<u>ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ</u>

<u>ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ</u>

<u>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ</u>

<u>ΜΑΘΗΜΑ</u> : Δομή και Ηλεκτρικές Ιδιότητες των Υλικών

<u>ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ – Α.Μ.</u> : Χρήστος Τσούφης - 03117176

<u>ΟΜΑΔΑ</u> : Β1

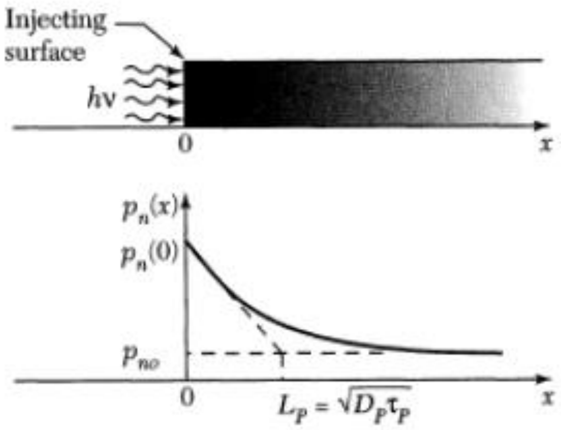
<u>ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</u> : Φαινόμενα μεταφοράς φορέων στο Octave

ΑΘΗΝΑ 2018

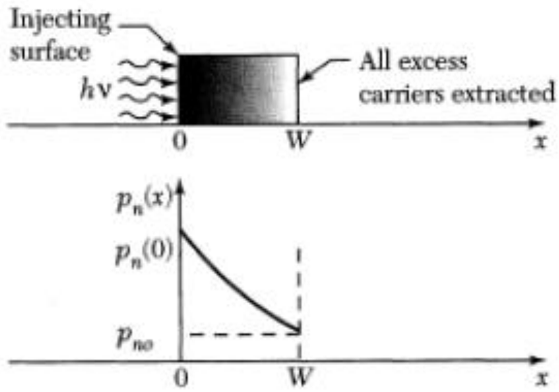
1. Έγχυση μόνιμης κατάστασης από την μια πλευρά

Το σχήμα δείχνει έναν ημιαγωγό Si τύπου n με $n_i=10^{10}$, $p_{no}=10^5$, $p_n=10^{12}$, $n_n=10^{12}$ όπου οι φορείς υπέρβασης έχουν εγχυθεί από την μια πλευρά σαν αποτέλεσμα της φωτονικής ακτινοβόλησης. Σαν μόνιμη κατάσταση υπάρχει μια βάθμωση συγκέντρωσης δίπλα στην επιφάνεια. Η διαφορική εξίσωση για τους φορείς μειονότητας στον ημιαγωγό είναι:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0 = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_p - \frac{p_n - p_{no}}{t_p}$$



(a)



(b)

Έγχυση φορέων σε μόνιμη κατάσταση από την μία πλευρά σε :

(α) Ημιάπειρο τεμάχιο

(b) τεμάχιο μήκους W

Οι οριακές συνθήκες είναι p_n (χ=0) = $p_n(0) = 10^{12}cm^{-3}$ και $p_n(\chi \rightarrow \infty) = p_{no} = 10^5 cm^{-3}$. Το μήκος L_p είναι ίσο με $\sqrt{Dp * tp}$ και καλείται μήκος διάχυσης. Το σχήμα δίνει την μεταβολή της πυκνότητας μειονότητας που φθίνει με ένα χαρακτηριστικό μήκος L_p.

