

Πείραμα 1β -Επαφή p-n.

Ιάσων Καζάζης

Προς τον κύριο Α.Παπαθανασίου.



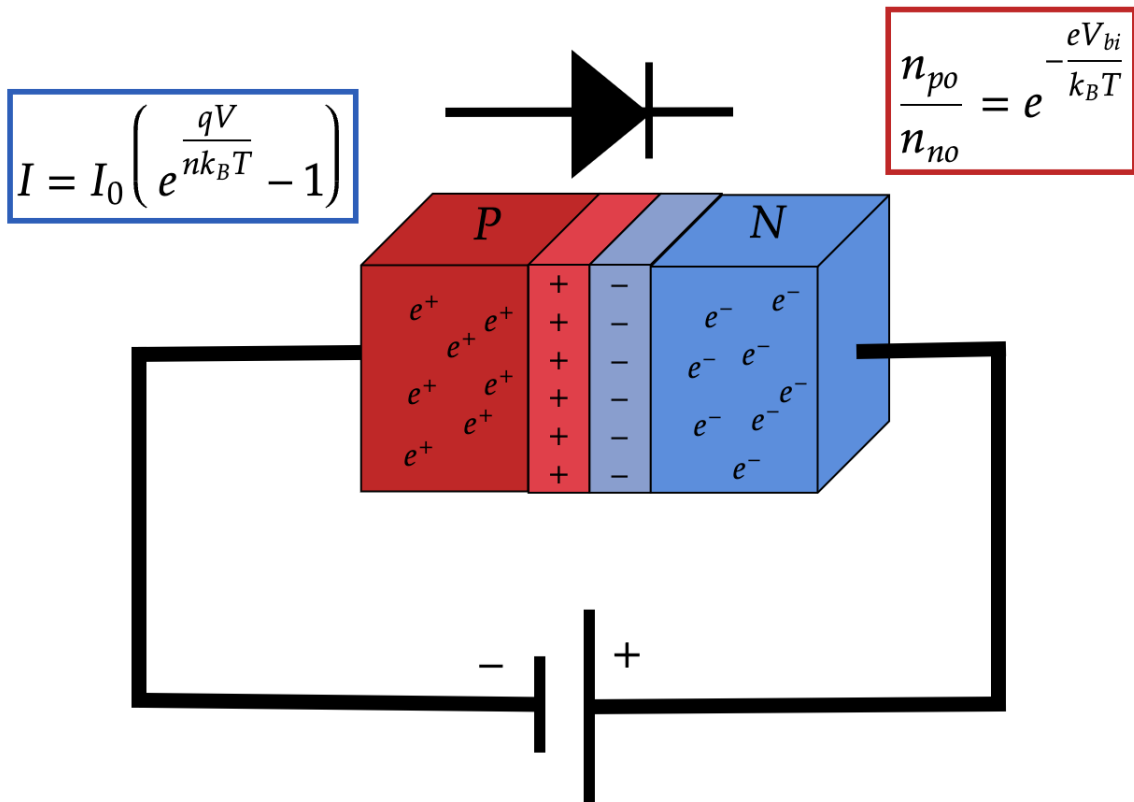
HELLENIC REPUBLIC
National and Kapodistrian
University of Athens

—EST. 1837—

Προσωπικά στοιχεία | AM: 1110201900073 , email: sph1900073@uoa.gr

Ομάδα 4: Θάνος-Τάνο Ευάγγελος, Καζάζης Ιάσων, Καλλη Ευριπίδης

Εκτέλεση άσκησης Τετάρτη 9:00-12:00, 15 Μαΐου 2024.



Εργαστήριο Κατεύθυνσης Φυσικής Συμπυκνωμένης Ύλης.

Πείραμα 1B.

21 Ιουνίου 2024

Περιεχόμενα

1	Θεωρία Πειράματος.	1
1.1	Φυσική Ημιαγωγών	1
1.2	Επαφή p-n	2
1.2.1	Πόλωση διόδου επαφής pn	4
1.2.2	Αντίστροφα πολωμένη δίοδος	4
1.2.3	Ορθή πολωμένη δίοδος	5
1.2.4	Συγκέντρωση φορέων και ρεύματα επαφής pn	5
2	Πειραματική Διαδικασία.	7
2.1	Πειραματική Διάταξη	7
2.2	Διάταξη κυκλώματος.	8
3	Πειραματικά αποτελέσματα.	11
3.1	Δεδομένα πρώτου πειράματος.	11
3.2	Δεδομένα δεύτερου πειράματος.	11
4	Ανάλυση πειράματος	13
4.1	Πείραμα 1.	13
4.2	Πείραμα 2.	14
4.3	Ερώτημα	17
4.4	Συμπεράσματα, σφάλματα και περιθώρια βελτίωσης.	18
5	Βιβλιογραφία.	19
5.1	Βιβλιογραφία.	19
5.2	Αναφορές.	19
5.3	Μετρήσεις-Δεδομένα.	19



Περίληψη

Η pn επαφή είναι ένα θεμελιώδες στοιχείο στην ημιαγωγική τεχνολογία, που αποτελείται από δύο περιοχές ενός ημιαγωγού υλικού: μια περιοχή τύπου p και μια περιοχή τύπου n. Αυτές οι δύο περιοχές έχουν διαφορετικούς τύπους φορέων φόρτισης: οι φορείς στην περιοχή τύπου p είναι θετικά φορτισμένες οπές, ενώ οι φορείς στην περιοχή τύπου n είναι αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια. Όταν οι περιοχές αυτές έρχονται σε επαφή, δημιουργείται μια περιοχή απογύμνωσης (depletion region) στην διαχωριστική επιφάνεια. Στην περιοχή αυτή, τα ηλεκτρόνια από την περιοχή τύπου n μεταναστεύουν στην περιοχή τύπου p και συνδυάζονται με τις οπές, δημιουργώντας μια ζώνη που είναι απαλλαγμένη από ελεύθερους φορείς φόρτισης και παρουσιάζει ηλεκτρική αντίσταση. Αυτή η περιοχή απογύμνωσης δημιουργεί ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση φορέων από τη μια πλευρά στην άλλη. Η pn επαφή είναι η βάση πολλών ημιαγωγικών συσκευών, όπως οι δίοδοι, τα τρανζίστορ, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα και τα LED. Στις δίοδους, για παράδειγμα, η pn επαφή επιτρέπει την ροή ρεύματος μόνο προς μια κατεύθυνση, καθιστώντας την ένα κρίσιμο στοιχείο στα κυκλώματα ανόρθωσης. Σε αυτή την εργαστηριακή άσκηση θα μελετήσουμε τις ιδιότητές της μέσα από δύο διατάξεις και θα κάνουμε μετρήσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών της.

1 Θεωρία Πειράματος.

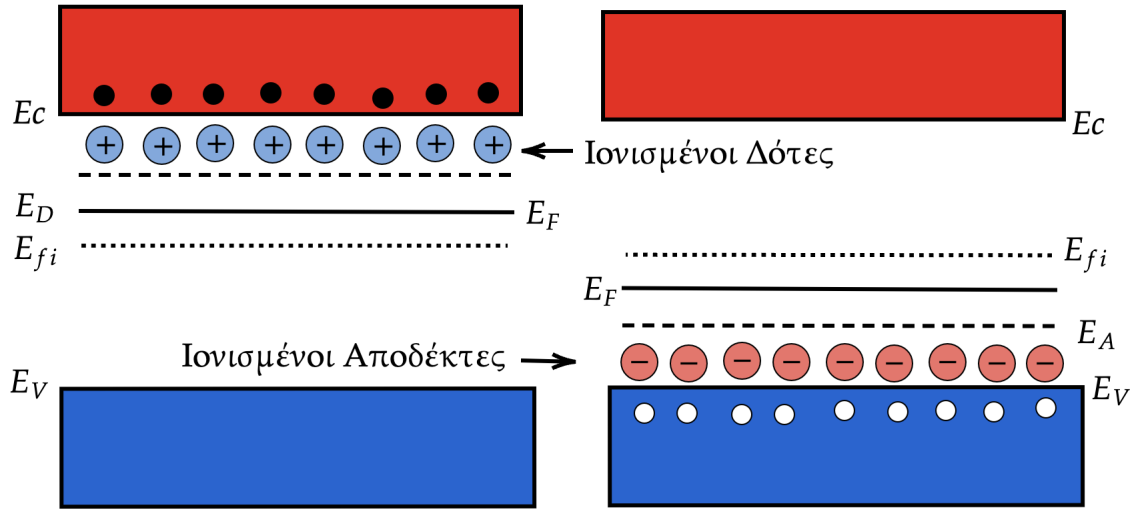
1.1 Φυσική Ημιαγωγών

Στους ημιαγωγούς, όπως και σε κάθε κρυσταλλικό πλέγμα ενός στερεού, υπάρχουν ατέλειες που, όταν είναι σε μεγάλη έκταση, επηρεάζουν τις φυσικές ιδιότητες του υλικού. Αυτές οι ατέλειες μπορεί να είναι φυσικές, όπως κενά ή επιπλέον άτομα σε μη κανονικές θέσεις, διαταράσσοντας τη συμμετρία του πλέγματος. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, στους ενδογενείς ημιαγωγούς, η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας είναι ίση με τη συγκέντρωση των οπών.

