

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Μάθημα: ΔΟΜΗ & ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Ονοματεπώνυμο: Δόντη Ειρήνη
Αριθμός Μητρώου: 03119839
Αριθμός Εγγραφής: 139
Εξάμηνο: 2^ο**

**Αθήνα
Μάιος 2020**

Πίνακας περιεχομένων:

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ	1
1.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ:	1
1.1. Ενεργειακό Διάκενο E_g :	1
1.2. Καμπύλη Fermi $F(E)$:	1
1.3. Ολική πυκνότητα καταστάσεων :	1
1.4. Νόμος δράσης μαζών $n_p = n_i^2$:	2
1.5. Πυκνότητα ηλεκτρονίων σε ημιαγωγό προσμίξεων συναρτήσει της θερμοκρασίας :	2
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ :	3
2.1. Άσκηση 1 :	3
2.2. Άσκηση 2 :	4
2.3. Άσκηση 3 :	6
2.4. Άσκηση 4 :	7
2.5. Άσκηση 5 :	10
3.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ :	14
4.Πίνακας Διαγραμμάτων-Εικόνων :	15
5.Βιβλιογραφία :	15

1.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ:

1.1. Ενεργειακό Διάκενο E_g :

Κάθε άτομο κατέχει ίδια ενεργειακά επίπεδα με το γειτονικό του, αν και μόνο αν δεν υπάρχουν μεταξύ τους δυνάμεις αλληλεπίδρασης. Καθώς δύο γειτονικά άτομα προσεγγίσουν το ένα το άλλο, η ζώνη σπάει σε δύο ενεργειακές στάθμες που απέχουν από εκείνη κατά δE (φαινόμενο Zeeman). Οι στάθμες αυτές χωρίζονται από το αποκαλούμενο απαγορευμένο χάσμα ή ενεργειακό χάσμα ή ενεργειακό διάκενο E_g στο οποίο δεν μπορούν να παρευρίσκονται τα ηλεκτρόνια.

Πάνω από το απαγορευμένο διάκενο, υπάρχει μία επιτρεπτή στάθμη που ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας, ενώ παράλληλα κάτω από εκείνο υπάρχει μία επιτρεπτή ζώνη που ονομάζεται ζώνη σθένους.

Επίπεδο Fermi E_f :

Το επίπεδο Fermi είναι το ενεργειακό επίπεδο στο οποίο η πιθανότητα να ευρεθεί ένα ηλεκτρόνιο είναι $\frac{1}{2}$.

1.2. Καμπύλη Fermi $F(E)$:

Θα αποδειχθεί ότι η καμπύλη είναι συμμετρική γύρω από το E_f . Επίσης, για $E - E_f > 3kT$ η συνάρτηση προσεγγίζεται ως: $F(E) \cong e^{-(E - E_f)/kT}$, ενώ για $E - E_f < 3kT$ η συνάρτηση προσεγγίζεται ως: $F(E) \cong 1 - e^{-(E - E_f)/kT}$

Ενδογενής ημιαγωγός :

Ονομάζεται ο ημιαγωγός ο οποίος έχει μικρό αριθμό ατελειών.

Ατέλεια :

Ονομάζουμε την απουσία ηλεκτρονίου την οποία θεωρούμε ως ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο (ονόματι οπή) το οποίο κινείται με αντίθετη φορά από το ηλεκτρόνιο.

1.3. Ολική πυκνότητα καταστάσεων :

Πυκνότητα επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων σε κάποια ζώνη ανά μονάδα όγκου. N_c είναι η ολική πυκνότητα καταστάσεων στην ζώνη αγωγιμότητας και N_v είναι η ολική πυκνότητα καταστάσεων στην ζώνη σθένους.

Ενδογενής πυκνότητα φορέων n_i :

Ο αριθμός ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου στην ζώνη αγωγιμότητας είναι ίσος με τον αριθμό οπών ανά μονάδα όγκου στην ζώνη σθένους σε έναν ενδογενή ημιαγωγό.

1.4. Νόμος δράσης μαζών $n_p = n_i^2$:

Σε δοσμένη θερμοκρασία, το γινόμενο των ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας με τις οπές στην ζώνη σθένους είναι ίσο με το τετράγωνο του συνόλου των φορέων σε ενδογενή ή μη ημιαγωγό.

Επανασύνδεση φορέων:

Όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά από την ζώνη αγωγιμότητας στην ζώνη σθένους, εξουδετερώνεται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής, αυτή η διαδικασία ονομάζεται επανασύνδεση. Όταν δεν υφίσταται η συνθήκη θερμικής ισορροπίας ($n_p > n_i^2$ ή $n_p < n_i^2$), ενεργοποιούνται μηχανισμοί για την επαναφορά του συστήματος σε συνθήκες ισορροπίας. Ένας από αυτούς τους μηχανισμούς είναι η επανένωση φορέων η οποία γίνεται είτε από την ζώνη αγωγιμότητας απευθείας στην ζώνη σθένους (άμεση επανασύνδεση) είτε μέσω του ενεργειακού διακένου E_g (έμμεση επανασύνδεση).

