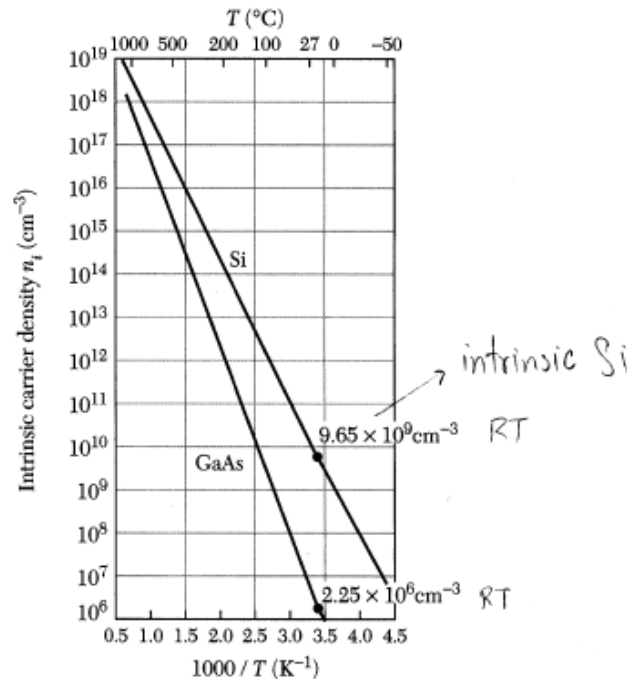
$$n_i^2 = N_C N_V e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

Και

$$n_i = \sqrt{N_V N_C} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

Όπου $E_g = (E_C - E_V)$. Η εξίσωση $np = n_i^2$ ονομάζεται νόμος δράσης των μαζών, και ισχύει όπως θα αποδειχθεί στο επόμενο κεφάλαιο και για ενδογενείς και για εξωγενείς ημιαγωγούς (δηλαδή για ημιαγωγούς προσμίξεων, δηλαδή για ημιαγωγούς που είναι ντοπαρισμένοι με προσμίξεις) σε συνθήκες θερμοκρασιακής ισορροπίας. Από την εξίσωση αυτή φαίνεται ότι σε έναν ημιαγωγό προσμίξεων, η αύξηση της μιας κατηγορίας φορέων οδηγεί στην μείωση της άλλης. Αυτό γίνεται λόγω της επανασύνδεσης φορέων, κάτι που θα αναλυθεί αργότερα. Σε κάθε περίπτωση, το γινόμενο των ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας με τις οπές στην ζώνη σθένους είναι σταθερό σε μια δοσμένη θερμοκρασία και ίσο με το τετράγωνο του αριθμού των φορέων στον ενδογενή ημιαγωγό.

Το Σχήμα δίνει την εξάρτηση του αριθμού των φορέων n_i από την θερμοκρασία για το Si και το GaAs. Σε θερμοκρασία δωματίου, το n_i είναι $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ για το Si και $1.79 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ για το GaAs. Όπως αναμένεται, όσο μεγαλύτερο είναι το ενεργειακό διάκενο, τόσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση φορέων (προσοχή, η κλίμακα της συγκέντρωσης είναι λογαριθμική).



Απόδειξη :

Αρχικά, με κατάλληλες ολοκληρώσεις οδηγείται κανείς στις παρακάτω δύο εξισώσεις για την συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας και την συγκέντρωση των οπών στην ζώνη σθένους, αντίστοιχα:

$$n = N_c * e^{\left(-\frac{E_c - E_f}{kT} \right)}$$

$$p = N_v * e^{\left(-\frac{E_f - E_v}{kT} \right)}$$

Έχοντας καταλήξει σε αυτές τις δύο σχέσεις χωρίς να γίνει καμία ειδική παραδοχή πέραν του ότι η E_F απέχει ορισμένα kT από τις άκρες των ζωνών, σημαίνει ότι η σχέση έχει γενική ισχύ. Παίρνοντας, λοιπόν, το γινόμενο np καταλήγει κανείς στην παρακάτω σχέση:

$$n * p = N_c * N_v * e^{\left(-\frac{E_g}{kT} \right)}$$

όπου $E_g = E_C - E_V$ είναι το ενεργειακό διάκενο, N_C είναι ολική πυκνότητα καταστάσεων στην ζώνη αγωγιμότητας και N_V είναι η ολική πυκνότητα καταστάσεων στην ζώνη σθένους.