Οι ατέλειες μπορεί επίσης να είναι εξωγενείς, δηλαδή να εισάγονται σκόπιμα (doping) σε έναν ενδογενή ημιαγωγό με την προσθήκη προσμίξεων, συνήθως από στοιχεία των ομάδων III και V του περιοδικού πίνακα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εμπλουτισμός. Αυτές οι προσμίξεις έχουν ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει η ίδια συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών στον ημιαγωγό. Οι εξωγενείς ημιαγωγοί έχουν περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές, λόγω της ικανότητάς τους να ρυθμίζουν τους φορείς φόρτισης. Στο συγκεκριμένο πείραμα, θα ασχοληθούμε με αυτούς.

Οι εξωγενείς ημιαγωγοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Ημιαγωγοί με **πλεόνασμα ηλεκτρονίων** στη ζώνη αγωγιμότητας: Αυτοί έχουν προσμίξεις δοτών (N_D), δηλαδή άτομα ομάδας V, τα οποία έχουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο στην τελευταία τους στάθμη και μπορούν να το δώσουν στον ημιαγωγό, δημιουργώντας πλεόνασμα ηλεκτρονίων και καθιστώντας τον n-type. Ημιαγωγοί με **πλεόνασμα οπών** στη ζώνη σθένους: Αυτοί έχουν προσμίξεις αποδεκτών (N_A), δηλαδή άτομα ομάδας III, τα οποία χρειάζονται ένα ηλεκτρόνιο για να γεμίσουν την ενεργειακή τους στάθμη και έτσι θα πάρουν ηλεκτρόνια από το πυρίτιο, με αποτέλεσμα το πλέγμα να έχει πλεόνασμα οπών και να είναι p-type. Παρακάτω ορίζουμε τις φυσικές ποσότητες:

- E_{Fi} : Ενδογενής ενέργεια Fermi, δηλαδή η ενέργεια Fermi που θα είχε ο ημιαγωγός χωρίς προσμίξεις.
- E_F : Η ενέργεια Fermi που έχει ο ημιαγωγός μαζί με τις προσμίξεις.
- E_A και E_D : Οι ενέργειες αποδεκτών και δοτών αντίστοιχα.
- E_C και E_V : Κάτω όριο ζώνης αγωγιμότητας και άνω όριο ζώνης σθένους αντίστοιχα.



Εικόνα 1: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών ημιαγωγών τύπου p και n.

Οι συγκεντρώσεις των οπών και ηλεκτρονίων σε ένα ημιαγωγό τύπου p και n στις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας αντίστοιχα δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$p = n_i e^{(E_F - E_{Fi})/kT} \quad (1)$$

$$n = n_i e^{(E_{Fi} - E_F)/kT} \quad (2)$$

Με n_i η ενδογενής συγκέντρωση των φορέων, δηλαδή σε έναν ενδογενή ημιαγωγό $E_F = E_{Fi}$ άρα $n = p = n_i$.

1.2 Επαφή p-n

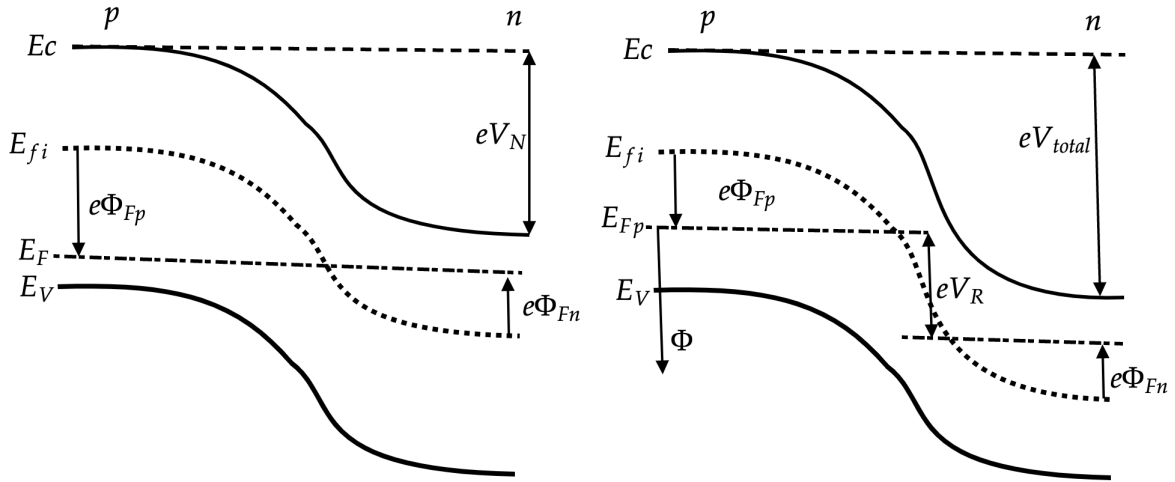
Στο πείραμά μας, θα ασχοληθούμε με την επαφή p-n, η οποία αποτελείται από δύο μικρού μεγέθους πλάκες πυριτίου με εξωγενείς προσμίξεις: η μία είναι τύπου n (n-type) και η άλλη τύπου p (p-type). Φέρνουμε σε μηχανική επαφή αυτές τις δύο πλάκες και παρατηρούμε μικροσκοπικές μετατοπίσεις φορέων, καθώς και τον σχηματισμό περιοχών που επηρεάζουν τις μακροσκοπικές ηλεκτρικές ιδιότητες των δύο πλακών.

Συγκεκριμένα, το πλεόνασμα των ηλεκτρονίων στην πλάκα τύπου n έλκεται και ενώνεται με το πλεόνασμα οπών στην πλάκα τύπου p. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα κοντά στο επίπεδο επαφής (οι μετατοπίσεις συμβαίνουν στον άξονα x, ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο επαφής).

Σημειώνουμε ότι η p-type πλάκα έχει περισσότερες προσμίξεις ($N_A > N_D$) έτσι η συνολική συγκέντρωση των οπών είναι μεγαλύτερη από αυτή των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας.

Αυτή η διαφορά φορτίου (και μάζας) που υπάρχει πέριξ της επαφής δημιουργεί ένα χωρικά ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} με κατεύθυνση τον p-type ημιαγωγό, το οποίο σχηματίζεται σε μια περιοχή την οποία καλούμε περιοχή απογύμνωσης (depletion), έξω από αυτή την περιοχή το πεδίο αυτό είναι μηδέν. Το πεδίο τείνει να επαναφέρει τους φορείς στις αρχικές τους καταστάσεις (που είχαν πριν την επαφή), όμως οι δυνάμεις διάχυσης αντισταθούν αυτού. Τελικά η επαφή φτάνει σε μια μόνιμη (stationary) κατάσταση στην οποία υπάρχει μια σταθερή μεταφορά φορέων ανάμεσα στις δύο πλάκες με την περιοχή απογύμνωσης να έχει μια λειτουργία πυκνωτή.

Οι ενεργειακές ζώνες λόγω της επαφής (ουσιαστικά λόγω του πεδίου) το οποίο προκαλεί ένα δυναμικό το οποίο μεταβάλλει τις ενέργειες E_C και E_V καμπυλώνονται στην περιοχή απογύμνωσης διατηρώντας σταθερή την ενέργεια Fermi όπως στο παρακάτω σχήμα. Την βαθμίδα δυναμικού την οποία επιβάλλει το πεδίο ονομάζουμε δυναμικό επαφής V_{bi} .



Εικόνα 2.3. Αριστερά: Ενεργειακό διάγραμμα καμπυλωμένων ενεργειακών ζωνών όταν φέραμε τις δυο πλάκες σε επαφή και είναι πλέον σε stationary κατάσταση. **Δεξιά:** Ενεργειακό διάγραμμα ανάστροφα πολωμένης επαφής p-n.

Η ηλεκτρική ουδετερότητα των δύο ημιαγωγών διατηρείται, επομένως θα έχουμε την παρακάτω ισότητα:

$$eN_D x_n = eN_A x_p$$

Όπου x_n και x_p ορίζονται τα πλάτη της περιοχής απογύμνωσης στους ημιαγωγούς n και p αντίστοιχα. Επομένως καταλήγουμε μέσω της εξίσωσης Poisson ότι το δυναμικό επαφής δίνεται από την πιο κάτω εξίσωση (όπου ϵ η διηλεκτρική σταθερά του υλικού):

$$V_{bi} = \frac{(x_n + x_p)eN_D x_p}{2\epsilon} = \frac{w e N_D x_p}{2\epsilon} \quad (3)$$

Το εύρος της περιοχής απογύμνωσης δίνεται ως:

$$w = x_n + x_p$$

Με αντικατάσταση των πιο πάνω καταλήγουμε πως τελικά:

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} V_{bi} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad (4)$$

Στην εικόνα 2 αριστερά, παρατηρούμε ότι η ζώνη σθένος έξω από την περιοχή απογύμνωσης είναι χαμηλότερη κατά eV_{bi} στον ημιαγωγό τύπου n σε σχέση με τον τύπου p. Αυτή η διαφορά είναι ίση με την διαφορά των E_C και E_V από την ενέργεια Fermi στους δυο ημιαγωγούς επομένως:

$$eV_{bi} = \Phi_{Fp} + \Phi_{Fn}$$

Αφού $\Phi_{Fp} = E_F - E_{Fi,p}$ και $\Phi_{Fn} = E_{Fi,n} - E_F$ αντικαθιστώντας τις ενέργειες από τις εξισώσεις (1) και (2) καταλήγουμε πως το δυναμικό έχει τη μορφή:

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$



Λύνοντας την εξίσωση (3) ως προς το πλάτος x_n καταλήγουμε να βρούμε τις σχέσεις που μας δίνουν τα πλάτη της περιοχής απογύμνωσης των δυο ημιαγωγών:

$$x_n = \sqrt{\frac{V_{bi}(N_D + N_A)}{2eN_A}} \quad x_p = \sqrt{\frac{V_{bi}(N_D + N_A)}{2eN_D}}$$

1.2.1 Πόλωση διόδου επαφής pn

Στην επαφή pn, η πόλωση της διόδου εξαρτάται από την εφαρμογή εξωτερικής τάσης στα άκρα της επαφής. Αυτή η εξωτερική τάση δημιουργεί ένα πρόσθετο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο μπορεί να είναι είτε παράλληλο είτε αντίθετο με το ήδη υπάρχον εσωτερικό πεδίο της επαφής.