1.5. Πυκνότητα ηλεκτρονίων σε ημιαγωγό προσμίξεων συναρτήσει της θερμοκρασίας :

Θα αποδειχθεί ότι όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία, το επίπεδο Fermi πλησιάζει τόσο πολύ το επίπεδο του ενδογενούς ημιαγωγού, ώστε ο ημιαγωγός να θεωρείται ενδογενής.

Συγκεκριμένα, σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν υπάρχει η απαραίτητη ενέργεια, ώστε να ιονιστούν όλες οι προσμίξεις. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία όμως, η πυκνότητα ηλεκτρονίων παραμένει η ίδια (Extrinsic Region) μέχρι να ιονιστούν οι φορείς του ενδογενούς ημιαγωγού και συνεπώς η συγκέντρωση φορέων να συμπίπτει με την συγκέντρωση προσμίξεων.

Όταν ένας ημιαγωγός υφίσταται προσμίξεις, τότε δημιουργούνται νέα επίπεδα ενέργειας λόγω των προσμίξεων. Για μικρά ποσοστά νόθευσης δοτών στο Si και στο GaAs, υπάρχει συνήθως θερμική ενέργεια για να ιονιστούν όλες οι προσμίξεις δοτών και να δώσει ίσο αριθμό ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας (ολοκλήρωση ιονισμού). Σε αυτή την περίπτωση ισχύει ότι $n = N_D$, όπου N_D είναι η συγκέντρωση των προσμίξεων (εξωγενής περιοχή). Καθώς η θερμοκρασία μεγαλώνει ακόμη περισσότερο, ελευθερώνονται φορείς του ενδογενούς ημιαγωγού. Τελικά, η συγκέντρωση φορέων γίνεται συγκρίσιμη με την συγκέντρωση δοτών, οπότε ο ημιαγωγός γίνεται ενδογενής. Η θερμοκρασία που ένα ημιαγωγός θα γίνει ενδογενής εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις προσμίξεων.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ :

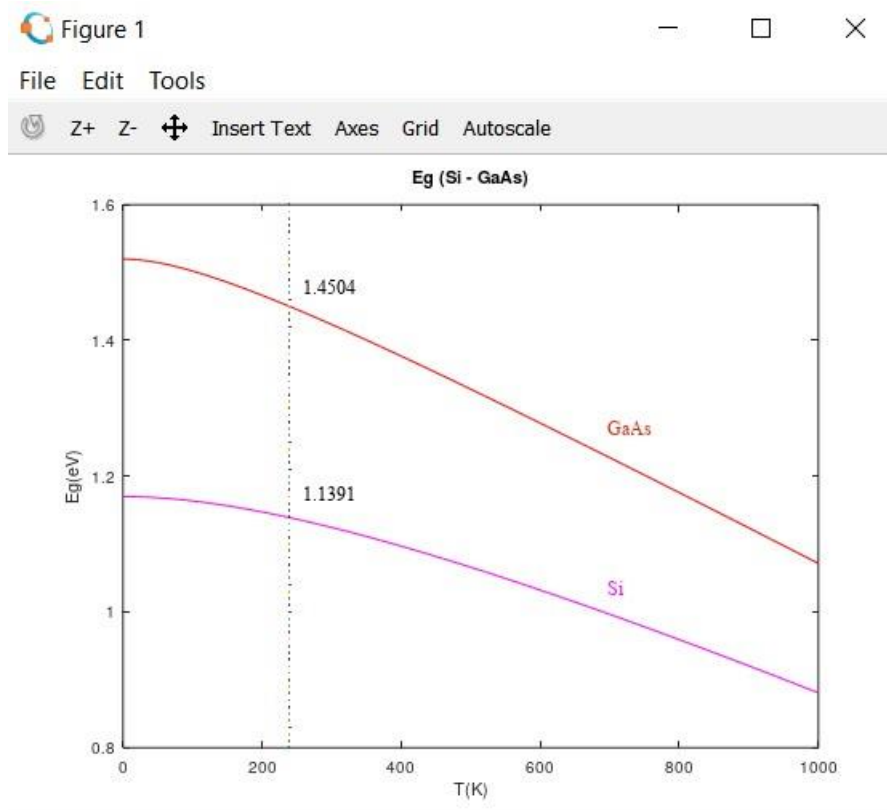
2.1. Άσκηση 1 :

Ο κώδικας για τον υπολογισμό του ενεργειακών διακένων eg_1 του Si & eg_2 του GaAs:

```
>> i = 139;  
>> T = 0:10:1000;  
>> t = 100 + i;  
>> a = 1.17;  
>> b = (4.73*10^(-4)).*T.^2;  
>> c = T.+636;  
>> eg1 = a.-b./c;  
>> k = 1.52;  
>> l = (5.4*10^(-4)).*T.^2;  
>> m = T.+204;  
>> eg2 = k.-l./m;  
>> plot(T, eg1, 'm', T, eg2, 'r');  
>> hold on  
>> y = 0.8:0.01:1.6;  
>> plot(t, y, '.');  
>> hold on  
>> xlabel('T(K)');  
>> ylabel('Eg(eV)');  
>> title('Eg (Si - GaAs)');
```

Κώδικας 1.