Παρατηρώντας την παραπάνω έκφραση, το γινόμενο np εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και τις ιδιότητες του υλικού και όχι το επίπεδο Fermi. Επίσης για ενδογενείς ημιαγωγούς όπου $n = p$ και τα συμβολίζουμε με n_i (ενδογενή συγκέντρωση ηλεκτρονίων ή οπών). Άρα:

$$n \cdot p = n_i^2 = N_C \cdot N_V \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

Τέλος, αυτή η συνθήκη ισχύει πάντοτε εφόσον επικρατούν συνθήκες θερμικής ισορροπίας, εκτός των περίπτωσης εξωτερικής διέγερσης (π.χ. φωτοδιέγερσης).

4. Ημιαγωγοί προσμίξεων: δότες και αποδέκτες

Σε συνθήκες ολοκληρωμένου ιονισμού ισχύει ότι:

$n = N_D$, όπου N_D είναι η συγκέντρωση των δοτών.

Από τις εξισώσεις

$$(n = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} \text{ και } n = N_D)$$

Υπολογίζεται το επίπεδο Fermi σε σχέση με την φαινόμενη πυκνότητα καταστάσεων N_C και την πυκνότητα προσμίξεων N_D :

$$E_C - E_F = kT \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$$

Αντίστοιχα, η συγκέντρωση των οπών είναι:

$p = N_A$, όπου N_A είναι η πυκνότητα των αποδεκτών. Με παρόμοιο τρόπο όπως πριν:

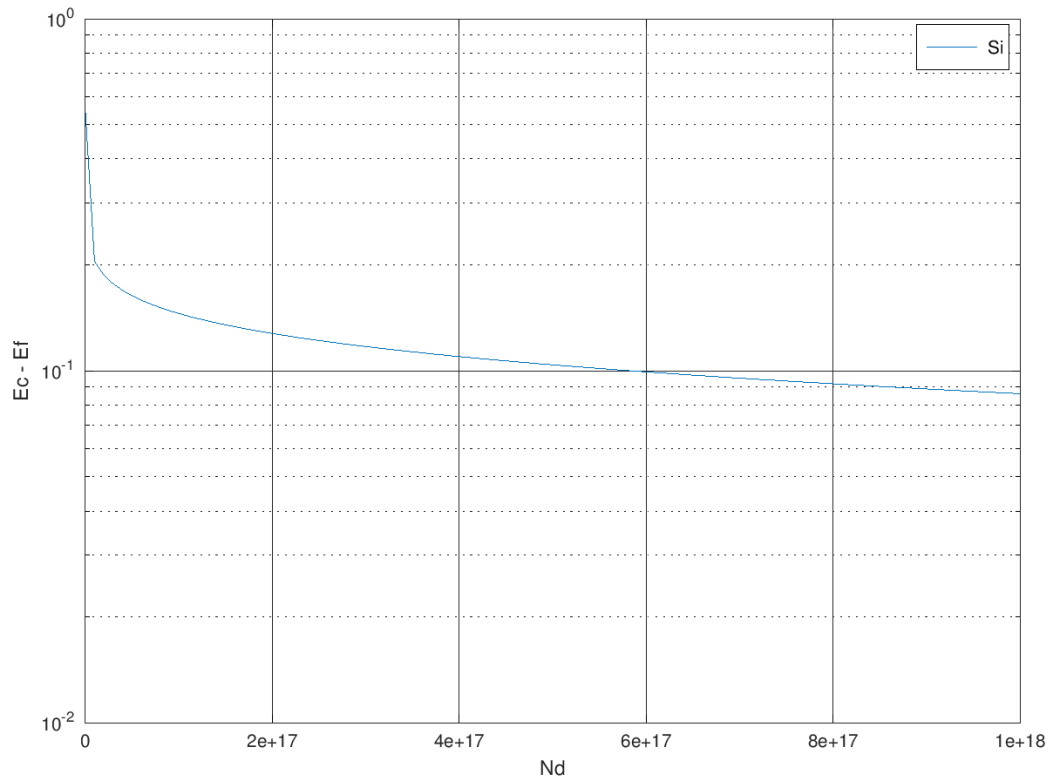
$$E_F - E_V = kT \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right)$$

Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση δοτών, τόσο μικρότερη είναι η ενεργειακή διαφορά ($E_C - E_F$).

