

3^η εργασία στο μάθημα Δομή και Ηλεκτρικές Ιδιότητες Υλικών

Ονοματεπώνυμο: Ιωάννης Τσαντήλας

A.M.: el20883

Άσκηση 1

❖ Μαθηματικό υπόβαθρο

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right) V_{bi}}$$
$$\varepsilon_s = \varepsilon_r * \varepsilon_0$$
$$\varepsilon_0 = 8.85 * 10^{-14} \text{ F/cm}$$
$$k = 1.38 * 10^{-23} \text{ J/K}$$
$$q = 1.6 * 10^{-19} \text{ C}$$
$$T = 300 \text{ K}$$
$$N_A = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$
$$N_D = 10^{15} * 884 \text{ cm}^{-3}$$

Επιπλέον:

Για το Si: $n_i = 1.45 * 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ $\varepsilon_r = 11.68$

Για το GaAs: $n_i = 1.8 * 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ και $\varepsilon_r = 13.1$

❖ Κώδικας και αποτελέσματα

```
Vbi-W.m
1 eo=8.85*10^(-14);
2 k=1.38*10^(-23);
3 q=1.6*10^(-19);
4 T=300;
5 Na=10^19;
6 Nd=884*10^15;
7
8 niSi=1.45*10^10;
9 erSi=11.68;
10 esSi=eo.*erSi;
11
12 niGaAs=1.8*10^10;
13 erGaAs=13.1;
14 esGaAs=eo.*erGaAs;
15
16 VbiSi=k.*T.*log(Na.*Nd./(niSi^2))./q;
17 VbiGaAs=k.*T.*log(Na.*Nd./(niGaAs^2))./q;
18
19 WSi=sqrt(2*esSi.*((Na.+Nd)./(Na.*Nd)).*VbiSi./q);
20 WGaAs=sqrt(2*esGaAs.*((Na.+Nd)./(Na.*Nd)).*VbiGaAs./q);
21
22 disp("The value of Vbi for Si is: "); disp(VbiSi);
23 disp("The value of Vbi for GaAs is: "); disp(VbiGaAs);
24
25 disp("The value of W for Si is: "); disp(WSi);
26 disp("The value of W for GaAs is: "); disp(WGaAs);
27
```

Με την εντολή disp, τυπώνουμε στο Command Window τις απαιτούμενες τιμές του δυναμικού και της περιοχής απογύμνωσης για τα δύο υλικά:

```
>> The value of Vbi for Si is:  
0.9904  
The value of Vbi for GaAs is:  
0.9792  
The value of W for Si is:  
3.9694e-06  
The value of W for GaAs is:  
4.1800e-06
```

❖ Παρατηρήσεις

Όταν φέρνουμε σε επαφή δύο ημιαγωγούς διαφορετικής πρόσμιξης οι ζώνες αγωγιμότητας και σθένους καμπυλώνονται. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής n βλέπουν ένα φραγμό δυναμικού V_{bi} για να μεταβούν από τη ζώνη αγωγιμότητας της n περιοχής στη ζώνη αγωγιμότητας της p περιοχής. Επομένως, το V_{bi} αποτελεί την διαφορά του δυναμικού στη ζώνη n με το δυναμικό στη ζώνη p: $V_{bi} = V_n - V_p$. Επιπλέον, τη V_{bi} έχει μονάδες Volt.

Χωρίς την εφαρμογή πεδίου, τα ηλεκτρόνια διαχέονται προς την p περιοχή και οπές προς την n. Έτσι, τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν κενές θέσεις οπών και οι αποδέκτες κάθε περιοχής ιονίζονται. Αυτό δημιουργεί στο κέντρο της επαφής μια περιοχή στην οποία δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς και ονομάζεται ζώνη απογύμνωσης W , και μετριέται σε cm.

Τα προηγούμενα ισχύουν στις περιπτώσεις που δεν εφαρμόζουμε εξωτερικό πεδίο, δηλαδή δεν εφαρμόζουμε κάποια τάση. Ουσιαστικά, φέρνουμε σε επαφή δύο υλικά (εν προκειμένω πυρίτιο, Si), ένα εκ των οποίων ντοπάρουμε με δότες και το άλλο με αποδέκτες, και παρατηρούμε τι προκύπτει για το δυναμικό που βλέπουν τα ηλεκτρόνια V_{bi} και το βάθος της περιοχής απογύμνωσης W .