- **Ορθή πόλωση:** Όταν το εξωτερικό πεδίο είναι παράλληλο με το υπάρχον εσωτερικό πεδίο, δηλαδή όταν η θετική τάση εφαρμόζεται στην περιοχή τύπου p και η αρνητική τάση στην περιοχή τύπου n. Σε αυτή την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια στην περιοχή n και οι οπές στην περιοχή p ωθούνται προς την επαφή, μειώνοντας το φράγμα δυναμικού και επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος μέσω της διόδου.
- **Ανάστροφη πόλωση:** Όταν το εξωτερικό πεδίο είναι αντίθετο με το υπάρχον εσωτερικό πεδίο, δηλαδή όταν η θετική τάση εφαρμόζεται στην περιοχή τύπου n και η αρνητική τάση στην περιοχή τύπου p. Σε αυτή την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια και οι οπές απομακρύνονται από την επαφή, αυξάνοντας το φράγμα δυναμικού και περιορίζοντας τη ροή του ρεύματος μέσω της διόδου.

Επομένως εάν εφαρμόσουμε μια πόλωση (bias) στα άκρα της επαφής, δίνουμε ρεύμα το οποίο προκαλεί ένα πρόσθετο πεδίο που έχει αντίθετη ή παράλληλη φορά με το ήδη υπάρχον (δηλαδή προς την περιοχή του n-type ή του p-type ημιαγωγού). Όταν τα πεδία είναι παράλληλα έχουμε ορθή πόλωση ενώ όταν τα πεδία είναι αντίθετα έχουμε ανάστροφη πόλωση.

1.2.2 Αντίστροφα πολωμένη διόδος

Η εφαρμογή αντίστροφης τάσης πόλωσης V_R (θετική τάση στον περιοχή n σε σχέση με την p), η οποία προκαλεί ένα παράλληλο πεδίο με αυτό που υπάρχει λόγω της επαφής, έτσι ο ολικός φραγμός δυναμικού θα γίνει από eV_{bi} σε ένα $eV_{tot} = eV_{bi} + eV_R$. Αυτή η προσθήκη αντιστοιχεί σε ασυνέχεια της ενέργειας Fermi όπως φαίνεται στην εικόνα 3 δεξιά.

Αυτή η εφαρμογή αφού το ολικό δυναμικό μέσα στην επαφή έχει αλλάξει, προκαλεί αλλαγή και στο εύρος της περιοχής απογύμνωσης και η εξίσωση (4) γίνεται:

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e}(V_{bi} + V_R) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad (5)$$

Τα x_n και x_p θα υποστούν αντίστοιχες αλλαγές με το w , έτσι προκύπτουν οι νέες σχέσεις :

$$x_n = \sqrt{\frac{(V_{bi} + V_R)2\epsilon N_A}{(N_D + N_A)eN_D}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{(V_{bi} + V_R)2\epsilon N_D}{(N_D + N_A)eN_A}}$$



Εφόσον υπάρχει αυτός ο διαχωρισμός φορτίου στην περιοχή απογύμνωσης (δηλαδή έχουμε μια συμπεριφορά πυκνωτή), τότε θα υπάρχει και μια χωρητικότητα η οποία χαρακτηρίζει την επαφή. Ορίζουμε αυτή την χωρητικότητα ως:

$$C = \frac{dQ}{dV_R}$$

Η οποία είναι ο ρυθμός μεταβολής του φορτίου σε σχέση με το εφαρμοζόμενο δυναμικό.

Η στοιχειώδης μεταβολή του φορτίου είναι:

$$dQ = eN_D dx_n = eN_A dx_p$$

Έτσι αντικαθιστώντας τις πιο πάνω σχέσεις η χωρητικότητα της επαφής θα πρέπει να είναι:

$$C(V_R) = \frac{N_A N_D e \epsilon}{\sqrt{2(N_D + N_A)(V_{bi} + V_R)}} = \frac{\epsilon \sqrt{\frac{2\epsilon}{e}(V_{bi} + V_R) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}}{A \frac{\epsilon_s}{w}}$$

1.2.3 Ορθή πολωμένη δίοδος

Η εφαρμογή ορθής τάσης πόλωσης V_D (αρνητική τάση στον περιοχή n σε σχέση με την p), η οποία προκαλεί ένα αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο με αυτό που υπάρχει λόγω της επαφής, φροντίζουμε να είναι μικρού μέτρου ώστε το συνολικό πεδίο να έχει φορά ακόμα προς τον p- type ημιαγωγό. Πλέον το δυναμικό στην περιοχή απογύμνωσης θα είναι $eV_{tot} = eV_{bi} - eV_D$ και έτσι το ρεύμα ολίσθησης μειώνεται σε σχέση με το ρεύμα διάχυσης. Το μικρό δυναμικό επίσης έχει ως συνέπεια το εύρος της περιοχής απογύμνωσης να είναι μικρό.

1.2.4 Συγκέντρωση φορέων και ρεύματα επαφής pn

Οι συγκεντρώσεις των φορέων σε μια επαφή pn η οποία βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και στην οποία δεν εφαρμόζεται κάποια πόλωση δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{n_{p0}}{n_{n0}} = e^{-\frac{eV_{bi}}{kT}}$$

$$\frac{p_{p0}}{p_{n0}} = e^{\frac{eV_{bi}}{kT}}$$

- n_{p0} : συγκέντρωση ηλεκτρονίων της περιοχής p σε θερμική ισορροπία
- n_{n0} : συγκέντρωση ηλεκτρονίων της περιοχής n σε θερμική ισορροπία
- p_{p0} : συγκέντρωση οπών της περιοχής p σε θερμική ισορροπία
- p_{n0} : συγκέντρωση οπών της περιοχής n σε θερμική ισορροπία

Με την εφαρμογή κάποιας πόλωσης είπαμε και προηγουμένως ότι το δυναμικό μεταβάλλεται, για παράδειγμα στην ορθή πόλωση με ένα δυναμικό V_D , το δυναμικό στην επαφή είναι μικρότερο από το δυναμικό χωρίς την πόλωση. Οι συγκεντρώσεις πλέον θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$\frac{n_p}{n_n} = e^{-\frac{e(V_{bi} - V_D)}{kT}}$$



$$\frac{p_p}{p_n} = e^{\frac{e(V_{bi}-V_D)}{kT}}$$

- n_p : συγκέντρωση ηλεκτρονίων της περιοχής p
- n_n : συγκέντρωση ηλεκτρονίων της περιοχής n
- p_p : συγκέντρωση οπών της περιοχής p
- p_n : συγκέντρωση οπών της περιοχής n

Με την προσέγγιση ότι οι φορείς πλειονότητας δεν έχουν μεγάλη απόκλιση με την εφαρμογή της ορθής πόλωσης δηλαδή $n_n \approx n_{n0}$ και $p_p \approx p_{p0}$, τότε:

$$\frac{n_p}{n_{p0}} = e^{\frac{eV_D}{kT}}$$

$$\frac{p_n}{p_{n0}} = e^{\frac{eV_D}{kT}}$$

Τότε παρατηρούμε ότι με την μείωση της θερμοκρασίας και την αύξηση της τάσης (αν και δεν θα ίσχυε η προσέγγιση για αρκετά μεγάλη εφαρμοζόμενη τάση) η συγκέντρωση των φορέων μειονότητας έχουν εκθετική άνοδο και στις δυο περιοχές.

Η λύση της μονοδιάστατης εξίσωσης διάχυσης για τους φορείς μας δίνει μια σχέση των φορέων μειονότητας σε συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο της επαφής:

$$p_n = p_{n0} + p_{p0} \left(e^{\frac{eV_D}{kT}} - 1 \right) e^{-\frac{(x-x_n)}{L_p}}$$

$$n_p = n_{p0} + n_{p0} \left(e^{\frac{eV_D}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{(x+x_n)}{L_n}}$$

Εφαρμόζοντας τις τελευταίες στη σχέση του ρεύματος διάχυσης ($J_n = eD_n \frac{dn_p}{dx}$ και $J_p = -eD_p \frac{dp_n}{dx}$) που δημιουργούν οι φορείς μειονότητας:

$$J_p = \frac{eD_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{\frac{eV_D}{kT}} - 1 \right) e^{-\frac{(x-x_n)}{L_p}}$$

$$J_n = \frac{eD_n}{L_p} n_{p0} \left(e^{\frac{eV_D}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{(x+x_n)}{L_n}}$$

Στην περιοχή απογύμνωσης το ολικό ρεύμα δεν αλλάζει αφού όσες επανασυνδέσεις ηλεκτρονίων υπάρχουν στη n μεριά τόσες επανασυνδέσεις οπών υπάρχουν στην p μεριά (stationary) άρα μπορούμε να πούμε ότι το ολικό ρεύμα είναι το άθροισμα των ρευμάτων διάχυσης οπών και ηλεκτρονίων στα άκρα της περιοχής απογύμνωσης.