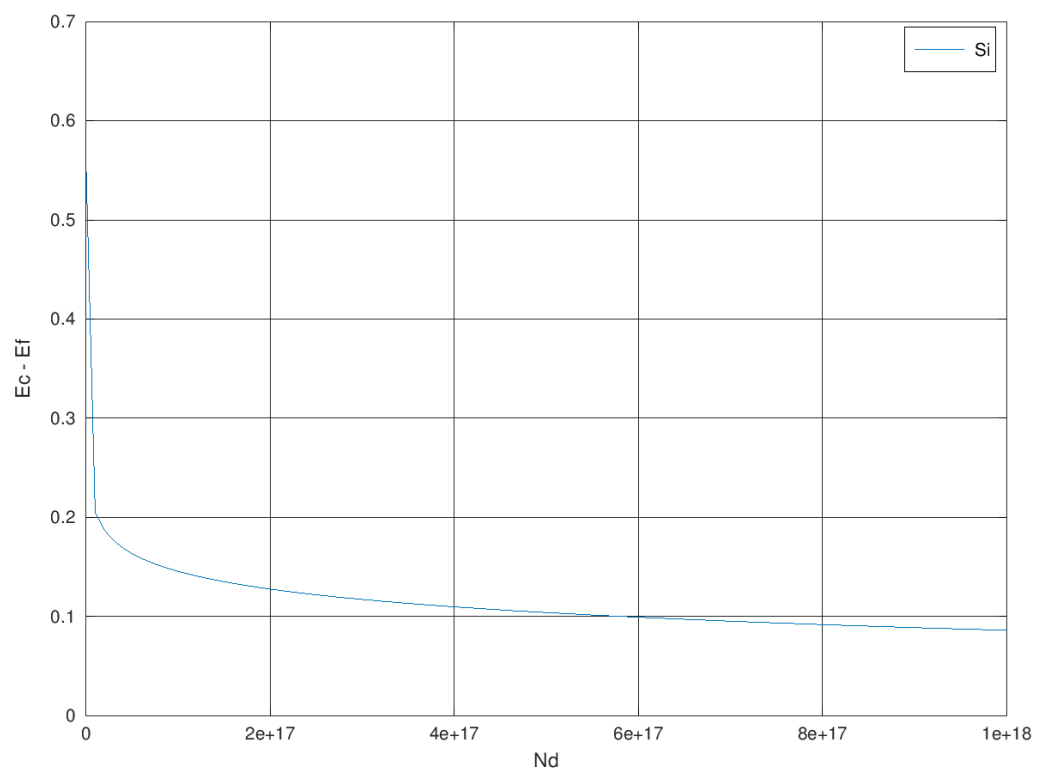
Διαγράμματα :

➤ Για το \underline{Si}

- Σε λογαριθμική κλίμακα (για \mathbf{n})



- Σε απλή κλίμακα (για \mathbf{n})