Άσκηση 2

❖ Μαθηματικό υπόβαθρο

α) $I = f(V_d)$, όπου $0.2 \leq V_d \leq 0.6$, η τάση στην ορθή πόλωση

β) $I = f(V_r)$, όπου $-0.8 \leq V_r \leq -0.1$, η τάση στην ανάστροφη πόλωση

γ) $I = f(V)$, όπου $-0.1 \leq V \leq 0.1$

$$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

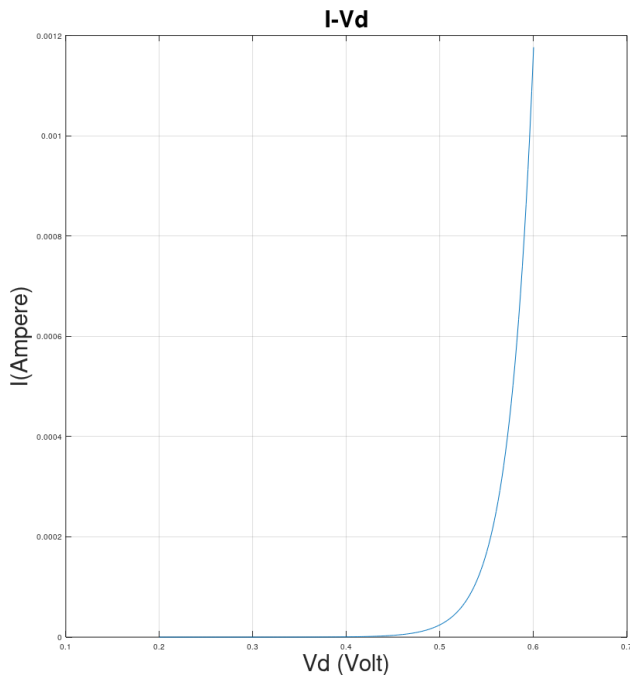
Για το ρεύμα I και στις 3 περιπτώσεις ισχύει η σχέση:

$$I = I_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

Όπου $10^{-14} \leq I_s \leq 10^{-12}$ (θεωρήστε το ίσο με 10^{-13} A σε αυτή την άσκηση).

❖ Κώδικες και γραφικές παραστάσεις

Ερώτημα (α)



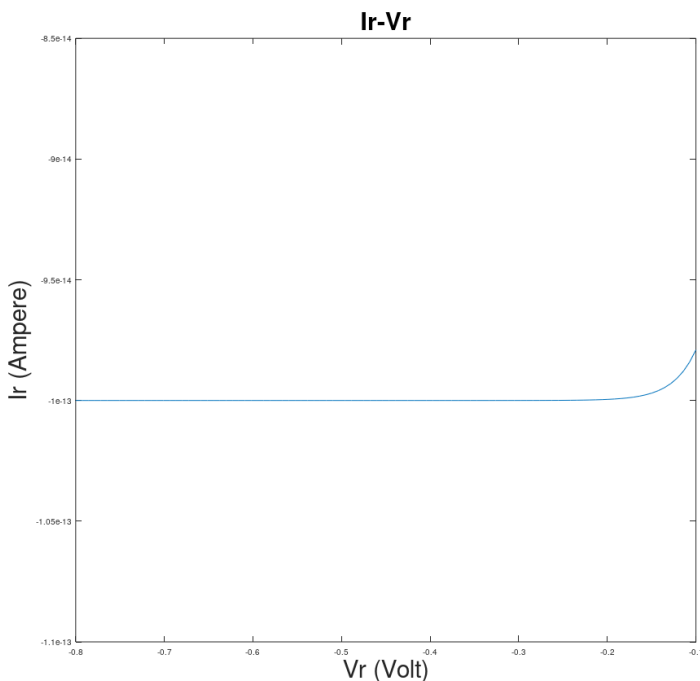
```
1 Vd=0.2:0.002:0.6;  
2 Is=10^(-13);  
3 k=1.38*10^(-23);  
4 T=300;  
5 q=1.6*10^(-19);  
6  
7 I=Is.*exp((Vd.*q./(k.*T)));  
8  
9 plot(Vd, I);  
10 xlabel("Vd (Volt)", "fontsize", 30);  
11 ylabel("I (Ampere)", "fontsize", 30);  
12 title("I-Vd", "fontsize", 30);  
13
```