Έτσι καταλήγουμε σε μια τελική μορφή για το ρεύμα:

$$I = A \left(\frac{eD_p}{L_p} p_{n0} + \frac{eD_n}{L_p} n_{p0} \right) \left(e^{\frac{eV_D}{kT}} - 1 \right)$$

Όπου:

- A: Επιφάνεια διατομής της επαφής



- $I_0 = A \left(\frac{eD_p}{L_p} p_{n0} + \frac{eD_n}{L_n} n_{p0} \right)$: ρεύμα κόρου

Σε μια πραγματική επαφή pn τα πραγματικά δεδομένα που συλλέγουμε περιγράφονται από την σχέση:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV_D}{\eta kT}} - 1 \right) \rightarrow \ln(I) = \ln(I_0) + \ln \left(e^{\frac{eV_D}{\eta kT}} - 1 \right) \quad (6)$$

Όπου:

- η : Συντελεστής ιδανικότητας του οποίου η τιμή εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση.

Λύνοντας την (6) ως προς τον συντελεστή ιδανικότητας:

$$\eta = \frac{kT}{eV_D} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \quad (7)$$

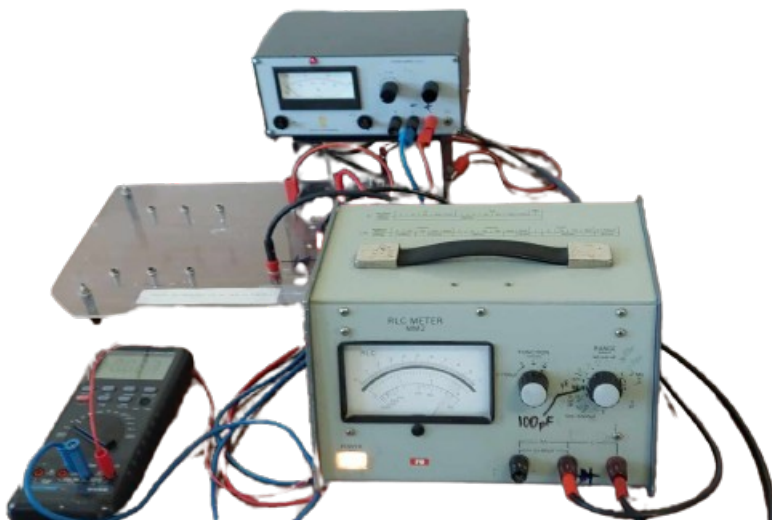
2 Πειραματική Διαδικασία.

2.1 Πειραματική Διάταξη

Χρησιμοποιούνται διάφορα όργανα για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών της διόδου.

Πρώτη Διαδικασία: Χαρακτηριστική Καμπύλη $I(V_D)$ Ορθά Πολωμένης Διόδου

1. Πηγή Τάσης/Ρεύματος: Παρέχει τη μεταβλητή τάση ή ρεύμα στο κύκλωμα.
2. Αμπερόμετρο: Μετρά το ρεύμα που διέρχεται από τη δίοδο.
3. Βολτόμετρο: Μετρά την τάση που εφαρμόζεται στη δίοδο.
4. Αντίσταση: Χρησιμοποιείται για τον περιορισμό του ρεύματος στο κύκλωμα.



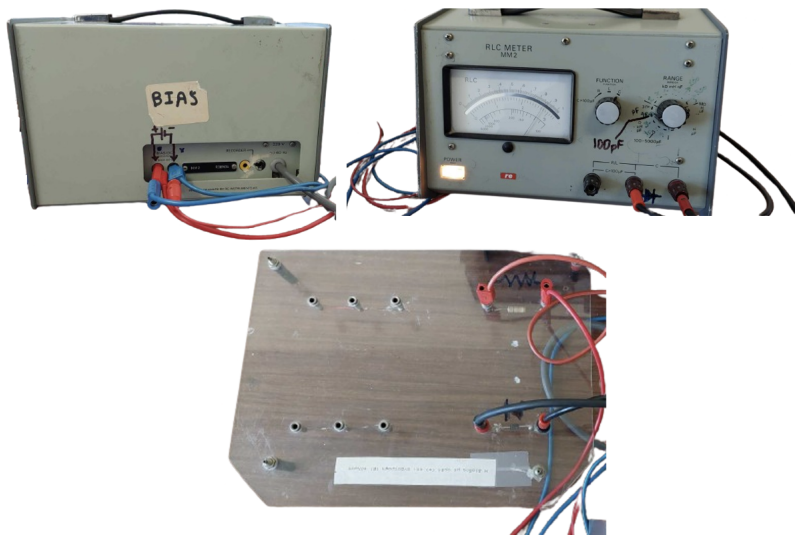
Εικόνα 4. Η διάταξη των οργάνων του πρώτου πειράματος.

Δεύτερη Διαδικασία: Χωρητικά Φαινόμενα σε Δίοδο Πολωμένη Ανάστροφα

1. Γέφυρα Χωρητικότητας: Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χωρητικότητας στο κύκλωμα.



2. Πηγή Συνεχούς Τάσης: Παρέχει την ανάστροφη τάση πόλωσης στη διόδο.
3. Αντίσταση: Χρησιμοποιείται για τον περιορισμό του ρεύματος και την προστασία της διόδου.
4. Μετρητής LCR: Μετρά τη χωρητικότητα, την επαγωγικότητα και την αντίσταση στο κύκλωμα σε συχνότητες της τάξης των kHz.



Εικόνα 5. Η διάταξη των οργάνων του δεύτερου πειράματος.

Τα όργανα στις δύο διαδικασίες είναι σχεδιασμένα για να μετρούν διαφορετικά χαρακτηριστικά της διόδου, με την πρώτη να επικεντρώνεται στην ορθή πόλωση και την αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης, ενώ η δεύτερη επικεντρώνεται στη μέτρηση της χωρητικότητας υπό ανάστροφη πόλωση.

2.2 Διάταξη κυκλώματος.

Το κύκλωμα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα είναι ένα απλό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης $I(V_D)$ μιας διόδου επαφής p-n, υπό ορθή πόλωση.

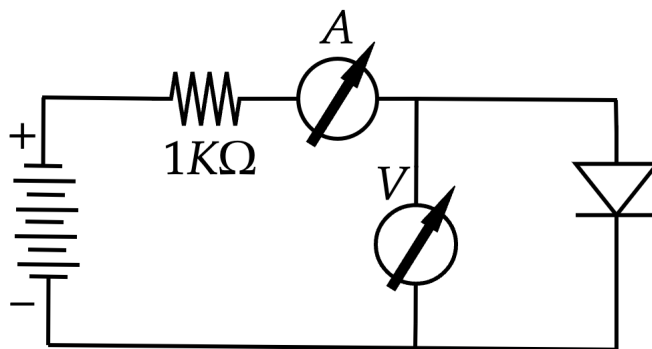
Περιγραφή του κυκλώματος:

1. Πηγή Τάσης: Υπάρχει μια πηγή τάσης η οποία παρέχει τη μεταβλητή τάση στο κύκλωμα.
2. Προστατευτική Αντίσταση: Μια αντίσταση $1k\Omega$ συνδέεται σε σειρά με τη διόδο. Η αντίσταση αυτή χρησιμοποιείται για τον περιορισμό του ρεύματος μέσω της διόδου, προστατεύοντας έτσι τη διόδο από υπερβολικό ρεύμα.
3. Δίοδος: Η διόδος που μελετάται είναι συνδεδεμένη σε σειρά με την αντίσταση. Το άκρο της ανόδου (A) είναι συνδεδεμένο με την αντίσταση και το άκρο της καθόδου (K) είναι συνδεδεμένο με το αρνητικό δυναμικό της πηγής.
4. Αμπερόμετρο: Το αμπερόμετρο είναι συνδεδεμένο σε σειρά με τη διόδο για τη μέτρηση του ρεύματος I που διέρχεται από τη διόδο.
5. Βολτόμετρο: Το βολτόμετρο είναι συνδεδεμένο παράλληλα με τη διόδο για τη μέτρηση της τάσης V_D που εφαρμόζεται στη διόδο.



Διαδικασία: Αυτό το κύκλωμα χρησιμοποιείται για την καταγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης $I(V_D)$ και την ανάλυση της λειτουργίας της διόδου υπό διαφορετικές τάσεις και ρεύματα.

