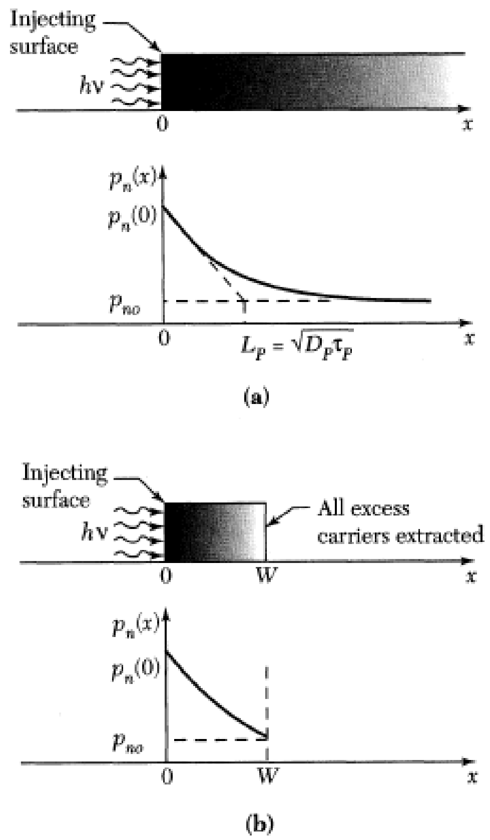
Εργαστήριο 4: Φαινόμενα μεταφοράς φορέων στο Octave

1.1 Έγχυση μόνιμης κατάστασης από την μια πλευρά

Το Σχήμα 1 δείχνει έναν ημιαγωγό Si τύπου n με $n_i=10^{10}$, $p_{no}= 10^5$, $p_n=10^{12}$ και $n_n=10^{12}$ 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:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0 = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_p - \frac{p_n - p_{no}}{t_p} \quad (84)$$



Σχήμα 1. Έγχυση φορέων σε μόνιμη κατάσταση από την μία πλευρά. (α) Ημι-άπειρο τεμάχιο (b) τεμάχιο μήκους W.

Οι οριακές συνθήκες είναι $p_n(x=0) = p_n(0) = 10^{12} cm^{-3}$

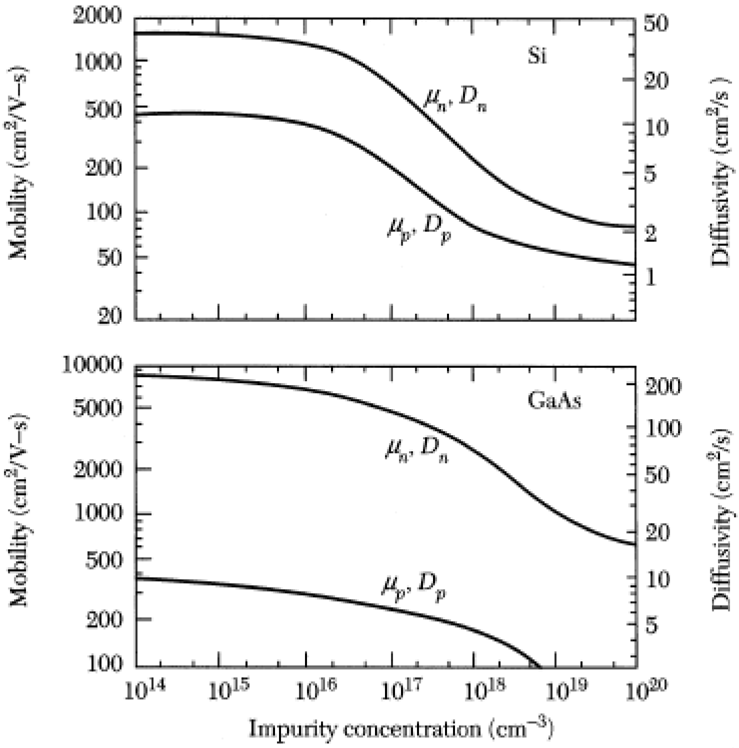
και $p_n(x \to \infty) = p_{no} = 10^5 cm^{-3}$.