❖ Παρατηρήσεις

Τώρα εφαρμόζουμε μια θετική τάση (ορθή πόλωση) στα άκρα της επαφής των δύο ημιαγωγών, με το θετικό άκρο στην περιοχή p και τον αρνητικό στην n. Ο δυναμικός φραγμός που βλέπουν τα ηλεκτρόνια μικραίνει κατά μια ποσότητα V_d και δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο ένα πεδίο το οποίο αντιστέκεται στο αρχικό πεδίο που υπάρχει μεταξύ των δύο περιοχών (n και p), που οφείλεται στην ύπαρξη των δοτών και των αποδεκτών. Έτσι, είναι πιο εύκολο για τους φορείς να περάσουν από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας ένα «ρεύμα φορέων μειονότητας».

Επιπλέον, έχουμε απαλείψει τον όρο -1 εντός του εκθετικού. Στην ορθή πόλωση, ο παράγοντας $V_d * q / k * T$ είναι πολύ μεγαλύτερος της μονάδας, παίρνουμε μια προσεγγιστική τιμή, που δεν επηρεάζει πρακτικά τα δεδομένα.

Ερώτημα (β)



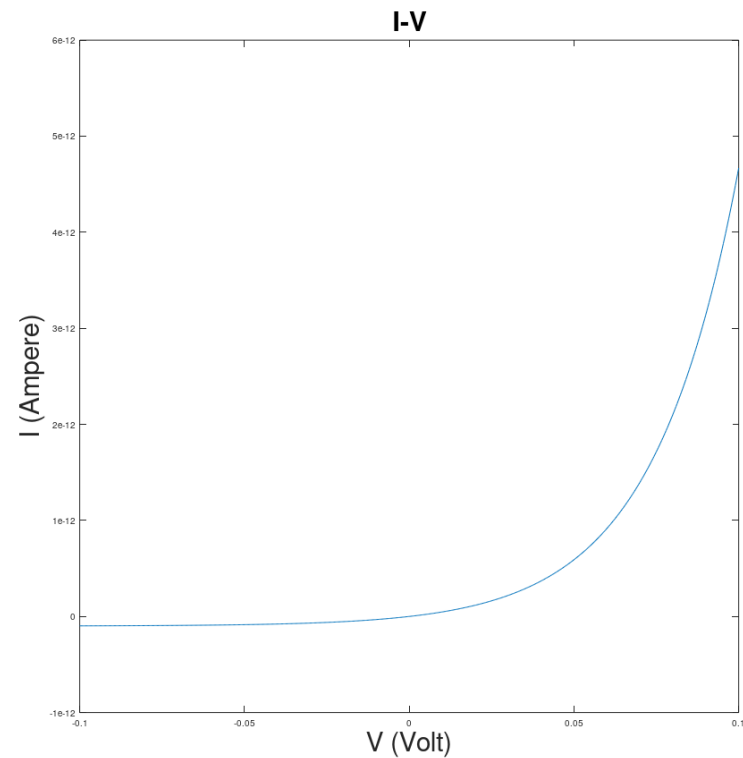
```
1 Vr=linspace(-0.8,-0.1,100);  
2 Is=10^(-13);  
3 k=1.38*10^(-23);  
4 T=300;  
5 q=1.6*10^(-19);  
6  
7 Ir=Is.*(e.^(Vr.*q./(k.*T))-1);  
8  
9 plot(Vr,Ir);  
10 xlabel("Vr (Volt)", "fontsize", 30);  
11 ylabel("Ir (Ampere)", "fontsize", 30);  
12 title("Ir-Vr", "fontsize", 30);
```

❖ Παρατηρήσεις

Σε αυτή τη περίπτωση, εφαρμόζουμε αντίθετα την τάση, δηλαδή το θετικό άκρο στην περιοχή n και το αρνητικό στην περιοχή p (ανάστροφη πόλωση). Έτσι, ο φραγμός δυναμικού που βλέπουν τα ηλεκτρόνια μεγαλώνει κατά V_r . Το πεδίο που δημιουργείται πλέον δεν αντitiθεται στο ήδη υπάρχων αλλά το ενισχύει. Έτσι, καθίσταται πιο δύσκολη η μετάβαση των φορέων από την μια περιοχή στην άλλη και αυτό την διάταξη να έχει ένα πάρα πολύ μικρό ρεύμα, όπως υποδεικνύεται από την γραφική παράσταση.

Πλέον, ο όρος -1 παίζει καθοριστικό ρόλο επομένως δεν τον απαλείφουμε.