1. Ρύθμιση Αρχικών Παραμέτρων: Τοποθετούμε τον μεταγωγέα αρχικά στη λειτουργία “CURRENT” και ρυθμίζουμε μια σταθερή τιμή. Στη συνέχεια, θέτουμε τον μεταγωγέα στη λειτουργία “VOLTAGE” όπου παραμένει για τη διάρκεια των πειραμάτων.
2. Συνδεσμολογία: Η έξοδος θετικής τάσης του τροφοδοτικού, αφού παρεμβληθεί προστατευτική αντίσταση, συνδέεται στην είσοδο θετικού δυναμικού του αμπερόμετρου. Το άλλο άκρο της διόδου συνδέεται στο αρνητικό δυναμικό (GND).
3. Μετρήσεις: Μεταβάλλουμε την τάση τροφοδοσίας για τις τιμές που καλύπτουν διάφορες κλίμακες μεγέθους (από μA έως 15 mA) και καταγράφουμε τις ενδείξεις του βολτόμετρου V_D και του αμπερόμετρου I .



Εικόνα 6. Η συνδεσμολογία του κυκλώματος του πρώτου πειράματος.

Το κύκλωμα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χωρητικότητας μιας διόδου υπό ανάστροφη πόλωση, για να καταγράψουμε τη χαρακτηριστική χωρητικότητα $C(V_R)$ στην περιοχή αποσβέσεως.

Περιγραφή του κυκλώματος:

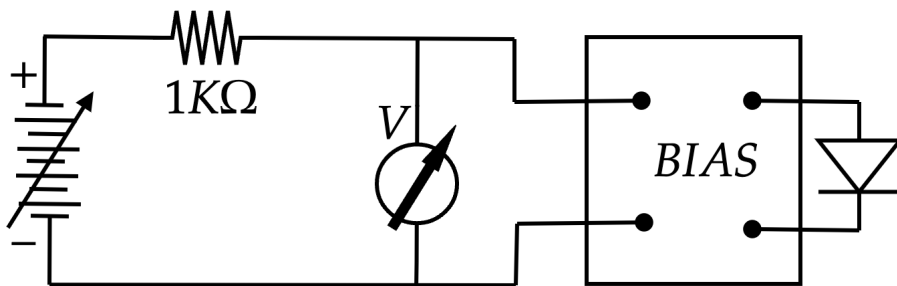
1. Γέφυρα Χωρητικότητας: Χρησιμοποιείται για την ακριβή μέτρηση της χωρητικότητας C_x στο κύκλωμα. Παρέχει τις ενδείξεις που είναι απαραίτητες για τη μέτρηση της χωρητικότητας της διόδου.
2. Πηγή Συνεχούς Τάσης: Χρησιμοποιείται για να εφαρμοστεί η τάση πόλωσης V_R στη δίοδο. Η τάση αυτή ρυθμίζεται για να καλύψει το φάσμα τιμών που είναι απαραίτητο για τις μετρήσεις.
3. Αντίσταση: Μια αντίσταση $1k\Omega$ συνδέεται σε σειρά με τη δίοδο για να περιορίσει το ρεύμα και να προστατεύσει τη δίοδο κατά τη διάρκεια της μέτρησης.
4. Δίοδος: Η δίοδος είναι το στοιχείο του κυκλώματος που μελετάται και είναι συνδεδεμένη με το σύστημα μέτρησης χωρητικότητας και την πηγή συνεχούς τάσης.
5. Μετρητής LCR : Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χωρητικότητας, της επαγωγικότητας και της αντίστασης στο κύκλωμα σε συχνότητες της τάξης των kHz.

Διαδικασία:



1. Συνδεσμολογία: Η διόδος συνδέεται στη γέφυρα χωρητικότητας και το κύκλωμα ρυθμίζεται για την εφαρμογή της ανάστροφης τάσης πόλωσης V_R .
2. Μέτρηση Χωρητικότητας C_x : Αρχικά μετράμε την χωρητικότητα του συστήματος χωρίς τη διόδο C_x και καταγράφουμε την τιμή.
3. Εφαρμογή Τάσης Πόλωσης V_R : Συνδέουμε τη διόδο και εφαρμόζουμε την ανάστροφη τάση πόλωσης V_R . Οι μετρήσεις χωρητικότητας καταγράφονται για διάφορες τιμές της ανάστροφης τάσης, από 0-1 V ανά 50 mV και από 1-10 V ανά 0.5 V.
4. Υπολογισμός Χωρητικότητας Διόδου C_{diode} : Μετράμε την συνολική χωρητικότητα του συστήματος C_{tot} και αφαιρούμε την αρχική χωρητικότητα C_x για να προσδιορίσουμε τη χωρητικότητα της διόδου $C_{diode} = C_{tot} - C_x$.

Το σχήμα παρουσιάζει το κύκλωμα με ανάστροφα πολωμένη διόδο για τη μέτρηση της χωρητικότητας στην περιοχή αποσβέσεως. Περιλαμβάνει τη διόδο, την αντίσταση, την πηγή συνεχούς τάσης για το BIAS και τη γέφυρα χωρητικότητας. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την ανάλυση της συμπεριφοράς της διόδου υπό ανάστροφη πόλωση και την καταγραφή των χαρακτηριστικών της χωρητικότητας σε σχέση με την ανάστροφη τάση.



Εικόνα 7. Η συνδεσμολογία αντίστροφα πολωμένης διόδου για προσμέτρηση χωρητικότητας.



3 Πειραματικά αποτελέσματα.

3.1 Δεδομένα πρώτου πειράματος.

Οι τιμές που καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία από το αμπερόμετρο και το βολτόμετρο δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Δεξιά από τα κελιά του Πίνακα 1 αναγράφεται η κλίμακα που χρησιμοποιήσαμε στο αμπερόμετρο και το σφάλμα της. Συγκεκριμένα από τις τιμές 1-8 είχαμε το αμπερόμετρο στην ρύθμιση (κλίμακα) 2mA και στις τιμές 9-19 είχαμε το αμπερόμετρο στην ρύθμιση (κλίμακα) 20mA. Για αυτό τον λόγο στην μετέπειτα ανάλυση των δεδομένων θα χωρίσουμε την επεξεργασία σε δυο μέρη εφόσον δεν έχουν την ίδια ακρίβεια

Πείραμα 2	
$V_R(V)$	$C(pF)$
0,042	80
0,078	71
0,112	66
0,158	62
0,238	57
0,315	55
0,401	52
0,493	50
0,644	47
0,722	46
1,062	42
1,45	39
1,73	37
2,24	34
2,84	32
3,93	29
4,49	28
4,91	27
5,78	26
7,08	25
7,83	25
8,86	24
10,62	23
11,65	22

Πίνακας 1. Μετρήσεις του βολτμέτρου και του αμπερομέτρου καθώς μεταβάλλουμε την τάση τροφοδοσίας.

3.2 Δεδομένα δεύτερου πειράματος.

Εδώ θέλουμε τα δεδομένα για την χωρητικότητα της επαφής. Η χωρητικότητα δεν προσμετράται άμεσα από κάποιο όργανο αλλά μέσω της εναλλασσόμενης τάσης μετράμε την εμπίδηση ($\sim 1/C$) και μέσω αυτής η γέφυρα LCR μας δίνει την χωρητικότητα. Οι μετρήσεις του βολτομέτρου και της γέφυρας χωρητικότητας είναι καταγεγραμμένες στον πιο κάτω πίνακα:



Πείραμα 1	
$V_D(V)$	$I(mA)$
0,343	0,003
0,371	0,007
0,436	0,049
0,470	0,117
0,498	0,234
0,541	0,620
0,565	1,062
0,580	1,468
0,600	2,24
0,610	2,81
0,620	3,50
0,630	4,34
0,639	5,42
0,650	6,42
0,655	8,31
0,660	8,85
0,670	10,71
0,680	13,40
0,686	15,80

Πίνακας 2. Μετρήσεις του βολτμέτρου και του BIAS καθώς μεταβάλλουμε την τάση τροφοδοσίας.

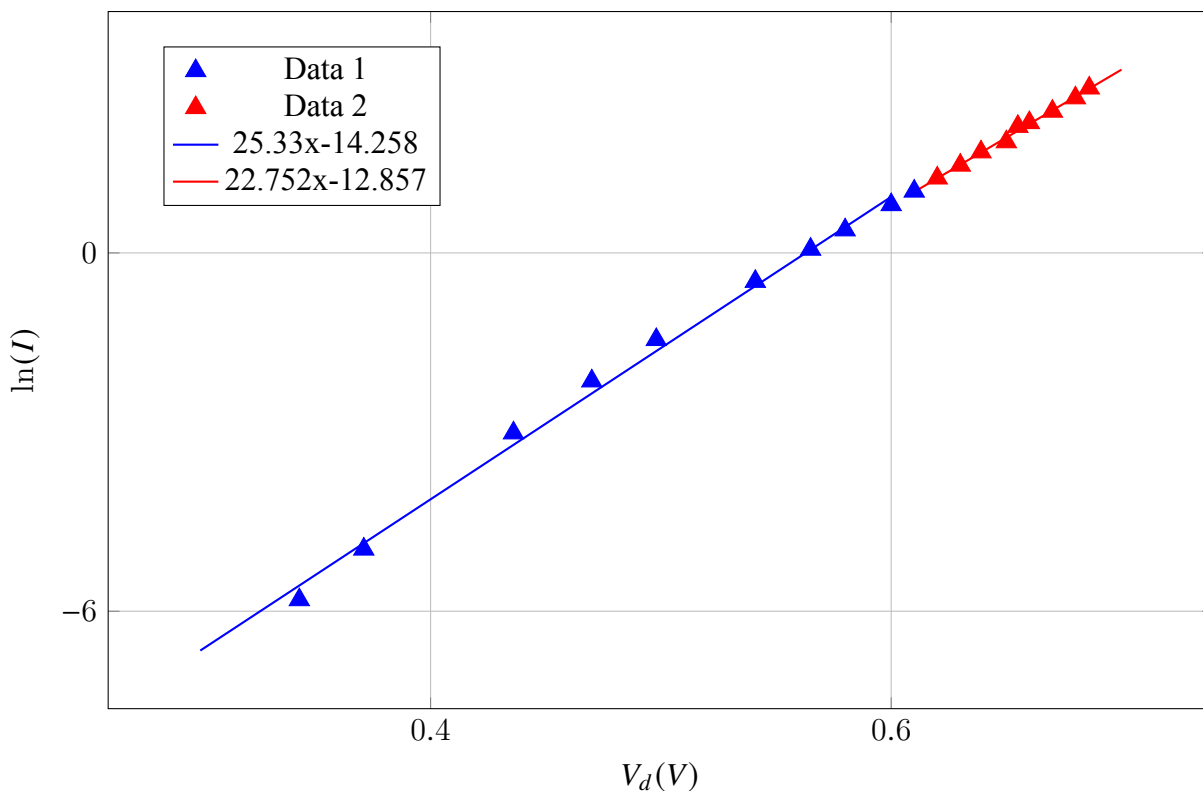
Αφού μετρήσαμε την χωρητικότητα των καλωδίων $C_\pi = 7pF$. Όπως και προηγουμένως μεταβάλλουμε την τάση τροφοδοσίας και παίρνουμε την συνολική χωρητικότητα του κυκλώματος (καλώδια και δίοδος). Σημειώνουμε ότι η επιφάνεια διατομής της διόδου έχει εμβαδόν $= 0,1mm^2$ και η διηλεκτρική σταθερά της είναι $\epsilon_s = 1.1pF/cm$.



