



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Μάθημα: Δομή και Ηλεκτρικές Ιδιότητες Υλικών

2ο Εξάμηνο

Αναφορά για το Εργαστήριο Προσομοίωσης με χρήση του πακέτου MATLAB

Καίσαρης Άγγελος-Μάριος (AM 03123886), Καρουζάκη Αντωνία (AM 03124747),

Κουλουριώτη Βαρβάρα (AM 03124070)

ΟΜΑΔΑ 4

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΑΣΚΗΣΗ 1	3
ΘΕΩΡΙΑ	3
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	4
ΑΣΚΗΣΗ 2	5
ΘΕΩΡΙΑ	5
ΑΣΚΗΣΗ 3	7
ΘΕΩΡΙΑ	7
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	8

ΑΣΚΗΣΗ 1

ΘΕΩΡΙΑ

Ένα από τα ζητήματα που μας απασχολούν στη μελέτη της δομής των ημιαγωγών είναι ο αριθμός ηλεκτρονίων και οπών στη ζώνη αγωγιμότητας και τη ζώνη σθένους αντίστοιχα. Προκειμένου να το επιτύχουμε αυτό, ένα από τα μεγέθη που εισήχθησαν ήταν αυτό της *πυκνότητας καταστάσεων*. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, αν γνωρίζαμε την πιθανότητα κατάληψης κάθε ενεργειακής στάθμης, το άθροισμά τους θα ικανοποιούσε το πρόβλημα, αλλά και ότι οι ενέργειες σε κάθε ζώνη είναι της τάξης των 10^{23} /mole, καταλήξαμε στους τύπους:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} g_n(E)P(E)dE \text{ για τα ηλεκτρόνια και } p = \int_{-\infty}^{E_v} g_p(E)(1 - P(E))dE \text{ για τις οπές}$$

Όπου $g(E)$ είναι η πυκνότητα καταστάσεων.

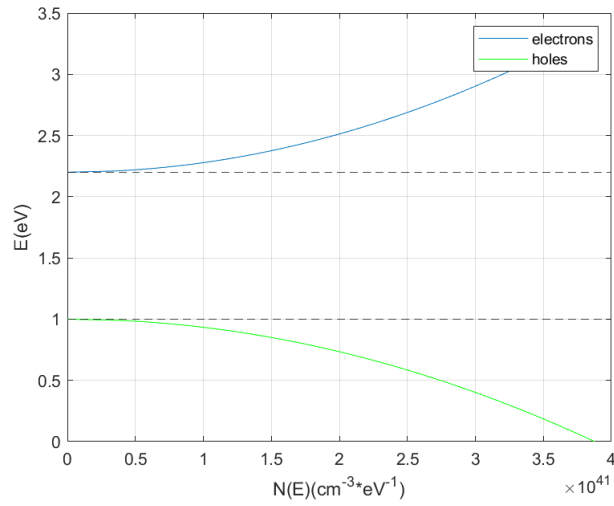
Γνωρίζοντας ότι η επιφάνεια που δουλεύουμε στους ημιαγωγούς είναι σφαιρική και αλλά και τον τύπο της ενέργειας του ηλεκτρονίου στις 3 διαστάσεις, καταλήγουμε έπειτα από μαθηματικές πράξεις στους τύπους της άσκησής μας οι οποίοι σε γενική μορφή γράφονται:

$$g(E) = V4\pi \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \cdot E^{1/2}$$

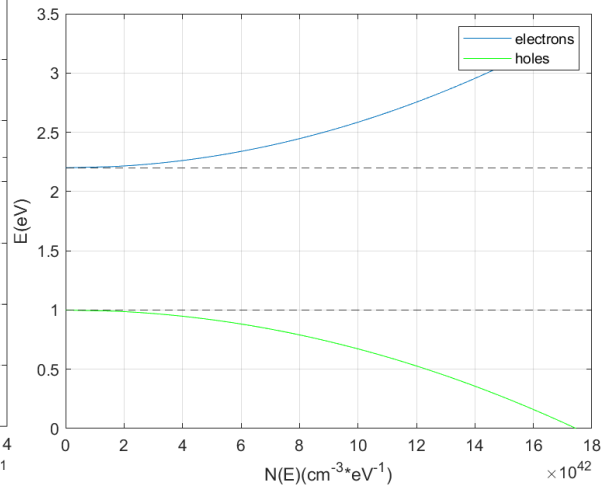
Όπου στη θέση του m τοποθετούνται οι ενεργές μάζες των ηλεκτρονίων ή των οπών και στη θέση του E οι διαφορές ενέργειας από τον πυθμένα της ζώνης σθένους ή την κορυφή της ζώνης αγωγιμότητας αντίστοιχα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