Το γράφημα των ενεργειακών διακένων των Si & GaAs:



Γραφική Παράσταση 1.

Οι τιμές των ενεργειακών διακένων $eg1$ του Si & $eg2$ του GaAs για την δοθείσα θερμοκρασία $T = 100 + i$, όπου το $i = 139$ δεν είναι τυχαίες, αλλά υπολογισμένες στον παρακάτω κώδικα:

```
>> i = 139;
>> T = 100 + i;
>> a = 1.17;
>> b = (4.73*10^(-4)).*T.^2;
>> c = T.+636;
>> eg1 = a.-b./c;
>> k = 1.52;
>> l = (5.4*10^(-4)).*T.^2;
>> m = T.+204;
>> eg2 = k.-l./m;
>> disp(eg1);
    1.1391
>> disp(eg2);
    1.4504
```

Κώδικας 2.

Παρατηρούμε ότι οι δύο γραφικές παραστάσεις είναι εκθετικές και φθίνουσες συναρτήσεις, δηλαδή το ενεργειακό διάκενο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, οι τιμές του ενεργειακού διακένου του GaAs για όλες τις θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες από εκείνες του Si, γεγονός που αποδεικνύει ότι σε όλες τις θερμοκρασίες η ζώνη αγωγιμότητας και η ζώνη σθένους του GaAs απέχουν μεγαλύτερη απόσταση από εκείνες του Si.

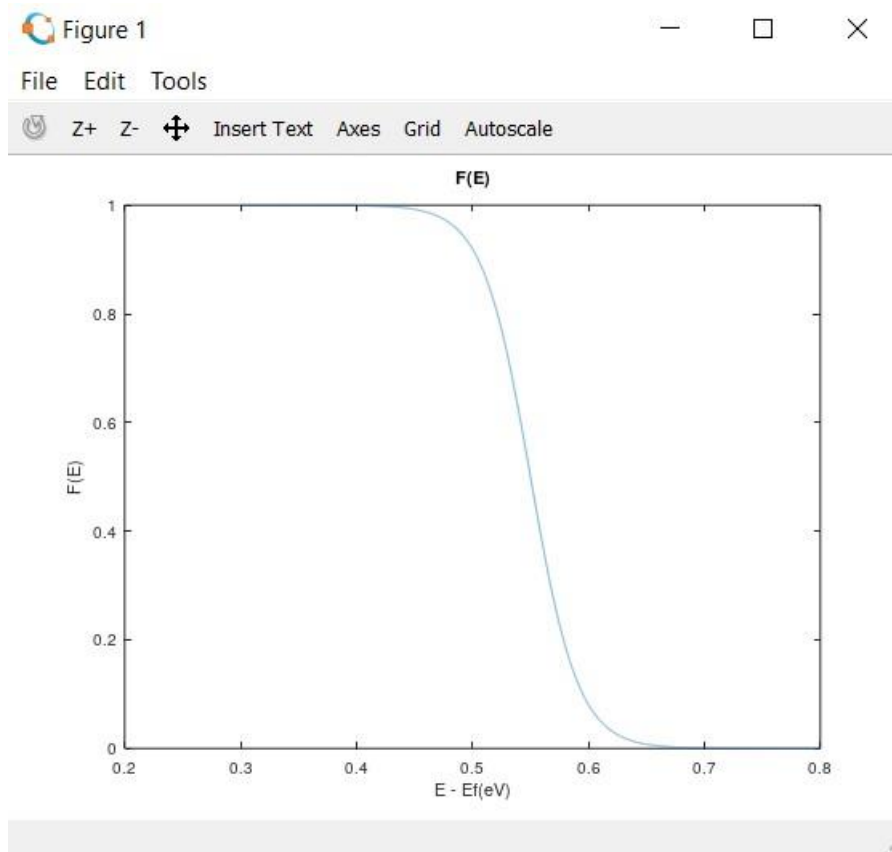
2.2. Άσκηση 2 :

Ο κώδικας για την αναπαράσταση της καμπύλης Fermi στους $T = 100 + i$, όπου το $i = 139$:

```
>> %ex2
>> energieia = 0.3:0.00005:0.8;
>> ef = 0.55;
>> k = 8.6*10^(-5);
>> i = 139;
>> T = 100 + i;
>> De = energieia - ef;
>> expon = De./(k*T);
>> a = e.^expon;
>> b = a.+1;
>> fe = 1./b;
>> plot(energieia,fe);
>> hold on
>> xlabel('E - Ef (eV) ');
>> ylabel('F(E) ');
>> title('F(E) ');
```

Κώδικας 3.