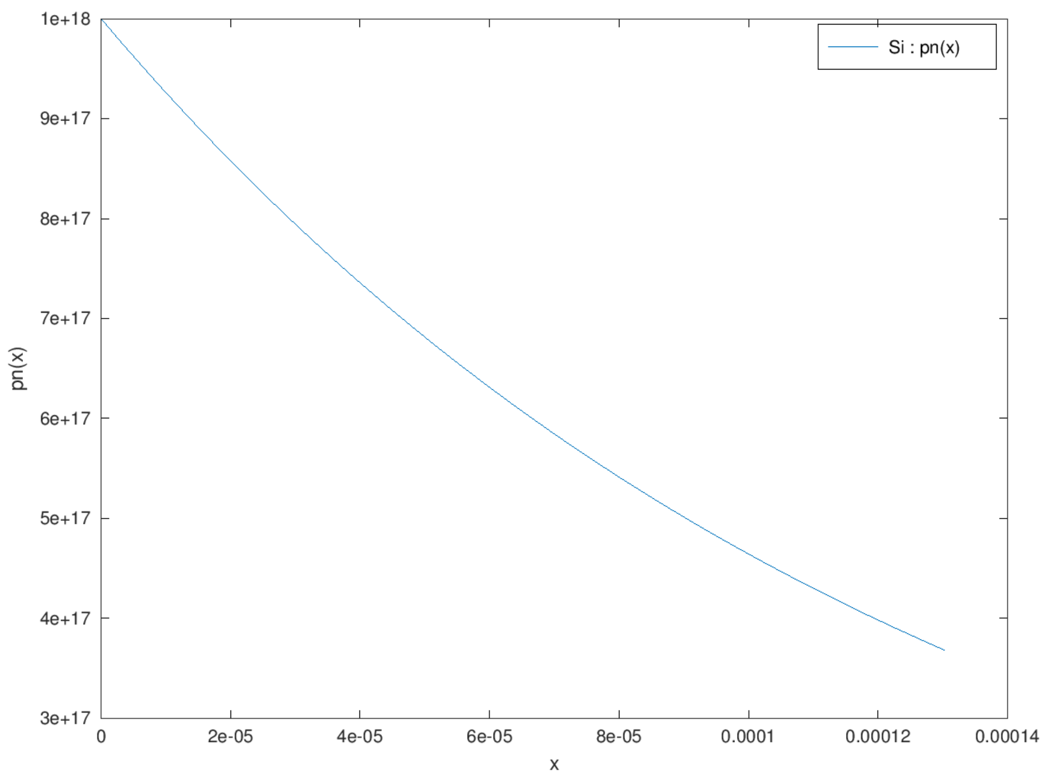
Άσκηση 1:

- Χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες $p_n(0)$, p_{no} να παρασταθεί γραφικά με χρήση Octave η εξίσωση διάχυσης φορέων σε ημιαγωγό ημιάπειρου μήκους:

  $p_n(\chi) = p_{no} + (p_n(0) - p_{no})\ e^{-\frac{x}{Lp}}$

  Το μήκος L_p να υπολογισθεί από το διάγραμμα του, γνωρίζοντας ότι ο ημιαγωγός είναι πυρίτιο και έχει 10^{15} cm^{-3} και συγκέντρωση προσμίξεων με t_p = 17μs.

Το *διάγραμμα* :



Ο *κώδικας* :

```
tp = 17.*(10.^(-6));
dp = 10.* (10.^(-4));
lp = sqrt(tp.*dp);
mtr= 10.^(-10) + lp;
x=linspace(0, mtr,100);
pn0 = (10.^12).*(10.^(6));
pno = (10.^5).*(10.^(6));
ekth = -(x./lp);
y = pno + (pn0 - pno).*(e.^ekth);
plot(x,y);
title('Askisi 1');
legend('Si - pn(x)');
xlabel('x');
ylabel('pn(x)');
```

Σχόλια :

Η μεταβολή της πυκνότητας μειονότητας φθίνει με ένα χαρακτηριστικό μήκος L_p. Όσο το μήκος χ→∞ τόσο μειώνεται και η πυκνότητα.

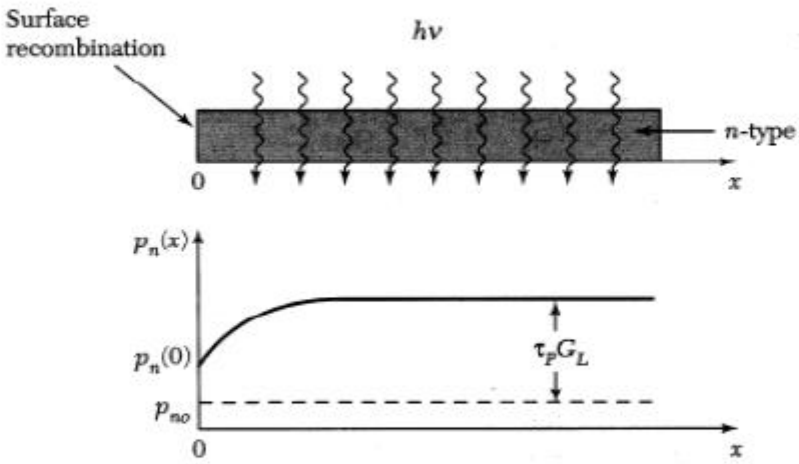
Άσκηση 2:

- Παραλείπεται ,σύμφωνα με τις οδηγίες.