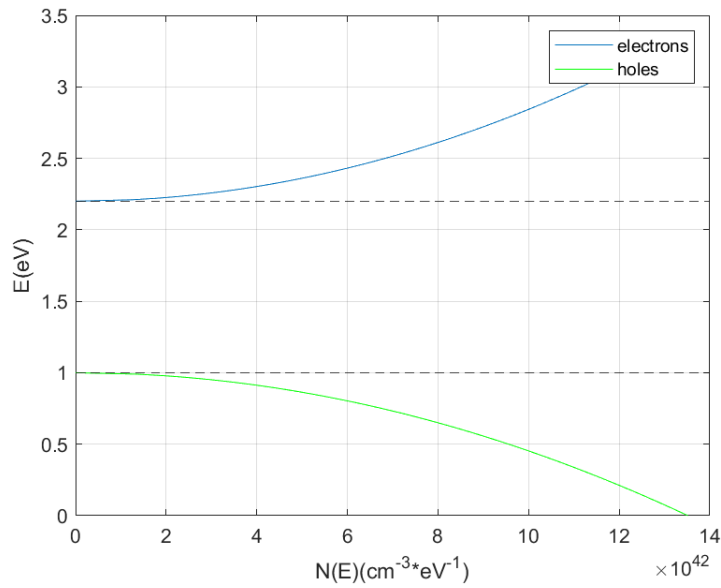
Παρακάτω βλέπετε τα διαγράμματα για $i=070$, $i=886$ και $i=747$ αντίστοιχα:



Εικόνα 1.1: Διάγραμμα $N(E)$ για $i=070$



Εικόνα 1.2: Διάγραμμα $N(E)$ για $i=886$



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα $N(E)$ για $i=747$

ΑΣΚΗΣΗ 2

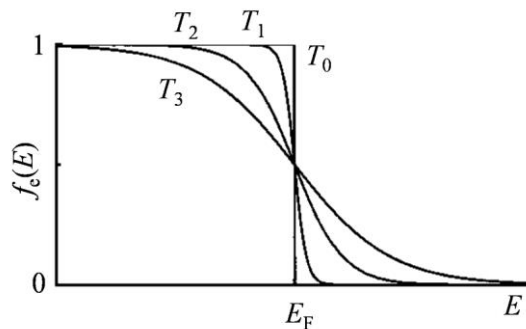
ΘΕΩΡΙΑ

Ενδογενής ονομάζεται ο ημιαγωγός ο οποίος έχει μικρό αριθμό ατελειών σε σχέση με τον αριθμό των διεγερμένων ηλεκτρονίων και οπών του. Η ενδογενής πυκνότητα ηλεκτρονίων, δηλαδή ο αριθμός ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου σε έναν ενδογενή ημιαγωγό, ισούται με το ολοκλήρωμα:

$$\int_{E_c}^{E_{top}} N(E)F(E)dE,$$

όπου $N(E)$ είναι η πυκνότητα επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων και $F(E) = \frac{1}{1+e^{\frac{(E-E_F)}{KT}}}$

είναι η πιθανότητα κατάληψης μίας ενεργειακής στάθμης Fermi-Dirac, E_c η ελάχιστη ενέργεια της ζώνης αγωγιμότητας και E_{top} η μέγιστη.



Εικόνα 2.1: Κατανομή Fermi-Dirac για την πιθανότητα κατάληψης
Ενεργειακών σταθμών

Έπειτα από πράξεις και απλοποιήσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές ότι σε έναν τέτοιο ημιαγωγό η πιθανότητα κατάληψης μίας ενεργειακής στάθμης στη ζώνη σθένους είναι σχεδόν μονάδα και αντίστοιχα στη ζώνη αγωγιμότητας σχεδόν μηδέν, καταλήγουμε στον τύπο:

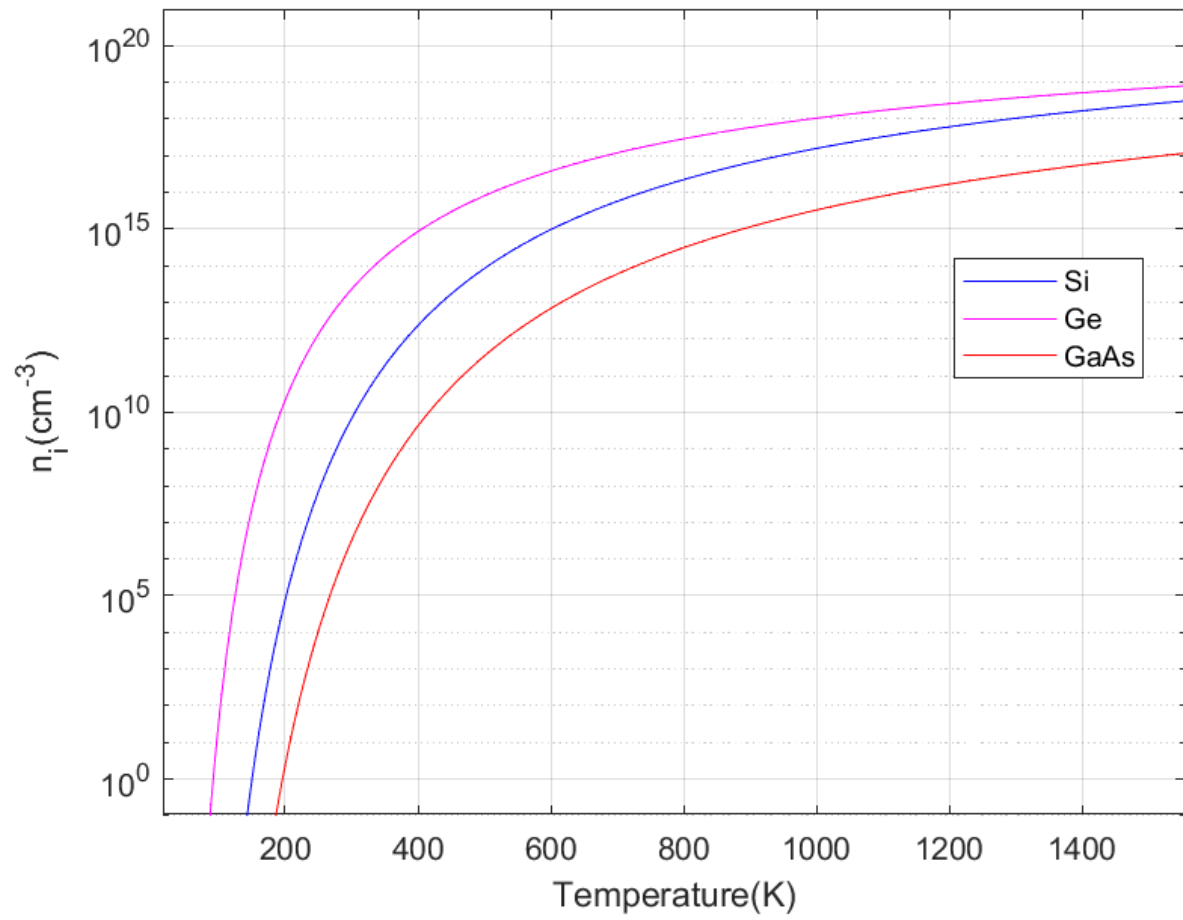
$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_n K T}{h^2} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_c - E_F}{KT}},$$

ο οποίος δίνει ακριβώς αυτή την πυκνότητα.

Σημειώνεται ότι K είναι η σταθερά Boltzmann και ότι $-(E_c - E_F)$ είναι το ενεργειακό διάκενο E_g .

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Παρακάτω παραθέτουμε το διάγραμμα που προκύπτει με χρήση του κώδικα MATLAB:

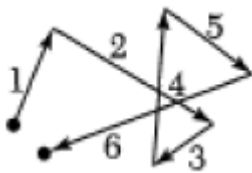


Εικόνα 2.2: Διάγραμμα ενδογενούς πυκνότητας e^- συναρτήσει της θερμοκρασίας για τα υλικά Si, Ge, GaAs