Το γράφημα για την αναπαράσταση της καμπύλης Fermi στην δοθείσα θερμοκρασία:



Γραφική Παράσταση 2.

Παρατηρούμε ότι η συνάρτηση είναι συμμετρική ως προς το $E_f = 0.55$. Για ενέργειες που είναι πάνω από το E_f κατά $3kT$, το εκθετικό της συνάρτησης Fermi γίνεται μεγαλύτερο από 20 και μικρότερο από 0.05 κάτω από αυτό. Κατά συνέπεια η συνάρτηση Fermi μπορεί να γραφτεί προσεγγιστικά από απλούστερες εξισώσεις που αναφέραμε στο θεωρητικό μέρος.

2.3. Άσκηση 3 :

Κώδικας υπολογισμού πυκνότητας φορέων στο **Ge**:

```
>> %Ge
>> i= 139;
>> t = 100 + i;
>> k = 8.6*10^(-5);
>> e = 2.7;
>> nc = 1.02*10^19;
>> Nc = nc*((t/300)^(3/2));
>> eg =0.65;
>> ef = 0.32;
>> ec = ef + 0.5*eg;
>> b = (ec - ef)/(k*t);
>> n = nc*e^(-b);
>> disp(n);
1.5413e+12
>> nv = 5.64*10^18;
>> Nv = nv*((t/300)^(3/2));
>> nvnc = log(nv/nc);
>> ev = 2*ef - ec - k*t*nvnc;
>> d = (ef - ev)/(k*t);
>> p = nv*e^(-d);
>> disp(p);
1.5351e+12
```

Κώδικας 4.

Κώδικας υπολογισμού πυκνότητας φορέων στο **Si**:

```
>> %Si
>> i= 139;
>> t = 100 + i;
>> k = 8.6*10^(-5);
>> e = 2.7;
>> nc = 2.81*10^19;
>> Nc = nc*((t/300)^(3/2));
>> eg = 1.14; %ex1
>> ef = 0.55;
>> ec = ef + 0.5*eg;
>> b = (ec - ef)/(k*t);
>> n = nc*e^(-b);
>> disp(n);
30633770.46104
>> nv = 1.83*10^19;
>> Nv = nv*((t/300)^(3/2));
>> nvnc = log(nv/nc);
>> ev = 2*ef - ec - k*t*nvnc;
>> d = (ef - ev)/(k*t);
>> p = nv*e^(-d);
>> disp(p);
30545241.36959
```

Κώδικας 5.

Κώδικας υπολογισμού πυκνότητας φορέων στο **GaAs**:

```
>> i= 139;
>> t = 100 + i;
>> k = 8.6*10^(-5);
>> e = 2.7;
>>
>> nc = 4.35*10^17;
>> Nc = nc*((t/300)^(3/2));
>>
>> eg = 1.45;%ex1
>> ef = 0.7;
>> ec = ef + 0.5*eg;
>> b = (ec - ef)/(k*t);
>> n = nc*e^(-b);
>> disp(n);
264.86
>> nv = 7.57*10^18;
>> Nv = nv*((t/300)^(3/2));
>> nvnc = log(nv/nc);
>> ev = 2*ef - ec - k*t*nvnc;
>> d = (ef - ev)/(k*t);
>> p = nv*e^(-d);
>> disp(p);
270.02
```

Κώδικας 6.

Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ενεργειακό διάκενο, τόσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση φορέων. Επίσης, οι υπολογισμένες τιμές της πυκνότητας ηλεκτρονίων και οπών για τους ημιαγωγούς στη δοθείσα θερμοκρασία είναι παρόμοιες. Αυτό είναι φυσιολογικό, αφού δεν υπάρχουν προσμίξεις στους ημιαγωγούς ώστε να διαφέρουν κατά μεγάλο βαθμό οι τιμές των συγκεντρώσεων των οπών και των ηλεκτρονίων λόγω της δημιουργίας νέων αποστάσεων στις ζώνες ενεργειών.

2.4. Άσκηση 4 :

Απόδειξη με μαθηματικά εργαλεία:

Για τους ενδογενείς ημιαγωγούς, όσα ηλεκτρόνια διεγείρονται τόσες οπές δημιουργούνται. Οπότε, ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου στην ζώνη αγωγιμότητας ισούται με τον αριθμό των οπών ανά μονάδα όγκου στην ζώνη σθένους, δηλαδή $n = p = n_i = p_i$ ή $np = n_i^2$.