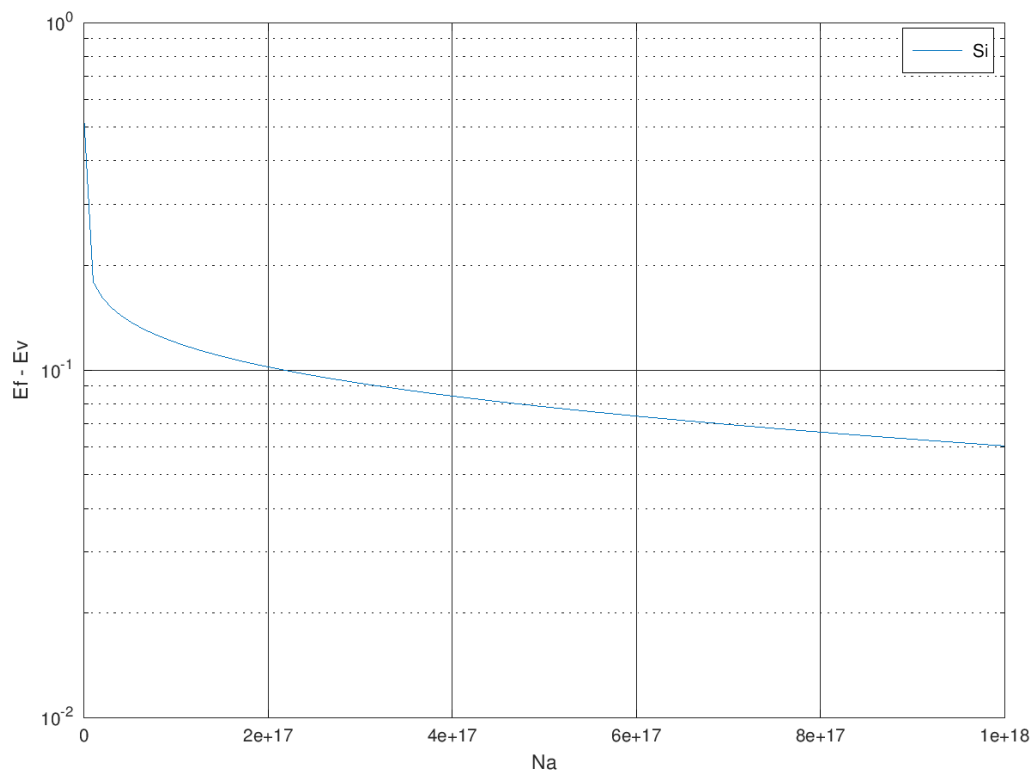


Και ο κώδικας :

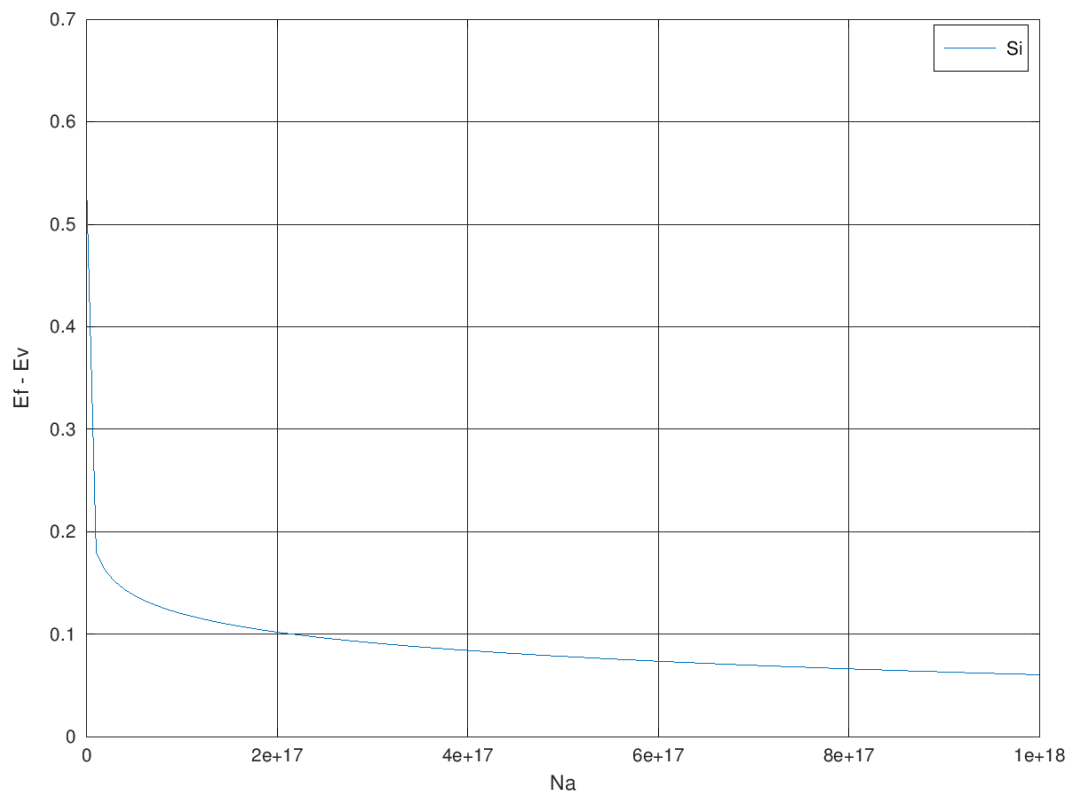
```
1 Nd=linspace(10^10, 10^18 , 100);
2
3 kT=300.*8.617.*(10.^(-5));
4 Nc=2.8.*(10.^19);
5 x=kT*(log(Nc./Nd));
6
7 plot (Nd, x)
8 grid on
9 legend('Si');
10 xlabel('Nd');
11 ylabel('Ec - Ef');
```