2. <u>Φορείς μειονότητας στην επιφάνεια</u>

Όταν εισάγεται μια επιφανειακή επανασύνδεση στο ένα άκρο του ημιαγωγού κάτω από ομοιόμορφη φωτονική ακτινοβολία (βλ. σχήμα), η πυκνότητα ρεύματος οπών που ρέει στην επιφάνεια από τον όγκο του ημιαγωγού δίνεται από το qU_s, όπου η U_s δίνεται από την εξίσωση :

$$U = v_{th}\sigma_p N_{st}(p_s - p_{no})$$



Επανασύνδεση επιφανείας στο x=0. Η κατανομή των φορέων μειονότητας κοντά στην επιφάνεια εξαρτάται από την ταχύτητα της επιφανειακής επανασύνδεσης.

Η επιφανειακή επανασύνδεση οδηγεί σε χαμηλότερη συγκέντρωση φορέων στην επιφάνεια. Αυτή η βάθμωση της συγκέντρωσης οπών οδηγεί σε πυκνότητα ρεύματος διάχυσης που είναι ίση με το ρεύμα επιφανειακής επανασύνδεσης.

Έτσι, η οριακή συνθήκη στο x=0 είναι:

$$qD_p \frac{dp_n}{dx}|_{x=0} = qU_s = qS_{lr}(p_n(0) - p_{no})$$

Η οριακή συνθήκη στο x=∞ δίνεται από την εξίσωση

$$p_n = p_{no} + t_p G_L$$

Σε μόνιμη κατάσταση η διαφορική εξίσωση είναι:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0 = D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + G_L - \frac{p_n - p_{no}}{t_p}$$

Η λύση της εξίσωσης, που είναι συνάρτηση των παραπάνω οριακών συνθηκών είναι:

$$p_n(x) = p_{no} + t_p G_L \left(1 - \frac{t_p S_{lr} e^{-\frac{x}{L_p}}}{L_p + t_p S_{lr}}\right)$$

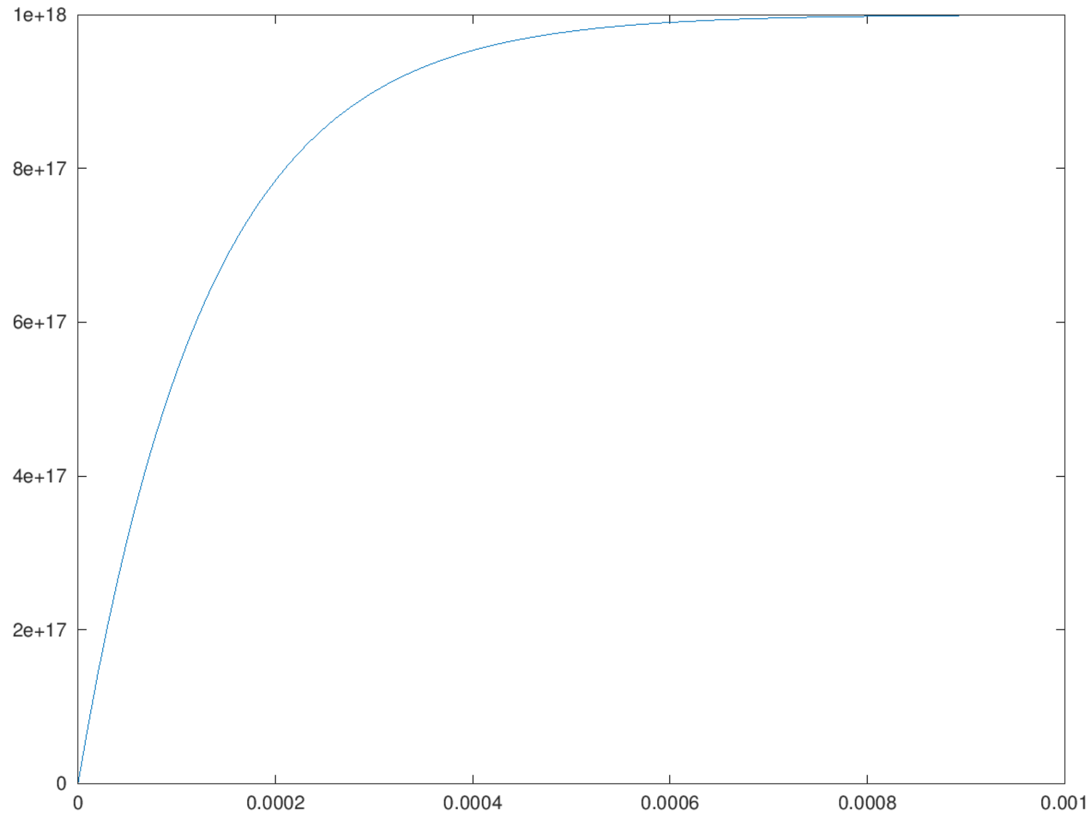
Η απόκριση της εξίσωσης για ένα δοσμένο S_{lr} δίνεται στο σχήμα. Όταν $S_{lr} \rightarrow 0$, τότε