Ισχύει ότι: $n = N_c * e^{-(E_c - E_f)/kT}$ (1)

Επίσης, $p = N_v * e^{-(E_f - E_v)/kT}$ (2)

Οπότε από (1),(2): $np = N_c N_v e^{-(E_c - E_v)/kT}$ (3)

Όμως η διαφορά $E_c - E_v$ είναι ίση με το ενεργειακό διάκενο E_g

Άρα από (3): $np = N_c N_v e^{-E_g/kT}$

Από τον Νόμο Δράσης Μαζών $np = n_i^2$ για τους ενδογενείς ημιαγωγούς και από την σχέση (3):

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2kT}. \quad (4)$$

Για ημιαγωγούς που υφίστανται προσμίξεις, το επίπεδο παραγωγής ηλεκτρονίων παραμένει ίδιο, αφού εξαρτάται από την θερμοκρασία. Άρα, για να υπάρχει αντιστοιχία, ο ρυθμός επανασύνδεσης πρέπει να ισούται με τον ρυθμό παραγωγής των ηλεκτρονίων. Επίσης, για να ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας πρέπει να ισχύει η εξίσωση: $np = N_c N_v e^{-E_g/kT}$ όπου n, p διαφορετικά από τα n_i, p_i (n, p στον ενδογενή ημιαγωγό) αντίστοιχα. Συνεπώς, από την σχέση (4) ισχύει ότι: $np = N_c N_v e^{-E_g/kT} = n_i^2$.

Απόδειξη με χρήση Octave:

Έστω ότι χρησιμοποιούμε το **Si**.

Αρκεί να δείξουμε ότι οι δύο εξισώσεις (1) & (4) καταλήγουν στο ίδιο αριθμητικό αποτέλεσμα για σταθερή θερμοκρασία 300 K:

```
>> % For Si - 300 K
>> k = 8.6*10^(-5);
>> nc = 2.81*10^19; % Si - 300 K
>> eg = 1.12; % 300 K
>> nv = 1.83*10^19; % Si - 300 K
>> T = 300;
>> ef = 0.6;
>> ec = ef + 0.5*eg;
>> nvnc = log(nv/nc);
>> ev = 2*ef - ec - k*T*nvnc;
>> n = nc*(exp((ef-ec)/(k*T)));
>> n2 = realpow(n,2);
>> disp(n2);
1.1074e+20
>> n = nc*(exp((ef-ec)/(k*T)));
>> p = nv*exp((ev-ef)/(k*T));
>> disp(n*p);
1.1074e+20
```

Κώδικας 7.

Έστω ότι χρησιμοποιούμε το **GaAs**.

Αρκεί να δείξουμε ότι οι δύο εξισώσεις (1) & (4) καταλήγουν στο ίδιο αριθμητικό αποτέλεσμα για σταθερή θερμοκρασία 300 K:

```
>> % For GaAs - 300 K
>> k = 8.6*10^(-5);
>> nc = 4.35*10^17; % GaAs - 300 K
>> eg = 1.42; % 300 K
>> nv = 7.57*10^18; % GaAs - 300 K
>> T = 300;
>> ef = 0.71;
>> ec = ef + 0.5*eg;
>> nvnc = log(nv/nc);
>> ev = 2*ef - ec - k*T*nvnc;
>> n = nc*(exp((ef-ec)/(k*T)));
>> n2 = realpow(n,2);
>> disp(n2);
2.3656e+11
>> n = nc*(exp((ef-ec)/(k*T)));
>> p = nv*exp((ev-ef)/(k*T));
>> disp(n*p);
2.3656e+11
```

Κώδικας 8.

Ο ημιαγωγός Si και αντίστοιχα το GaAs δεν περιέχουν προσμίξεις, άρα μπορούμε να πούμε ότι $n = p = n_i$ ή $n^2 = n_i^2$. Το n^2 υπολογίστηκε ίσο με το γινόμενο np , το οποίο είναι ίσο με $N_c N_v e^{-E_g/kT}$ αφού $E_c - E_v = E_g$ (η διαφορά του κατώτατου επιπέδου της ζώνης αγωγιμότητας με το ανώτατο επίπεδο της ζώνης σθένους είναι ίσο με το ενεργειακό διάκενο E_g). Οπότε αποδείχθηκε ο Νόμος Δράσης των Μαζών για όλους τους ημιαγωγούς σε σταθερές συνθήκες, δηλαδή ότι $np = N_c N_v e^{-E_g/kT} = n_i^2$.