4 Ανάλυση πειράματος

4.1 Πείραμα 1.

Στην ορθή πόλωση είδαμε και θεωρητικά από την εξίσωση (6) όπως και πειραματικά από τον Πίνακα 1. Το ρεύμα σε σχέση με την τάση V_D έχει μια εκθετική μορφή, εμείς απεικονίζουμε γραφικά στο Σχήμα 7. την συνάρτηση $\ln(I(V_D))$ μέσω των δεδομένων του πίνακα 1, μέσω της κλίσης της και από την εξίσωση (7) θα υπολογίσουμε τον συντελεστή ιδανικότητας η .



Γράφημα 1. Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης $\ln(I(V_D))$ με τα δεδομένα του Πίνακα 1 και γραμμική αναπαράσταση της συνάρτησης για κλίμακες του αμπερομέτρου 2mA και 20mA.

Όπως είπαμε και στην πειραματική διαδικασία θα φτιάξουμε δυο καμπύλες οι οποίες θα αναπαριστούν την $\ln(I(V_D))$, μια για κάθε κλίμακα. Δεν θα κάνουμε μια γραμμική προσέγγιση αφού δεν ξέρουμε ποσοτική διαφορά των I και I_0 , έτσι πήραμε μια προσέγγιση ανάλογη της εξίσωσης (6) δηλαδή:

$$\ln(I) = \ln(e^{A \cdot V_D} - 1) + B$$

Όπου το $A = \frac{e}{\eta k T}$ μας δίνει την πληροφορία που χρειαζόμαστε για να βρούμε την ιδανικότητα, από το Σχήμα 8 παρατηρούμε ότι τα σφάλματα της αναπαράστασης είναι σχεδόν μηδαμινά.

Θέτοντας $\eta = \frac{e}{A k T}$ προκύπτει ότι στην κλίμα των 2mA προκύπτει $\eta \pm \delta\eta = 1,525 \pm 0,008$. Στην κλίμα των 20mA προκύπτει $\eta \pm \delta\eta = 1,698 \pm 0,063$. Η μέση τιμή προκύπτει:

$$\eta_{avg} \pm \delta\eta_{avg} = 1,611377 \pm 0,086397$$

Αυτός ο συντελεστής ιδανικότητας χαρακτηρίζει την 'καθαρότητα' της διόδου και είναι γραμμικά ανάλογος



της εφαρμοζόμενης τάσης. Στους ημιαγωγούς πυριτίου η ιδανικότητα κειμένεται στις τιμές 1-2 επομένως έχουμε μια αρκετά καλή προσέγγιση σε τιμές εφαρμοζόμενης τάσης 300V-700V.

4.2 Πείραμα 2.

Πριν εφαρμόσουμε κάποια τάση υπολογίσαμε την χωρητικότητα χωρίς πόλωση και έτσι μπορούμε να βρούμε την αρχική τιμή της περιοχής απογύμνωσης $w(V_R = 0)$ η οποία δίνεται από την εξίσωση (4).

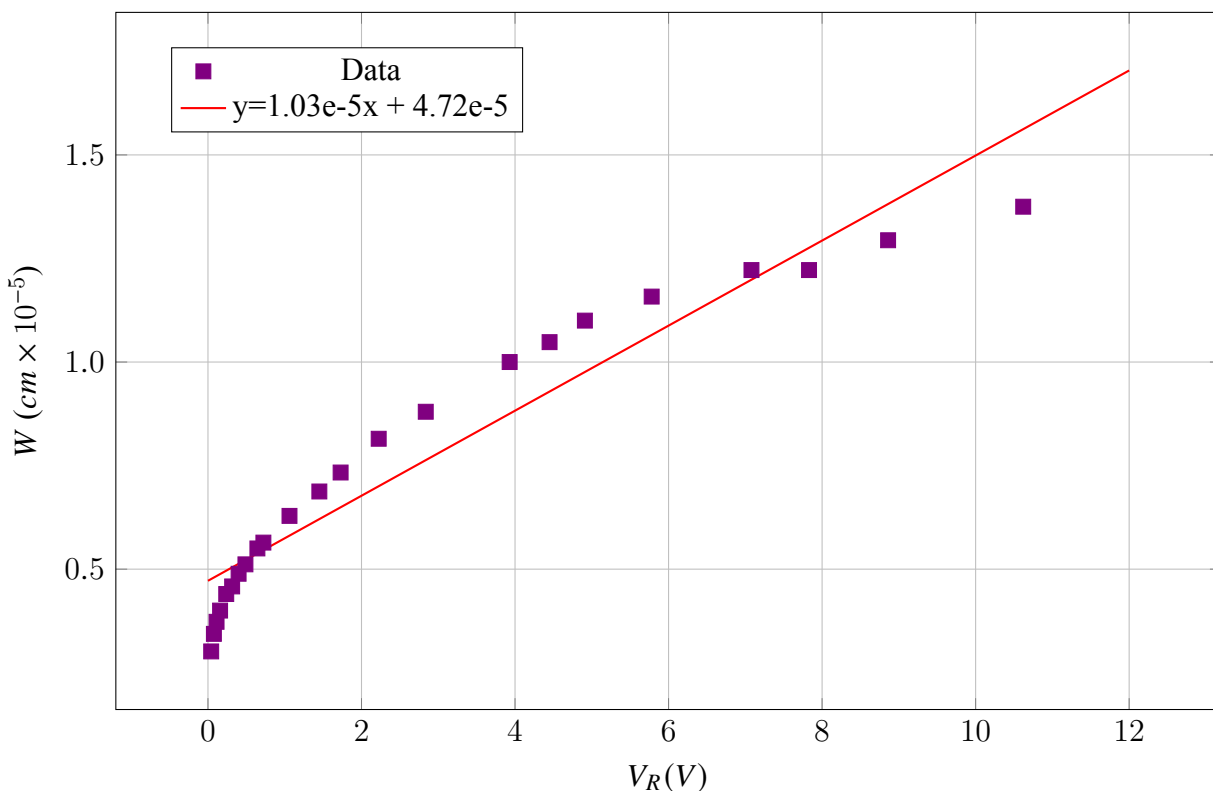
$$w_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} V_{bi} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = A \frac{\epsilon_s}{C} = 0,1 \text{mm}^2 \quad 1,11 \text{pF/cm} \quad \frac{7 \text{pF}}{\text{cm}} = 1,6 \times 10^{-4} \text{cm}$$

Άρα

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} V_{bi} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = 2,5 \times 10^{-8} \text{cm}^2$$

Έτσι για την $w(V_R)$ αντιστοιχεί το γράφημα 3, το οποίο έχει μια μορφή αντίστροφης ρίζας ($w \sim V_R^{-\frac{1}{2}}$).