Στην παραπάνω απεικόνιση φαίνεται πώς μεταβάλλεται $E_c - E_F$ συναρτήσει της πυκνότητας προσμίξεων N_D (δότες). Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα δοτών, τόσο το επίπεδο Fermi πλησιάζει το κατώτερο επίπεδο της ζώνης αγωγιμότητας E_c .

- Σε λογαριθμική κλίμακα (για p)



- Σε απλή κλίμακα (για **p**)



Και ο κώδικας :

```

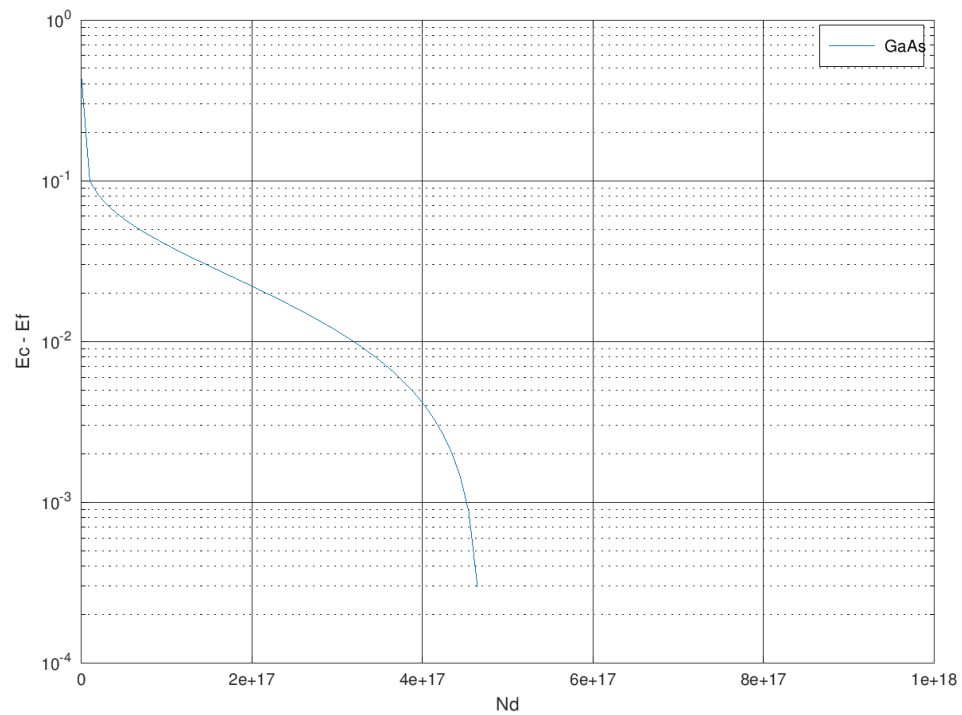
1 Na=linspace(10^10, 10^18 , 100);
2
3 kT=300.*8.617.*(10.^(-5));
4 Nv=1.04.*(10.^19);
5 x=kT*(log(Nv./Na));
6
7 plot (Na, x)
8 grid on
9 legend('Si');
10 xlabel('Na');
11 ylabel('Ef - Ev');
12