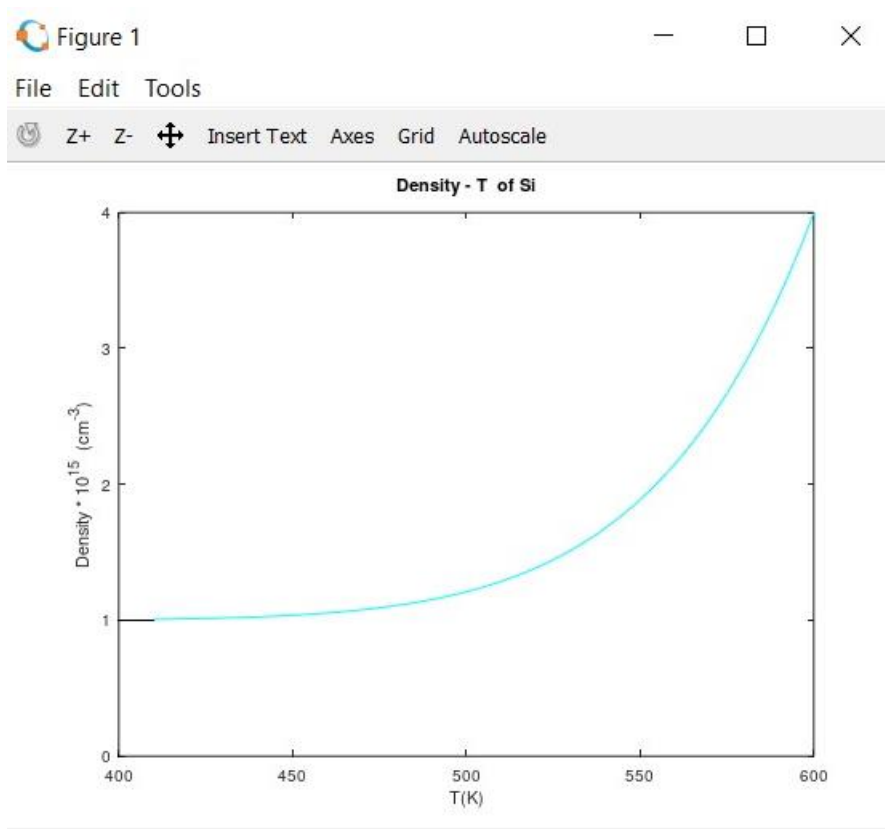
2.5.Άσκηση 5 :

Ο κώδικας για την πυκνότητα ηλεκτρονίων σε έναν νοθευμένο ημιαγωγό **Si** ως συνάρτηση της θερμοκρασίας με συγκέντρωση δοτών ίση με 10^{15} cm^{-3} :

```
>> %for Si
>> To = linspace(400,400,100);
>> Ta = linspace(400,410,100);
>> Tb = linspace(410,600,100);
>> nc = 2.81*10^19;% Si - 300 K
>> Nc = nc*realpow(Tb./300,3/2);
>> nv = 1.83*10^19;% Si - 300 K
>> Nv = nv*realpow(Tb./300,3/2);
>> nd = 1;%*10^15
>> % calculate eg of Si
>> eg0 = 1.17;
>> b = (4.73*10^(-4)).*Tb.^2;
>> c = Tb.+636;
>> eg = eg0.-b./c;
>> na = nd;
>> k=8.6*(10^(-5));
>> exponent= eg./(k*Tb);
>> e = 2.71;
>> n = realpow(Nc.*Nv.*e.^(-exponent),1/2);
>> nb = n/10^15 + nd;
>> plot(To,0,'k',Ta,na,'k',Tb,nb,'c');
>> xlabel('T(K)');
>> hold on
>> ylabel('Density * 10^1^5 (cm^-^3)');
>> hold on
>> title('Density - T of Si');
```

Κώδικας 9.

Το γράφημα πυκνότητας ηλεκτρονίων σε έναν νοθευμένο ημιαγωγό **Si** ως συνάρτηση της θερμοκρασίας με συγκέντρωση δοτών ίση με 10^{15} cm^{-3} :