$p_n(x) \approx p_{no} + t_p G_L$.Όταν $S_{lr} \rightarrow \infty$, τότε : $p_n(x) = p_{no} + t_p G_L(1-e^{-\frac{x}{Lp}})$.

Άσκηση 3:

- Να απεικονιστεί με χρήση Octave η συνάρτηση $p_n(x) = p_{no} + t_p G_L(1\text{-}e^{-\frac{x}{Lp}})$, για τις ίδιες οριακές συνθήκες (σε άλλη κατεύθυνση) και για $G_L = U = \frac{\mathrm{pn-pno}}{tp}$.

Το *διάγραμμα* :



Ο *κώδικας* :

```
Lp=sqrt(17).*(10.^(-4.5));
x=linspace(0,0.001,100);
tp=17.*(10.^(-6));
Pn=10.^12.*10.^6;
Pno=(10.^5).*(10.^6);
Pn0=(10.^12).*(10.^6);
Gl=(Pn.-Pno)./tp;
y=Pno.+(tp.*Gl.*(1.-(e.^(-x./Lp))));
plot(x,y);
```

Σχόλια :

Όπως εξηγήθηκε και στο εργαστήριο, η οριακή συνθήκη στο χ=0 μένει ίδια εφόσον ληφθεί υπόψη ότι στρέφεται το δοκίμιο. Επειδή όμως (1) οι άξονες δεν στρέφονται αλλά και (2) στο άπειρο φτάνει στην μέγιστη τιμή συγκέντρωσης = 10^12 (σε αντίθεση με την άσκηση 1 όπου φτάνει στο ελάχιστο =10^5) μαθηματικά είναι σωστό να πει κανείς ότι αλλάζουν οι οριακές συνθήκες. Παρ'όλο που στα εργαστήρια έγινε επεξήγηση όλου του σκεπτικού, είναι αποδεκτό να πει κανείς ότι διατηρούνται οι ίδιες οριακές συνθήκες. Ένας παρατηρητής εκτός εργαστηρίου, μπορεί να το εκλάβει ως λάθος. Από την εξίσωση και το διάγραμμα προκύπτει ότι στην επιφάνεια, η πυκνότητα φορέων μειονότητας πλησιάζει την τιμή θερμικής ισορροπίας p_{no}.