$$w(V_R) = \frac{1,2 \text{pF/cm}}{C \sqrt{V_R}}$$



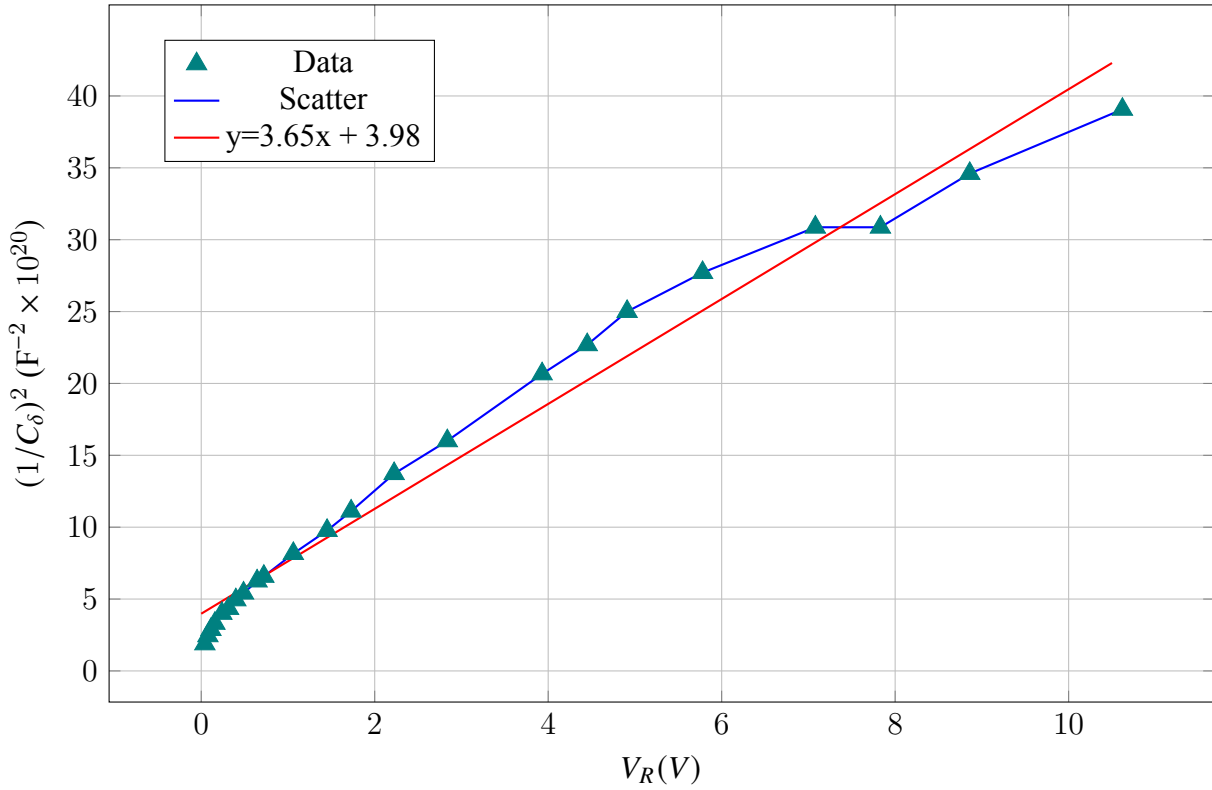
Γράφημα 2. Της ποσότητας $w(V_R)$. Η γραμμική προσέγγιση γίνεται σε όλο το φάσμα.

Για να μπορέσουμε να εντοπίσουμε το δυναμικό που δημιουργείται πριν εφαρμόσουμε την εξωτερική τάση θα πρέπει εμείς να κάνουμε μια γραμμική προσέγγιση της $\frac{1}{C^2(V_R)}$ ως $mx+b$ από τα δεδομένα του πίνακα 2 και μέσω της παραγώγου της η κλίση της γραμμικής προσέγγισης m θα αντιστοιχεί στον όρο $\frac{w_0^2}{A^4 \epsilon_s^2 V_{bi}} [1/(\text{pF}^2 \cdot \text{V})]$



$$\frac{\partial \left(\frac{1}{C^2(V_R)} \right)}{\partial V_R} = \frac{\partial \left(\frac{2}{A^2 \epsilon_s e} (V_{bi} + V_R) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right)}{\partial V_R} = \frac{w_0^2}{A^4 \epsilon_s^2 V_{bi}}$$

Από τη γραφική παράσταση μπορούμε να εκτιμήσουμε ότι το εύρος είναι περίπου $W \approx 3 \cdot 10^5 \text{ cm}$.



Γράφημα 3. Απεικόνιση της $1/C^2(V_R)$ σε όλο το φάσμα της μετρούμενης V_R .

Στην πραγματικότητα δεν εμφανίζεται όμως απόλυτα γραμμική απεικόνιση, πιο συγκεκριμένα για μικρές τάσεις έχουμε μια μείωση της κλίσης της $1/C^2$.

Έτσι για την συγκεκριμένη κλίση εντοπίζουμε την τάση που δημιουργεί η επαφή:

$$V_{bi} = \frac{w_0^2}{A^4 \epsilon_s^2 m} = \frac{2.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2}{(0.01 \text{ cm})^4 \times (1.1 \text{ pF/cm})^2 \times \left(3.649 \frac{1}{\text{pF}^2 \text{ V}} \right)} \approx 0.566 \text{ V}$$

Έτσι το φράγμα δυναμικού θα είναι:

$$eV_{bi} = 0,57 \text{ eV} = 9.072 \times 10^{-20} \text{ J}$$

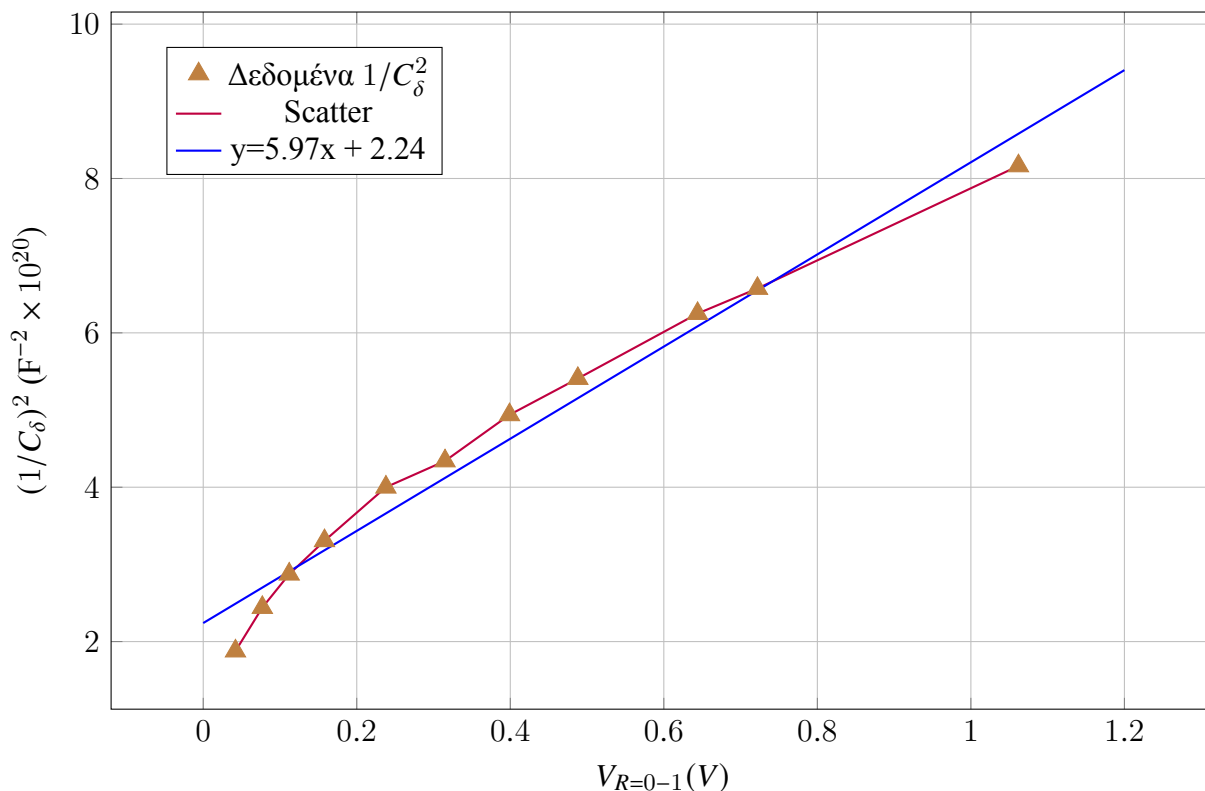
Στην αρχή της άσκησης είχαμε πει ότι ο p-type ημιαγωγός έχει πολύ περισσότερες προσμίξεις από τον n-type έτσι $N_A \gg N_D$. Δηλαδή μπορούμε να πούμε ότι:

$$\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} = \frac{1}{N_B} \approx \frac{1}{N_D}$$

Γνωρίζοντας όλες τις επιθυμητές ποσότητες μπορούμε να βρούμε το N_B :