Ερώτημα (γ)



```
1 V=linspace(-0.1,0.1,600);  
2 Is=10^(-13);  
3 k=1.38*10^(-23);  
4 T=300;  
5 q=1.6*10^(-19);  
6  
7 I=Is.*(exp(V.*q./(k.*T))-1);  
8  
9 plot(V,I);  
10 xlabel("V (Volt)", "fontsize", 30);  
11 ylabel("I (Ampere)", "fontsize", 30);  
12 title("I-V", "fontsize", 30);
```

❖ Παρατηρήσεις

Σε αυτή τη περίπτωση, εφαρμόζουμε και θετική και αρνητική τάση και παράγουμε τη συνολική γραφική παράσταση για την ένταση με την τάση.

Άσκηση 3

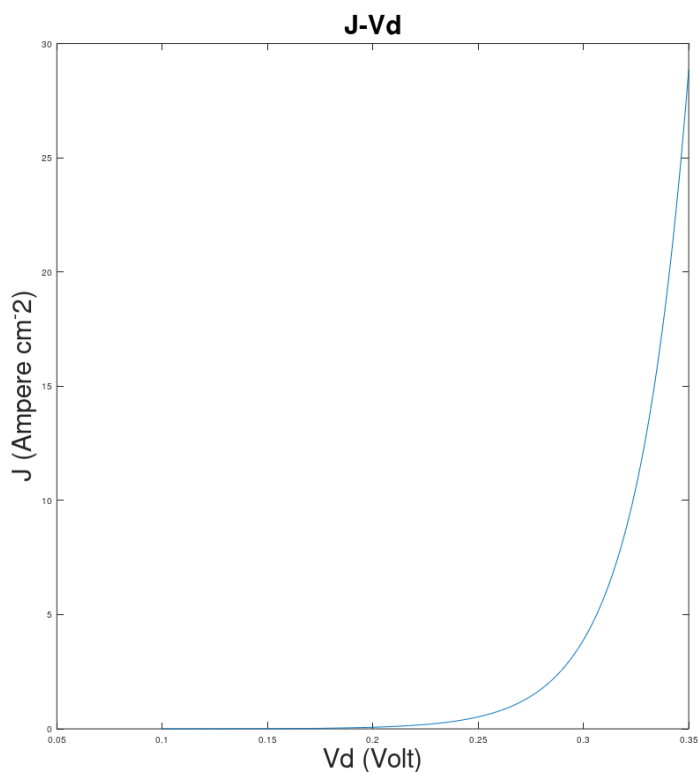
❖ Μαθηματικό υπόβαθρο

$$T = 300\text{K} \quad \phi_{bn} = 0.67\text{ Volt}$$

$$0.1 \leq V_d \leq 0.35 \quad A^* = 120\text{ Ampere K}^{-2}\text{ cm}^{-2}$$

$$J_{st} = A^* T^2 e^{-q \phi_{bn} / k T} \quad J = J_{st} (e^{q V_d / k T} - 1)$$

❖ Κώδικας και γραφική παράσταση



```
File Edit View Debug Run Help
J-Vd.m
1 Vd=0.1:0.001:0.35;
2 T=300;
3 fbn=0.67;
4 A=120;
5 q=1.6*10^(-19);
6 k=1.33*10^(-23);
7
8 VdAM=0.25+883*10^(-4);
9 Jst=A.*(T.^2)*e^((-q.*fbn)/(k.*T));
10
11 JAM=Jst.*(exp((VdAM.*q)/(k.*T))-1);
12 disp(JAM);
13
14 J=Jst.*(exp((Vd.*q)/(k.*T))-1);
15
16 plot(Vd,J);
17 xlabel("Vd (Volt)", "fontsize", 30);
18 ylabel("J (Ampere cm^-2)", "fontsize", 30);
19 title("J-Vd", "fontsize", 30);
```

Με την εντολή `disp` τυπώνουμε στο *Command Window* την τιμή της πυκνότητας του ρεύματος για $V_d = 0.25 + 883 \cdot 10^{-4}$ Volt:



❖ Παρατηρήσεις

Πριν την επαφή μετάλλου-ημιαγωγού, η στάθμη Fermi του ημιαγωγού ήταν πάνω από την στάθμη Fermi του μετάλλου. Για να γίνει η στάθμη Fermi σταθερή κατά μήκος της διάταξης σε θερμική ισορροπία, τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού ρέουν στις χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες του μετάλλου. Τα θετικά φορτισμένα άτομα των δοτών, όντας στον ημιαγωγό, δημιουργούν μια ζώνη απογύμνωσης. Αν εφαρμοστεί θετική τάση στο μέταλλο σε σχέση με τον ημιαγωγό, το ρεύμα ημιαγωγού προς μέταλλο, V_{bi} , μειώνεται και τα ηλεκτρόνια ρέουν πιο εύκολα από τον ημιαγωγό στο μέταλλο, επειδή το φράγμα μειώνεται (αυτή η συνθήκη πόλωσης είναι ορθή).