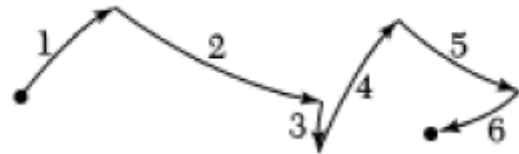
ΑΣΚΗΣΗ 3

ΘΕΩΡΙΑ

Σε έναν ημιαγωγό, τα ηλεκτρόνια και οι οπές αποκτούν δύο ειδών ταχύτητες: η μία είναι η θερμική ταχύτητα, λόγω της θερμοκρασίας, και η δεύτερη είναι η ταχύτητα ολίσθησης, η οποία οφείλεται στο εξωτερικά επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, όπως όταν συνδέουμε τα ωμικά άκρα του αγωγού με τάση. Εξαιτίας της θερμικής ταχύτητας, έπειτα από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, η συνολική μετατόπιση είναι μηδέν, σε αντίθεση με την ταχύτητα ολίσθησης, εξαιτίας τη οποίας υπάρχει μία μη μηδενική μετατόπιση.



Εικόνα 3.1: Τυχαία κίνηση λόγω θερμικής ταχύτητας



Εικόνα 3.2: Συνδυαστική κίνηση λόγω θερμικής ταχύτητας και ταχύτητας ολίσθησης

Ένα από τα ζητήματα που προκύπτει, είναι αυτό του υπολογισμού της ταχύτητας ολίσθησης. Επειδή μεταξύ δύο σκεδάσεων, η ορμή που “κερδίζει” το εκάστοτε ηλεκτρόνιο “χάνεται” λόγω της επόμενης σκέδασης, κάθε χρονική στιγμή, η ορμή του στη διάρκεια της ελεύθερης αυτής διαδρομής είναι ίση με την ορμή που αποκτά τη δεδομένη χρονική στιγμή t που θέλουμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα ολίσθησης. Τουτέστιν, ισχύει η σχέση:

$$-qEt_c = m_n v_n, \text{ όπου } t_c \text{ είναι ο μέσος ελεύθερος χρόνος.}$$

Επιλύοντας ως προς v_n η εξίσωση γίνεται:

$$v_n = -\left(\frac{qt_c}{m_n}\right)E$$

Απ' όπου συμπεραίνουμε ότι η ταχύτητα ολίσθησης είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, ονομάζουμε *κινητικότητα* του ηλεκτρονίου τον συντελεστή αναλογίας $\left(\frac{qt_c}{m_n}\right)$ και τον συμβολίζουμε με μ_n . Αντίστοιχα για τις οπές, συμβολίζεται με μ_p και η μόνη διαφορά στη σχέση είναι η απουσία του $-$, αφού η κίνησή τους είναι της ίδιας φοράς με το E .

Εξαιτίας, συνεπώς, αυτής της κίνησης, αναπτύσσεται (σε έναν αντιστάτη) *ρεύμα ολίσθησης*, η πυκνότητα του οποίου ισούται με:

$$J_n = \frac{I_n}{A} = \sum_{i=0}^n (-qn v_i) = -qn v_n = qn \mu_n E,$$

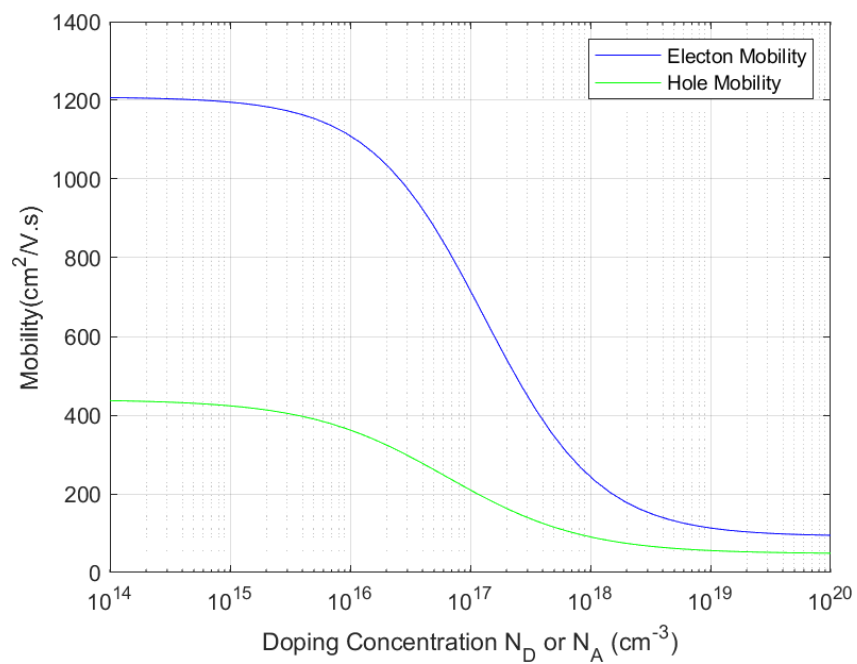
Χρησιμοποιώντας την πιο πάνω σχέση για την ταχύτητα ολίσθησης.