3. Το πείραμα Haynes – Shockley

Ένα από τα κλασσικά πειράματα στην φυσική των ημιαγωγών είναι η επίδειξη της ολίσθησης και της διάχυσης των φορέων μειονότητας, που υλοποιήθηκε αρχικά από τους JR.Haynes και W.Shockley. Η βασική διάταξη του πειράματος Haynes-Shockley δίνεται στο σχήμα (α). Χωρικά συγκεντρωμένοι παλμοί φωτός δημιουργούν φορείς υπέρβασης σε μια ημιαγώγιμη ράβδο. Μετά από ένα παλμό, η εξίσωση μετάβασης δίνεται από την εξίσωση

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -p_n\mu_p\frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E\frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_p - \frac{p_n - p_{no}}{t_p}$$

θέτοντας G_L=0 και $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$ (δηλαδή το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι σταθερό κατά μήκος της ημιαγώγιμης ράβδου):

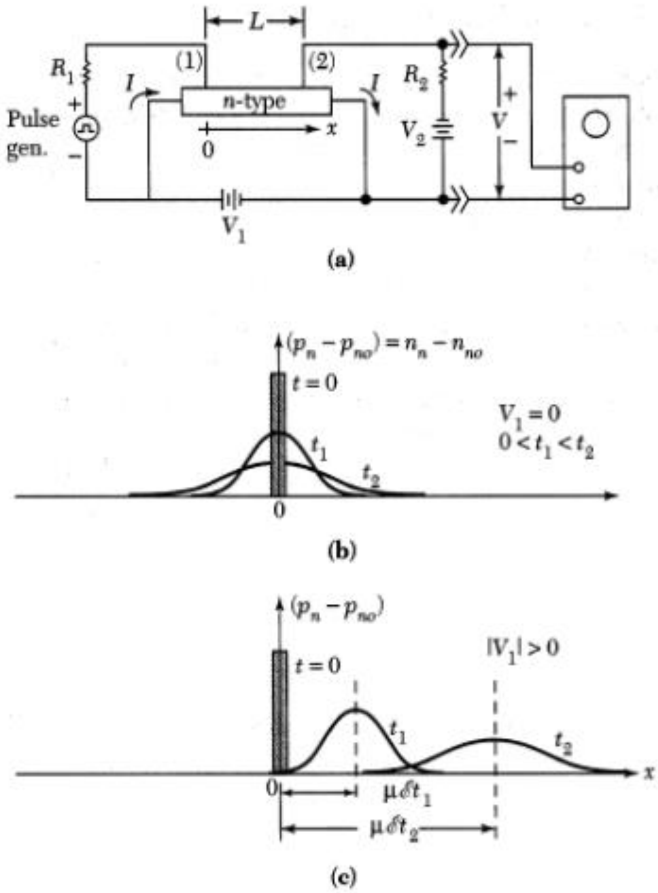
$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\mu_n E\frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{no}}{t_p}$$

Αν δεν εφαρμόζεται πεδίο κατά μήκος του ημιαγωγού, η λύση δίνεται από την:

$$p_n(x,t) = p_{no} + \frac{N}{\sqrt{4\pi D_p t}}e^{-\frac{x^2}{4D_p t}-\frac{t}{t_p}}$$

Όπου N είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων και των οπών που γεννήθηκαν ανά μονάδα επιφανείας N=10^12 cm^{-2}. Το σχήμα (β) δίνει την λύση καθώς οι φορείς διαχέονται μακριά από το σημείο έγχυσης και επανασυνδέονται.

Αν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος του ημιαγωγού, η λύση έχει την μορφή της δεύτερης εξίσωσης, εκτός του ότι το χ αντικαθίσταται από το $\chi - \mu_p E t$ (σχήμα (c)). Έτσι, όλοι οι φορείς υπέρβασης προχωρούν προς την αρνητική πλευρά του δοκιμίου με μια ταχύτητα ολίσθησης $\mu_p E$. Την ίδια στιγμή, οι φορείς διαχέονται προς τα έξω και επανασυνδέονται όπως στην περίπτωση χωρίς πεδίο.



Το πείραμα Haynes-Shockley: (α) Πειραματική διάταξη, (b) Κατανομές ρευμάτων χωρίς εφαρμοζόμενο πεδίο, (c) Κατανομές φορέων με επιβαλλόμενο πεδίο