Άσκηση 4

❖ Μαθηματικό υπόβαθρο

$$T = 300K$$

$$n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$A = 0.01 \text{ cm}^2$$

$$D_e = k T \mu_e / q$$

$$D_h = k T \mu_h / q$$

$$L_e = (D_e t_e)^{1/2}$$

$$L_h = (D_h t_h)^{1/2}$$

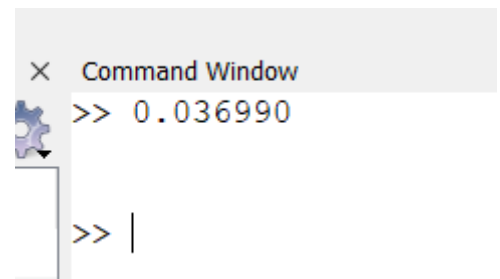
$$J_{so} = q n_i^2 D_h / L_h N_d$$

$$I_{so} = A J_{so}$$

$$I = I_{so} (e^{q V_d / k T} - 1)$$

❖ Κώδικας και τιμή

```
1 T=300;
2 ni=1.45*10^10;
3 A=0.01;
4 q=1.6*10^(-19);
5 k=1.38*10^(-23);
6 me=120;
7 mh=440;
8
9 De=k*T*me/q;
10 Dh=k*T*mh/q;
11
12 th=300*10^(-9);
13 te=50*10^(-9);
14
15 Le=sqrt(De*te);
16 Lh=sqrt(Dh*th);
17
18 Nd=2*10^16;
19 Na=2*10^18;
20
21 Vd=0.6+883*10^(-4);
22
23 Jso=(q.*(ni.^2).*Dh)./(Lh.*Nd);
24 Iso=A.*Jso;
25
26 I=Iso*exp((q.*Vd)./(k.*T));
27 disp(I);
```



❖ Παρατηρήσεις

Θα εξηγήσουμε αναλυτικά τις μεταβλητές που παίρνουν μέρος στον κώδικα. έχουμε μια δίοδο πυριτίου τύπου p_n με κάθετη επιφάνεια $A = 0.01 \text{ cm}^2$, με συγκέντρωση αποδεκτών $N_a = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ άτομα βορίου στην περιοχή p και συγκέντρωση δοτών $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ άτομα αρσενικού στην

περιοχή n. Η θερμοκρασία T είναι 300 Kelvin, ενώ η ενδογενής αγωγιμότητα σε αυτή τη θερμοκρασία για το πυρίτιο είναι $1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Επιπλέον, οι ευκινήσιες των φορέων είναι (προσεγγιστικά) $\mu_e = 120 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ και $\mu_p = 440 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Τα D_e, D_h είναι οι συντελεστές για τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από την εξίσωση του Einstein, ενώ τα L_e, L_h είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές για τις οπές (αν ο δείκτης του εκάστοτε συντελεστή είναι h, τότε αφορά τη ζώνη n, ενώ αν είναι e, τότε αναφέρεται στη ζώνη p).

Τα t_h, t_e είναι οι χρόνοι ημιζωής στην n και p περιοχή αντίστοιχα. Η πυκνότητα ρεύματος συμβολίζεται ως J_{so} . Ο κανονικός τύπος ωστόσο έχει έναν επιπλέον όρο, τον $q n_i^2 D_e / L_e N_a$, ο οποίος όμως απαλείφεται επειδή οι αποδέκτες είναι αρκετά μεγαλύτεροι από τους δότες.