Το μήκος L_p είναι ίσο με $\sqrt{D_p t_p}$ και καλείται μήκος διάχυσης. Το Σχήμα 1 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 διάχυση φορέων σε ημιαγωγό ημιάπειρου μήκους*: $p_n(x) = p_{no} + (p_n(0) - p_{no}) e^{-\frac{x}{L_p}}$

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



Σχήμα 2. Κινητικότητα και διαχυσιμότητα στο Si και στο GaAs στους 300K ως συνάρτηση της συγκέντρωσης προσμίξεων.

Ασκηση 2

Αν αλλάξουμε την δεύτερη οριακή συνθήκη όπως δείχνεται στο Σχήμα 1b έτσι ώστε να υπολογισθούν όλοι οι φορείς υπέρβασης στο $x = W = 50\mu m$, ήτοι $p_n(W) = p_{no}$, τότε βρίσκουμε μια νέα λύση για την εξίσωση 84:

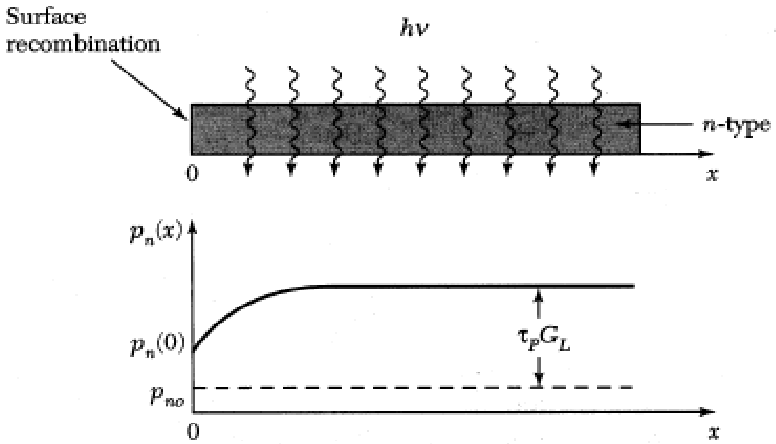
$$p_n(x) = p_{no} + (p_n(0) - p_{no})\frac{\sinh(\frac{W-x}{L_p})}{\sinh(\frac{W}{L_p})} \quad (86)$$

Χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες $p_n(0), p_{no}$ *να παρασταθεί γραφικά με χρήση Octave η εξίσωση διάχυση φορέων σε ημιαγωγό καθορισμένου μήκους W*

1.2 Φορείς μειονότητας στην επιφάνεια

Όταν εισάγεται μια επιφανειακή επανασύνδεση στο ένα άκρο του ημιαγωγού κάτω από ομοιόμορφη φωτονική ακτινοβολία (Σχήμα 3), 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

$$U = v_{th}\sigma_p N_{st}(p_s - p_{no}) \quad (73).$$



Σχήμα 3. 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:

$$qD_p \frac{dp_n}{dx}|_{x=0} = qU_s = qS_{lr}(p_n(0) - p_{no}) \qquad (88)$$

Η οριακή συνθήκη στο $x = \infty$ δίνεται από την εξίσωση

$$p_n = p_{no} + t_p G_L \qquad (45α)$$

Σε μόνιμη κατάσταση η διαφορική εξίσωση είναι:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0 = D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + G_L - \frac{p_n - p_{no}}{t_p} \qquad (89)$$

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

$$p_n(x) = p_{no} + t_p G_L \left(1 - \frac{t_p S_{lr} e^{-\frac{x}{L_p}}}{L_p + t_p S_{lr}}\right) \qquad (90)$$

Η απόκριση της εξίσωσης για ένα δοσμένο S_{lr} δίνεται στο Σχήμα 3. Όταν $S_{lr} \to 0$, τότε $p_n(x) \approx p_{no} + t_p G_L$. όταν $S_{lr} \to \infty$, τότε:

$$p_n(x) = p_{no} + t_p G_L \left(1 - e^{-\frac{x}{L_p}}\right) \qquad (91)$$

Άσκηση 3

Να απεικονιστεί με χρήση Octave η συνάρτηση (91), για τις ίδιες οριακές συνθήκες (**σε άλλη κατεύθυνση**) και για $G_L = U = \frac{p_n - p_{no}}{t_p}$

.