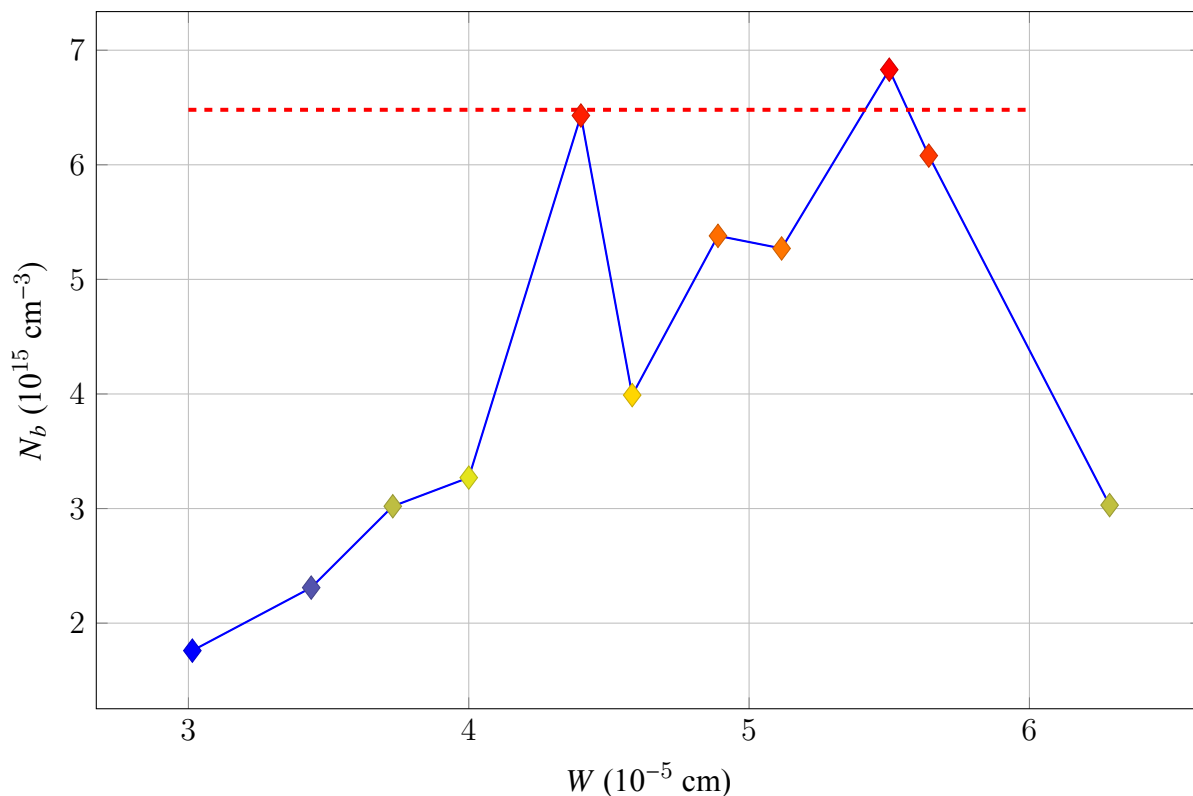
$$N_B = \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{ew_0^2} = 7,78 \times 10^{15} \text{ άτομα/cm}^2$$



Γράφημα 4. Γραφική απεικόνιση της $1/C^2(V_R)$ για τιμές στο διάστημα $0 < V_R < 1$.

Σε αυτήν την περιοχή ο αριθμός των φορέων (μειονότητας) έχει μια φθίνουσα πορεία πράγμα λογικό αφού είναι ανάλογοι της εφαρμοζόμενης τάσης και αντιστρόφως ανάλογοι του πλάτους της περιοχής απογύμνωσης.

Τα σφάλματα στα γραφήματα είναι του μεγέθους του σημείου, οπότε δεν απεικονίζονται εδώ. Το σφάλμα της καμπύλης προκύπτει από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Το πείραμα έχει μετρήσεις αρκετά καλής ακρίβειας και τα σφάλματα των τιμών οφείλονται κυρίως σε σφάλματα ανάγνωσης που απορροφώνται κατά τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η βασική αιτία απόκλισης από τα θεωρητικά αναμενόμενα είναι η θέρμανση της αντίστασης λόγω της τάσης.



Γράφημα 5. Της ποσότητας $N_b(W)$ στην προσέγγιση περί σταθερού N στην περιοχή απογύμνωσης.

Βλέπουμε μια διακύμανση γύρω από τη θεωρητική τιμή. Η προσέγγιση περί σταθερού N στην περιοχή απογύμνωσης δεν είναι απόλυτα σωστή. Όλοι οι τύποι που βγάλαμε στηρίζονται στο ότι δεν υπάρχει γένεση και επανασύνδεση φορέων.

4.3 Ερώτημα

Δύο υλικά με διαφορετικές ηλεκτρικές αγωγιμότητες, έρχονται σε επαφή (όπως, ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο σε επαφή με έναν ηλεκτρολύτη ή ένα πορώδες υλικό το οποίο φιλοξενεί νερό στις εσωτερικές επιφάνειές του). Ποια στοιχεία της παρούσας άσκησης θα μπορούσατε να χρησιμοποιήσετε και υπό ποιές συνθήκες ώστε να ερμηνεύσετε την κατανομή φορτίων εκατέρωθεν της διεπιφάνειας;

Απάντηση: Όταν δύο υλικά με διαφορετικές ηλεκτρικές αγωγιμότητες έρχονται σε επαφή, δημιουργείται μια περιοχή απογύμνωσης, παρόμοια με αυτή που παρατηρείται στις επαφές ημιαγωγών (p-n junctions) ή στις επιφάνειες μετάλλων και ηλεκτρολυτών. Το φαινόμενο αυτό βασίζεται στη διαφορά των χημικών δυναμικών ή επιπέδων Fermi των δύο υλικών. Θα έχουμε δημιουργία μιας περιοχής απογύμνωσης λόγω διάχυσης, όπου ηλεκτρόνια θα φεύγουν το υλικό με την μεγάλη αγωγιμότητα (με τα περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια) προς το υλικό με τα λιγότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί μια διαφορά φορτίου, το οποίο με την σειρά του δημιουργεί ένα πεδίο αντίθετο προς την διάχυση, η διαδικασία αυτή θα συνεχίσει μέχρι να υπάρχει μια σταθερή ροή σωματιδίων.

Συνθήκες για την Κατανομή Φορτίων:

1. Η κατανομή φορτίων εκατέρωθεν της διεπιφάνειας εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η συγκέντρωση των ελεύθερων φορέων και οι κινητικότητες αυτών.



2. Η θερμοκρασία μπορεί επίσης να επηρεάσει την κατανομή φορτίων, καθώς αυξάνει τη θερμική ενέργεια των ηλεκτρονίων και μπορεί να εντείνει τη διάχυση.
3. Αν τα υλικά είναι διαφορετικού τύπου (π.χ., μέταλλο και ημιαγωγός ή μέταλλο και ηλεκτρολύτης), οι επιπλέον μηχανισμοί όπως η διηλεκτρική σταθερά και οι επιφανειακές καταστάσεις παίζουν σημαντικό ρόλο.

4.4 Συμπεράσματα, σφάλματα και περιθώρια βελτίωσης.

Το πείραμα που πραγματοποιήσαμε δεν παρουσίασε σημαντικά σφάλματα και η διεξαγωγή του ήταν σχετικά απλή. Ωστόσο, ένα ζήτημα που εντοπίστηκε είναι η μη μέτρηση της παραμέτρου της θερμοκρασίας. Για αυτόν τον λόγο, η διαδικασία πρέπει να εκτελεστεί γρήγορα ώστε η διόδος να μην προλάβει να θερμανθεί.

Καθ' όλη τη διάρκεια της άσκησης, θεωρήσαμε ότι η θερμοκρασία ήταν σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι ακριβής και επηρεάζει τις μετρήσεις μας, καθώς η εφαρμοζόμενη τάση προκαλεί θέρμανση της διόδου. Η αύξηση της θερμοκρασίας ενεργοποιεί ηλεκτρόνια εντός του ημιαγωγού, τα οποία μεταπηδούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, μεταβάλλοντας την αγωγιμότητα της διόδου. Αυτή η αλλαγή επηρεάζει τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού κατά τη διάρκεια του πειράματος, γεγονός που ενδεχομένως εξηγεί τη μείωση του αριθμού των προσμίξεων που μετρήθηκαν στο δεύτερο πείραμα.

Για την πληρότητα της αναφοράς, επισημαίνουμε ότι τα σφάλματα υπολογίστηκαν με τη μέθοδο διάδοσης σφάλματος, όπου ως σφάλματα λήφθηκαν το μισό του τελευταίου δεκαδικού της ακρίβειας των οργάνων, καθώς και τα σφάλματα που προκύπτουν από τις κλίσεις στα διαγράμματα.



5 Βιβλιογραφία.

5.1 Βιβλιογραφία.

- [Bλ1] Εργαστηριακός Οδηγός Κατεύθυνσης Φυσικής Συμπυκνωμένης ύλης 2020.
- [Bλ2] Εισαγωγή στη φυσική στερεάς κατάστασης. Kittel. Έκδοση 5, Πνευματικός.
- [Bλ3] Φυσική στερεάς κατάστασης, Ashcroft, Mermin, Πνευματικός.
- [Bλ4] Φυσική στερεάς κατάστασης, Ibach Harald, Lüch Hans, ZHTH.
- [Bλ5] Φυσική στερεάς κατάστασης, Ε.Ν. Οικονόμου, ΠΕΚ.
- [Bλ6] Φυσική στερεάς κατάστασης, Philip Hofmann, Παπαζήση.
- [Bλ7] Οπτοηλεκτρονική, Jasprit Singh, Τζιόλα.

5.2 Αναφορές.

- [1] Οδηγίες για το Πείραμα 1β του νέου εργαστηριακού φυλλαδίου.
- [2] p-n junction, άρθρο Wikipedia.
- [3] W. Shockley, "The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors," in The Bell System Technical Journal, vol. 28, no. 3, pp. 435-489, July 1949.
- [4] M. Riordan and L. Hoddeson, "The origins of the pn junction," in IEEE Spectrum, vol. 34, no. 6, pp. 46-51, June 1997.

5.3 Μετρήσεις-Δεδομένα.

- [Data-1]: Πρώτο σετ μετρήσεων set1.txt
- [Data-2]: Δεύτερο σετ μετρήσεων set2.txt