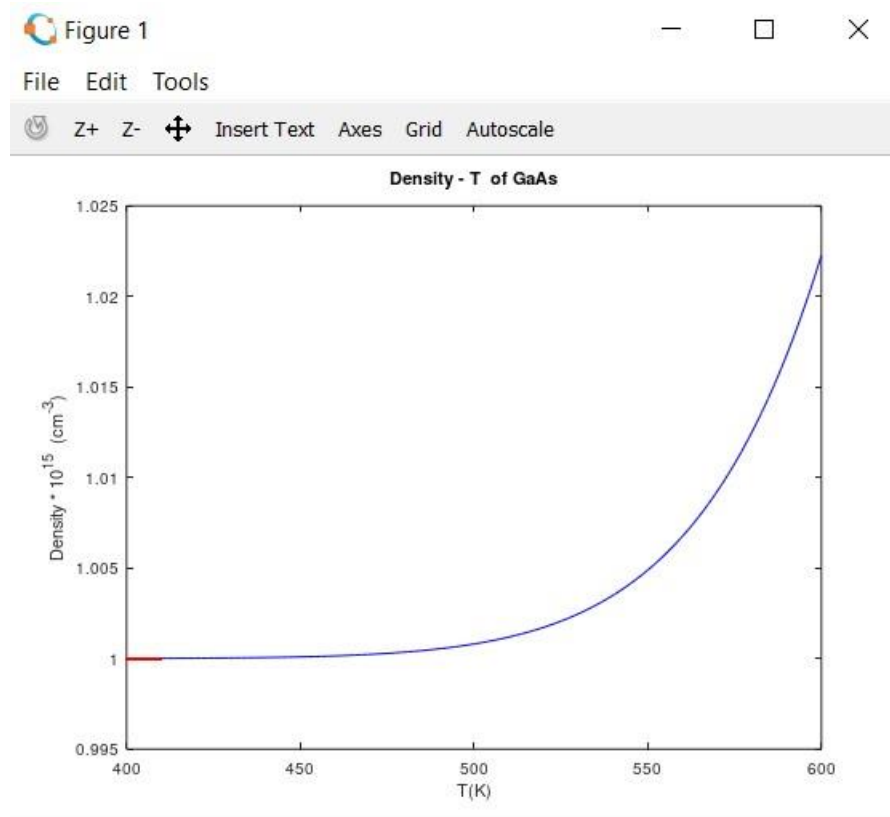
Γραφική παράσταση 3.

Όμοια, ο κώδικας για την πυκνότητα ηλεκτρονίων σε έναν νοθευμένο ημιαγωγό **GaAs** ως συνάρτηση της θερμοκρασίας με συγκέντρωση δοτών ίση με 10^{15} cm^{-3} :

```
>> %for GaAs
>> Ta = linspace(400,410,100);
>> Tb = linspace(410,600,100);
>> nc = 4.35*10^17;% GaAs - 300 K
>> Nc = nc*realpow(Tb./300,3/2);
>> nv = 7.57*10^18; % GaAs - 300 K
>> Nv = nv*realpow(Tb./300,3/2);
>> nd = 1;%*10^15
>> % calculate eg of GaAs
>> eg0 = 1.52;
>> l = (5.4*10^(-4)).*Tb.^2;
>> m = Tb.+204;
>> eg = eg0.-l./m;
>> na = nd;
>> k=8.6*(10^(-5));
>> exponent= eg./(k*Tb);
>> e = 2.71;
>> %n = realpow(Nc.*Nv.*e.^(-exponent),1/2);
>> n = (Nc.*Nv.*e.^(-exponent)).^(1/2);
>> nb = n/10^15 + nd;
>> plot(Ta,na,'r',Tb,nb,'b');
>> xlabel('T(K)');
>> hold on
>> ylabel('Density * 10^1^5 (cm^-^3)');
>> hold on
>> title('Density - T of GaAs');
```

Κώδικας 10.

Το γράφημα πυκνότητας ηλεκτρονίων σε έναν νοθευμένο ημιαγωγό **GaAs** ως συνάρτηση της θερμοκρασίας με συγκέντρωση δοτών ίση με 10^{15} cm^{-3} :



Γραφική Παράσταση 4.

Παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις, για βαθμούς κάτω από 400 K δεν μας ενδιαφέρει τι συμβαίνει (σε αυτή την άσκηση). Για βαθμούς άνω των 400 K και μικρότεροι από 410 K, το γράφημα είναι μία ευθεία γραμμή γιατί η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι σταθερή και ίση με την πυκνότητα δοτών N_D . Η περιοχή αυτή ονομάζεται εξωγενής περιοχή, όπως αναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος. Άνω των 410 K (ενδογενής περιοχή), το γράφημα γίνεται παραβολικό, αφού ισχύει η σχέση $n = n_i + N_D = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2kT} + N_D$ (*) (και επιπλέον η πυκνότητα των οπών p είναι περίπου ίση με n_i^2/N_D , επειδή η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι περίπου ίση με N_D). Η σχέση (*) ισχύει ώστε να διατηρούνται τα συνολικά φορτία. Πρέπει, δηλαδή, η πυκνότητα των ηλεκτρονίων να είναι ίση με το άθροισμα της πυκνότητας των ηλεκτρονίων στον ενδογενή ημιαγωγό και της ποσότητας των δοτών που εισάγονται στον ημιαγωγό (πρέπει δηλαδή $n_{410-600 \text{ K}} = n_i + N_D$). Στον κώδικα, όμως, η ποσότητα του n_i είναι διαιρεμένο με 10^{15} και το N_D είναι ίσο με 1, διότι ο άξονας y αναπαρίσταται χωρίς την ποσότητα 10^{15} .

3.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ :

Άσκηση 1: Τα φάσματα των ενεργειακών διακένων (κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας) είναι χαρακτηριστικά για κάθε ένωση. Αυτό αποδεικνύεται με το γεγονός ότι το γράφημα του ενεργειακού διακένου του Si και το γράφημα του ενεργειακού διακένου του GaAs δεν τέμνονται για κάποια τιμή της θερμοκρασίας.