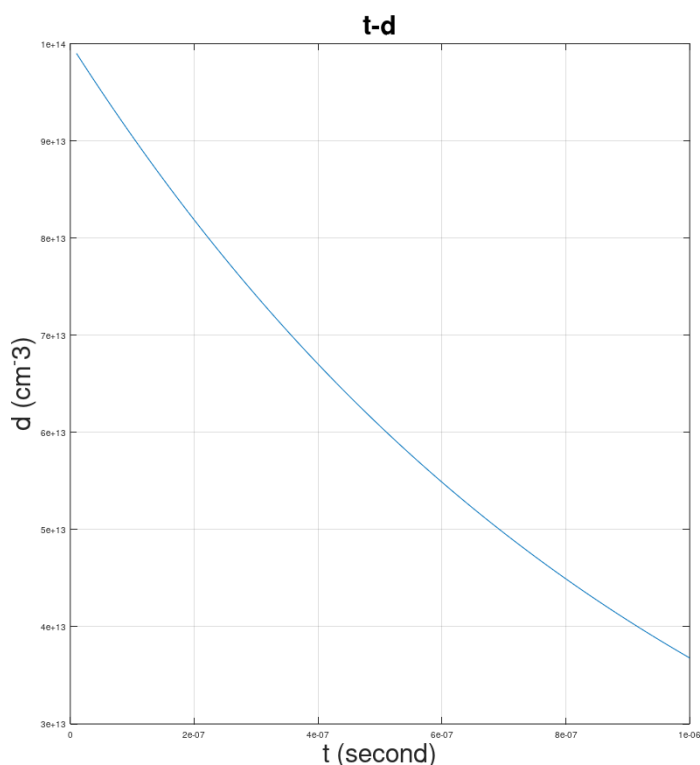
Το ρεύμα χώρου συμβολίζεται ως I_{so} και, τέλος, ο τύπος του ρεύματος I, δεν έχει τον όρο -1, καθώς ο όρος του εκθετικού είναι αρκετά μεγαλύτερος, επομένως παίρνουμε (πάλι) προσέγγιση.

Άσκηση 5

❖ Μαθηματικό υπόβαθρο

$$\begin{aligned} \Delta_n(t=0) &= G_\phi t_n & \Delta_n &= \Delta_n(t=0) e^{-t/t_n} \\ t_n &= 10^{-6} \text{ second} & G_\phi &= 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ second}^{-1} \end{aligned}$$

❖ Κώδικας και γραφική παράσταση

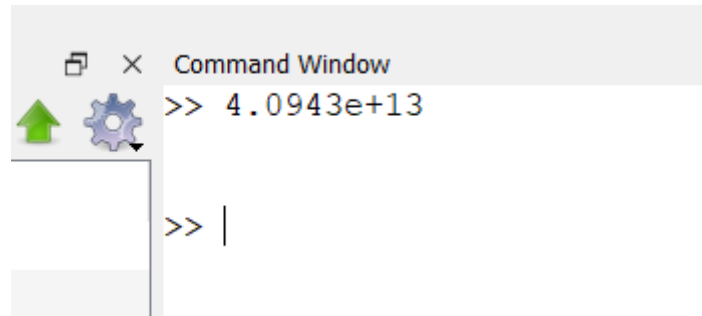


```

1 t=10^(-8):10^(-8):10^(-6);
2 T=300;
3 Na=10^17;
4 tn=10^(-6);
5 G=10^20;
6 Dn=G.*tn;
7
8 tAM=10^(-8)*(1+0.1*883);
9 dAM=Dn.*exp(-tAM./tn);
10 disp(dAM);
11
12 d=Dn.*exp(-t./tn);
13
14 plot(t,d);
15 xlabel("t (second)", "fontsize", 30);
16 ylabel("d (cm^-3)", "fontsize", 30);
17 title("t-d", "fontsize", 30);

```

Με την εντολή `disp` τυπώνουμε στο *Command Window* την τιμή της μεταβολής της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας για $t = 10^{-8} \cdot (1 + 0.1 \cdot 883)$ second:



❖ Παρατηρήσεις

Στην φωτονική διέγερση, έχουμε ένα κομμάτι πυριτίου το οποίο φωτοβολείται με ρυθμό 10^{20} cm^{-3} και αναζητούμε την μεταβολή της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας συναρτήσει του χρόνου. Στην αρχή, φωτοβολούμε το υλικό από μια μεριά και δημιουργούνται οι φορείς λόγω των φωτονίων που προσκρούονται στο υλικό και, σταματώντας, παρατηρούμε πως μειώνεται με τον χρόνο, όπως υποδεικνύεται και από την γραφική, αυτή η συγκέντρωση.