```

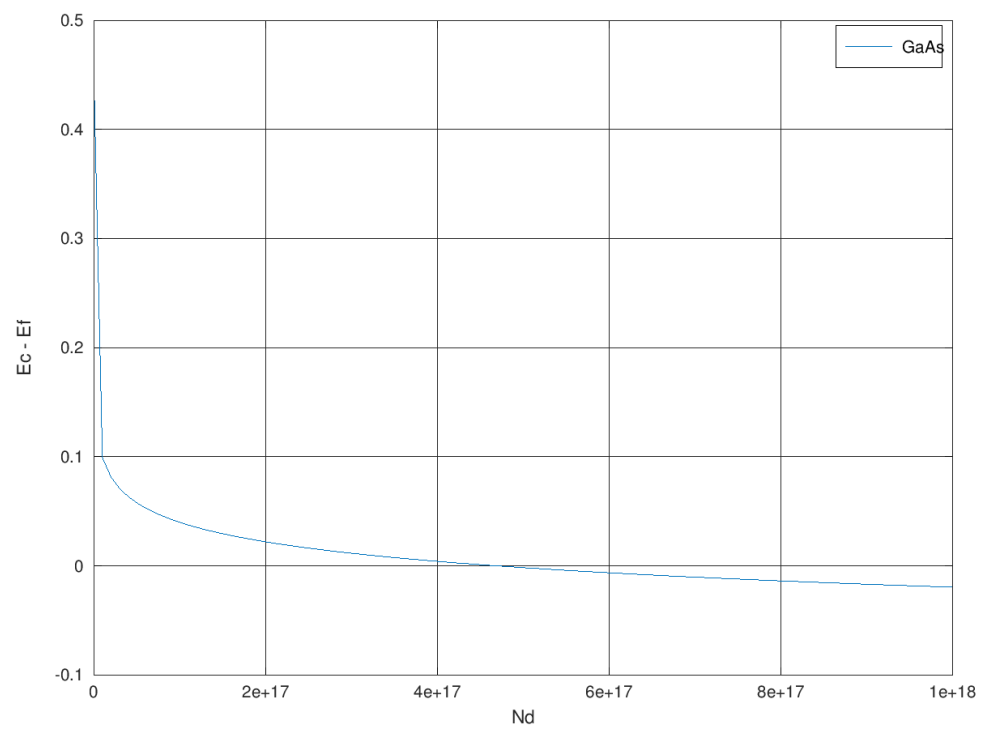
Αντίστοιχα, στην παραπάνω απεικόνιση φαίνεται πώς μεταβάλλεται $E_F - E_v$ συναρτήσει της πυκνότητας προσμίξεων N_A (αποδέκτες). Μάλιστα, και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται κάτι ανάλογο. Πιο συγκεκριμένα, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα αποδεκτών, το επίπεδο Fermi πλησιάζει όλο και περισσότερο το μέγιστο επίπεδο της ζώνης σθένους E_v και η διαφορά $E_F - E_v$ μειώνεται.

➤ Για το GaAs :

- Σε λογαριθμική κλίμακα (για **n**)



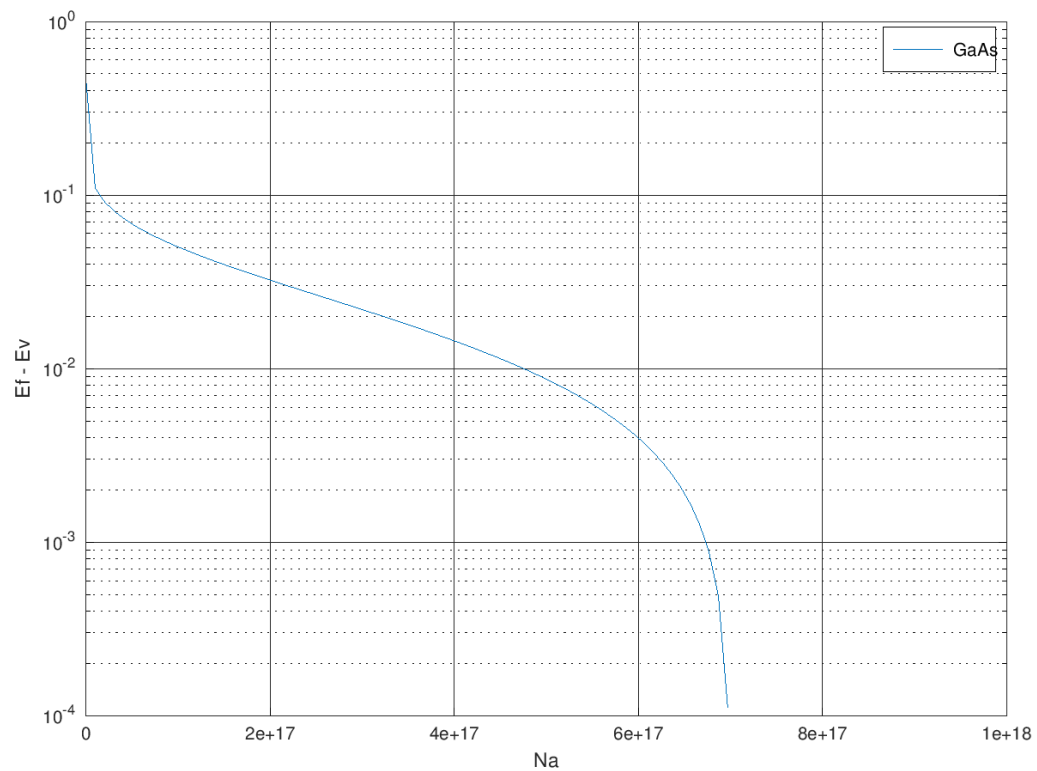
- Σε απλή κλίμακα (για **n**)