Άσκηση 2: Για την δοθείσα θερμοκρασία T (όπου $T = i + 100$ με $i = 139$), όταν $E = E_f$, η ενεργειακή στάθμη με ενέργεια E , κατά πιθανότητα $\frac{1}{2}$, είναι κατειλημμένη από φορείς. Επίσης, με βάση την αναπαράσταση της καμπύλης Fermi στην δοθείσα θερμοκρασία, οι ενεργειακές στάθμες με ενέργεια $E < E_f$ έχουν περισσότερες κατειλημμένες θέσεις από φορείς από εκείνες με ενέργεια $E > E_f$ όπου οι περισσότερες θέσεις είναι άδειες. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι στη γραφική παράσταση της καμπύλης Fermi στην συγκεκριμένη θερμοκρασία, η $F(E)$ έχει μεγαλύτερες τιμές όταν $E < E_f$. Οπότε η πιθανότητα να βρίσκεται ένας φορέας στην ζώνη με ενέργεια E είναι υψηλή σε αυτήν την περίπτωση.

Άσκηση 3: Οι πυκνότητες φορέων στο Ge, στο Si και στο GaAs είναι διαφορετικές. Μεγαλύτερη συγκέντρωση φορέων υπολογίστηκε στο Ge. Το Ge είναι το στοιχείο με το μικρότερο ενεργειακό διάκενο E_g . Έπειτα, αμέσως μικρότερες συγκεντρώσεις φορέων έχουν με την σειρά το Si και το GaAs (το οποίο έχει το μεγαλύτερο διάκενο από όλα τα υπόλοιπα στοιχεία). Είναι προφανής η αντιστρόφως ανάλογη σχέση του ενεργειακού διακένου με την ποσότητα των φορέων σε σταθερή θερμοκρασία. Αυτό είναι λογικό, γιατί η σχέση: $n_p = N_c N_v e^{-E_g/kT}$ αποδεικνύει ότι όταν η ποσότητα των φορέων είναι μικρή, τότε οι ενεργειακές ζώνες αγωγιμότητας και σθένους είναι πιο απομακρυσμένες και το αντίστροφο.

Άσκηση 4: Τα επίπεδα παραγωγής φορέων εξαρτώνται μόνο από την θερμοκρασία και δεν αλλάζουν με τις προσμίξεις. Όση περισσότερη νόθευση έχουμε σε έναν ημιαγωγό, τόσες περισσότερες επανασυνδέσεις υφίστανται για να αποκτήσει ισορροπία και τελικά να ισχύει η εξίσωση $n_p = n_i^2$.

Άσκηση 5: Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στο νοθευμένο ημιαγωγό Si αυξάνεται πιο γρήγορα αυξάνοντας την θερμοκρασία από το GaAs. Η παρατήρηση αυτή, διακρίνεται από τις γραφικές παραστάσεις για την πυκνότητα ηλεκτρονίων στους νοθευμένους ημιαγωγούς **GaAs & Si** ως συνάρτηση της θερμοκρασίας με συγκέντρωση δοτών ίση με 10^{15} cm^{-3} , διότι από τον κατακόρυφο άξονα y φαίνεται ότι η αύξηση των ηλεκτρονίων στο **Si** είναι περίπου $4 - 1 = 3$ ($\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), ενώ στο **GaAs** είναι - αρκετά μικρότερη - περίπου $1.0225 - 1 = 0.0225$ ($\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$).

4.Πίνακας Διαγραμμάτων-Εικόνων :

Κώδικας 1.	3
Γραφική Παράσταση 1.	3
Κώδικας 2.	4
Κώδικας 3.	4
Γραφική Παράσταση 2.	5
Κώδικας 4.	6
Κώδικας 5.	6
Κώδικας 6.	7
Κώδικας 7.	8
Κώδικας 8.	9
Κώδικας 9.	10
Γραφική παράσταση 3.	11
Κώδικας 10.	12
Γραφική Παράσταση 4.	13

5.Βιβλιογραφία :

Ε.Χριστοφόρου , Χ.Σαργέντης, (2020), «Κεφάλαιο 1. Ενεργειακές ζώνες και συγκέντρωση φορέων», Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:
http://mycourses.ntua.gr/courses/ECE1388/document/%D3%E7%EC%E5%E9%FE%F3%E5%E9%F2/EH-%CA%E5%F6%DC%EB%E1%E9%EF_1.pdf , (προσπελάστηκε 29 Μαΐου 2020).

Ε.Λοιδορίκης, Δ.Παπαγεωργίου, (χ.χ.), «Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά», Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:
<http://cmsl.materials.uoi.gr/lidorikis/files/SemiconductorsCh5.pdf>, (προσπελάστηκε 28 Μαΐου 2020).