Εργαζόμενοι αναλογικά και για τις οπές, η συνολική πυκνότητα ρεύματος, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και τις οπές, είναι:

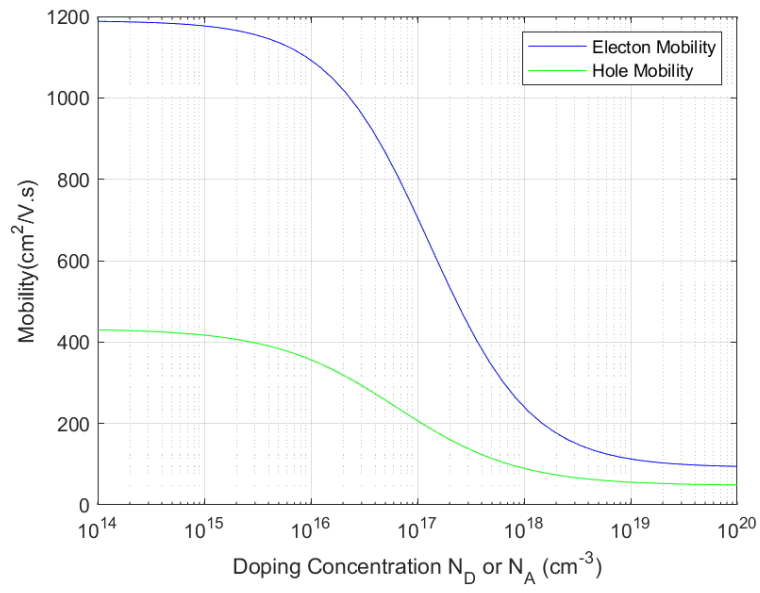
$$J = J_n + J_p = (qn\mu_n + qp\mu_p)E, \text{ η οποία είναι η μία εκ των σχέσεων της άσκησής μας.}$$

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

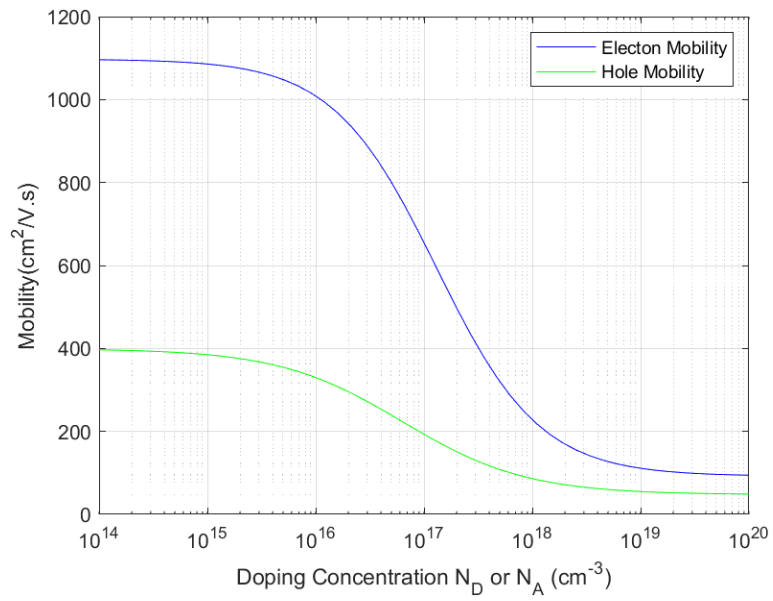
Παρακάτω παραθέτουμε τα διαγράμματα για $L=0.8070$, $L=0.8886$, $L=0.8474$ σύμφωνα με τους ΑΜ μας:



Εικόνα 3.3: Διαγράμματα $\mu(N)$ για $L=0.8886$



Εικόνα 3.4: Διαγράμματα $\mu(N)$ για $L=0.8747$



Εικόνα 3.5: Διαγράμματα $\mu(N)$ για $L=0.8070$