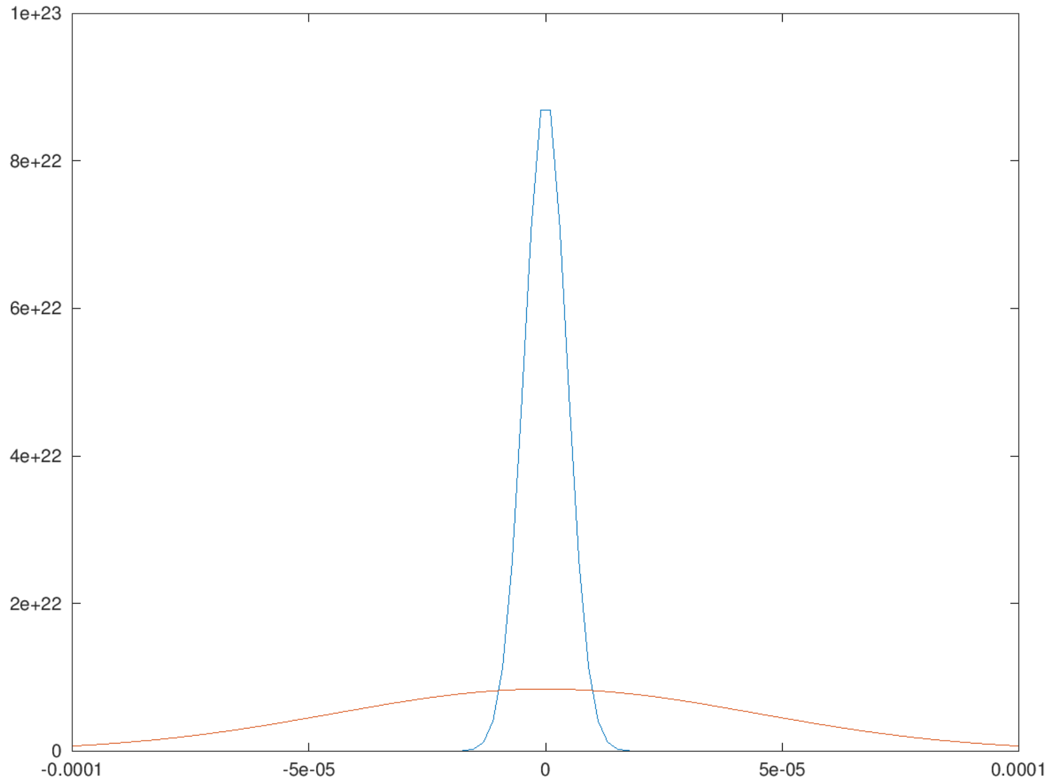
Άσκηση 4:

- Χρησιμοποιείστε το Octave για την γραφική λύση της

$$p_n(x,t) = p_{no} + \frac{N}{\sqrt{4\pi D_p t}} e^{-\frac{x^2}{4D_p t} - \frac{t}{t_p}}$$

Να σχολιάσετε τι σηματοδοτεί αυτή η μετακίνηση των καμπυλών προς την αρνητική πλευρά του δοκιμίου όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο όπως στο σχήμα (c).

Το *διάγραμμα* :