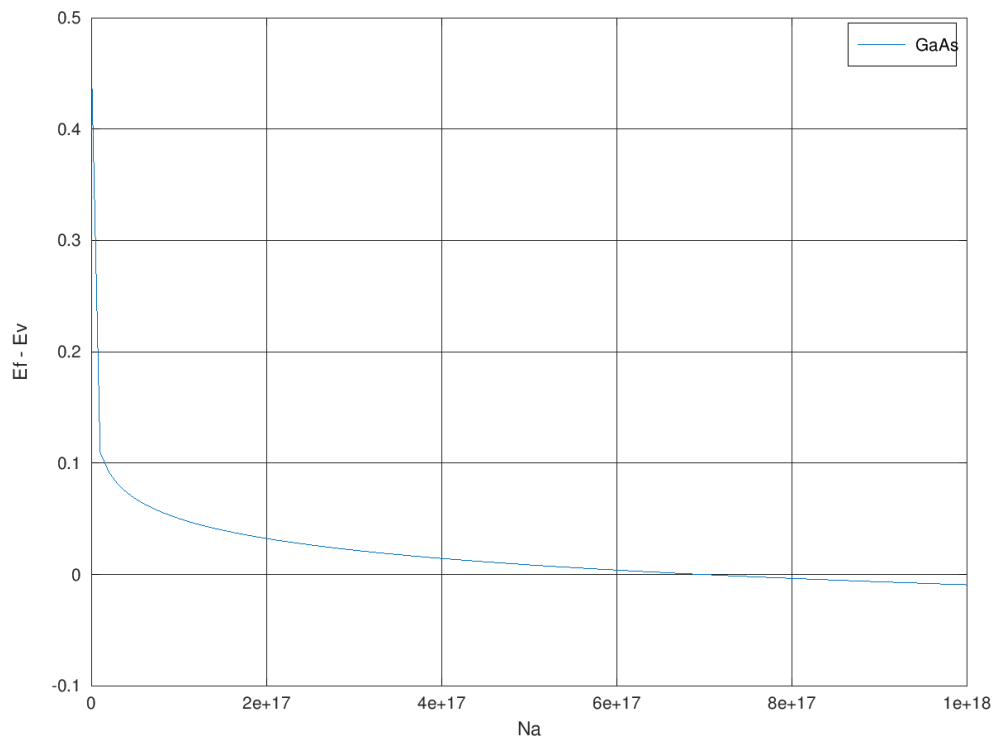
Και ο κώδικας :

```
1 Nd=linspace(10^10, 10^18 , 100);
2
3 kT=300.*8.617.*(10.^(-5));
4 Nc=4.7.*(10.^17);
5 x=kT*(log(Nc./Nd));
6
7 plot(Nd, x)
8 grid on
9 legend('GaAs');
10 xlabel('Nd');
11 ylabel('Ec - Ef');
```

- Σε λογαριθμική κλίμακα (για p)



- Σε απλή κλίμακα (για \mathbf{p})



Και ο κώδικας :

```
1 Na=linspace(10^10, 10^18 , 100);
2
3 kT=300.*8.617.*(10.^(-5));
4 Nv=7.0.*(10.^17);
5 x=kT*(log(Nv./Na));
6
7 plot (Na, x)
8 grid on
9 legend('GaAs');
10 xlabel('Na');
11 ylabel('Ef - Ev');
```

Και στην περίπτωση του GaAs προκύπτουν αντίστοιχα συμπεράσματα.