1.3 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 4α. Χωρικά συγκεντρωμένοι παλμοί φωτός δημιουργούν φορείς υπέρβασης σε μια ημιαγώγιμη ράβδο. Μετά από ένα παλμό, η εξίσωση μετάβασης δίνεται από την εξίσωση 82, θέτοντας $G_L = 0$ και $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$ (δηλαδή το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι σταθερό κατά μήκος της ημιαγώγιμης ράβδου):

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\mu_n E \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{no}}{t_p} \qquad (92)$$

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

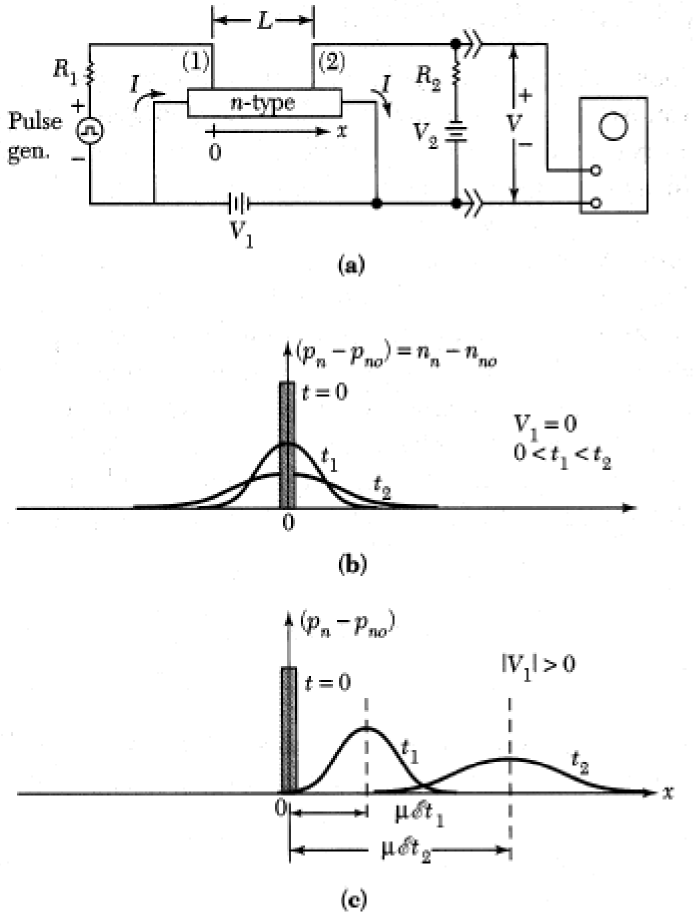
$$p_n(x,t) = p_{no} + \frac{N}{\sqrt{4\pi D_p t}} e^{-\frac{x^2}{4D_p t} - \frac{t}{t_p}} \qquad (93)$$

Άσκηση 4

Χρησιμοποιείστε το Octave για την γραφική λύση της 93.

Όπου N είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων και των οπών που γεννήθηκαν ανά μονάδα επιφανείας N=10^12 cm^{-2}. Το Σχήμα 4β 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 εξίσωσης 93, εκτός του ότι το x αντικαθίσταται από το $x - \mu_p E t$ (Σχήμα 4c). 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. *Να σχολιάσετε τι σηματοδοτεί αυτή η μετακίνηση των καμπυλών προς την αρνητική πλευρά του δοκιμίου όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο όπως φαίνεται στη σχήμα 4c.*



Σχήμα 4. Το πείραμα Haynes – Shockley. (α) Πειραματική διάταξη (b) Κατανομές ρευμάτων χωρίς εφαρμοζόμενο πεδίο (c) Κατανομές φορέων με επιβαλλόμενο πεδίο.