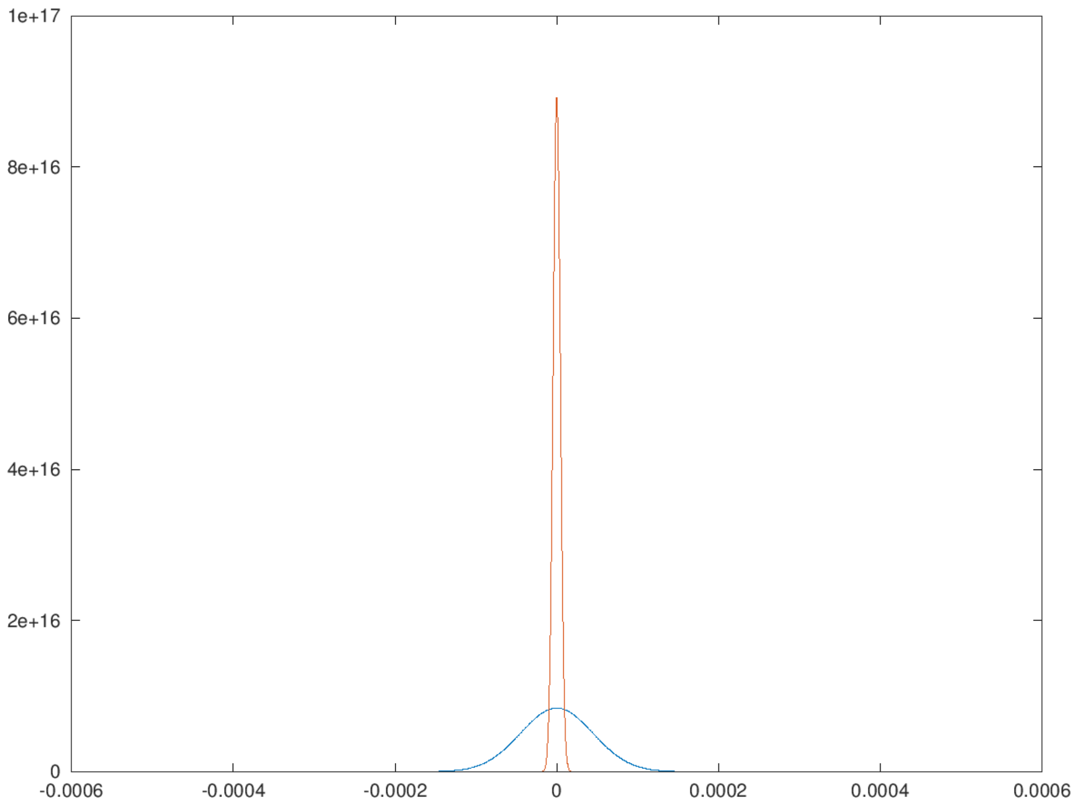


Ο *κώδικας* :

```
x=linspace(-0.0001,0.0001,100);
tp=17.*(10.^(-6));
Dp=10.^(-3);
Pn=10.^12.*10.^6;
Pno=(10.^5).*(10.^6);
Pn0=(10.^12).*(10.^6);
N=(10.^12).*(10.^6);
t1=10.^(-8);
t2=10.^(-6);

a1=sqrt(4.*pi.*Dp.*t1);
b1=N./(a1);
c1=-((x.^2)/(4.*Dp.*t1))-(t1./tp);
y1=Pno.+(b1.*e.^c1);

a2=sqrt(4.*pi.*Dp.*t2);
b2=N./(a2);
c2=-((x.^2)/(4.*Dp.*t2))-(t2./tp);
y2=Pno.+(b2.*e.^c2);

plot(x,y1,x,y2);
```

Εναλλακτικά :

Το *διάγραμμα* :



Ο *κώδικας* :

```
x = linspace(-0.0005, 0.0005, 10000);
tp = 17.*(10.^(-6));
dp = 10.^(-3);
N = 10^12;
t1 = 10^(-6);
t2 = 10^(-8);
pno = 10^11;
riza1 = sqrt(4.*3.14.*dp.*t1);
ekth1 = -(x.^2)./(4.*dp.*t1) - (t1./tp);
riza2 = sqrt(4.*3.14.*dp.*t2);
ekth2 = -(x.^2)./(4.*dp.*t2) - (t2./tp);
y1 = pno + N./riza1.*(e.^ekth1);
y2 = pno + N./riza2.*(e.^ekth2);
plot(x,y1,x,y2);
```

Σχόλια :

Η συνάρτηση που μας δίνεται είναι δύο μεταβλητών: χρόνου (t) και χώρου (χ). Κάθε φορά που προσκρούει ένας παλμός φωτός στο τεμάχιο του ημιαγωγού τότε λόγω της φωτονικής διέγερσης σε εκείνο το σημείο η συγκέντρωση των φορέων μειονότητας ισούται με τη συγκέντρωση των φορέων υπέρβασης. Σταδιακά με την πάροδο του χρόνου οι φορείς μειονότητας μειώνονται στην αρχική τους τιμή εξαιτίας της επανασύνδεσης ενώ ταυτόχρονα διαχέονται στον ημιαγωγό λόγω της διαφοράς στη συγκέντρωση (σε αντίθεση οι φορείς πλειονότητας παραμένουν σχεδόν αμετάβλητοι). Έτσι όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο οι φορείς μειονότητας αποκτούν ταχύτητα με μέτρο $\mu_p Et$ εξαιτίας αυτού, με αποτέλεσμα αυτή η βάθμωση της συγκέντρωσης (που αμβλύνεται με το χρόνο) να μετατοπίζεται.