



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**Μελέτη Ηλεκτρικών Χαρακτηριστικών
Φωτοβολταϊκών Στοιχείων Μικροκρυσταλλικού
Πυριτίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σωτηρία Σ. Πεπέ

Επιβλέπων: Τσουκαλάς Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα
Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Μελέτη Ηλεκτρικών Χαρακτηριστικών
Φωτοβολταϊκών Στοιχείων Μικροκρυσταλλικού
Πυριτίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σωτηρία Σ. Πεπέ

Επιβλέπων: Τσουκαλάς Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Ιουλίου 2012

.....
Τσουκαλάς Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ράπτης Ιωάννης
Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Τσέτσερης Λεωνίδας
Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα

Ιούλιος 2012

Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν πειραματικά και θεωρητικά, φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) και μικροκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si). Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν σε εργαστηριακό χώρο, συνθήκες κενού και για μεταβλητή θερμοκρασία για όλα τα δείγματα μας. Βάσει των ηλεκτρικών μετρήσεων εξήχθησαν συμπεράσματα για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των στοιχείων αυτών που στο σκοτάδι λειτουργούν σαν απλοί δίοδοι επαφής. Στο θεωρητικό μέρος, παρουσιάστηκαν οι αρχές λειτουργίας και τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της διόδου επαφής αλλά και των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στην ιστορική εξέλιξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών και στα χαρακτηριστικά του ήλιου. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι ημιαγωγοί, η δίοδος p-n και οι αρχές λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Στο τρίτο και το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι τεχνολογίες λεπτών υμενίων και η θεωρία για το περιορισμένο ρεύμα λόγω φορτίων χώρου (space charge limited current-SCLC). Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά το πειραματικό μέρος όπου περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά.

Λέξεις Κλειδιά

ήλιος, φάσμα, δίοδος p-n, φωτοβολταϊκό στοιχείο, ημιαγωγοί προσμίξεων, φωτόρευμα, τεχνολογία λεπτών υμενίων, μορφές πυριτίου, ρεύμα περιορισμένο από φορτία χώρου-SCLC, κινητικότητα φορέων, παγίδες σε ημιαγωγό, νόμος Mott-Gurney

Abstract

This diploma thesis involves experimental and theoretical study of amorphous (a-Si) and microcrystalline Silicon (mc-Si). The experiments were conducted in laboratory room, under vacuum conditions and variable temperature for all our samples. Based on the data collected, conclusions were made about the electrical properties of such samples. These samples under dark conditions operate as ordinary p-n diodes. On the theoretical level, the principles of operation and the electrical characteristics of amorphous and microcrystalline silicon solar cells were presented.

More specifically, the first chapter discusses the historical evolution of photovoltaic technology and the sun's characteristics. The semiconductors, the p-n diode and the characteristics of solar cells are analyzed in chapter two. The technologies of thin film solar cells are described in chapter three while in four the SCLC theory is represented. The fifth chapter regards the experimental part, where the methodology used is described, the results and the conclusions based on them.

Key Words

sun, spectrum, p-n diode, solar cell, doping semiconductors, photocurrent, thin film technology, types of silicon, space charge limited current-SCLC, carrier mobility, traps in semiconductor, Mott-Gurney law

Copyright © Σωτηρία Σ. Πεπέ, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 ΗΛΙΟΣ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	1
1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	5
1.3 ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	10
1.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	10
2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	13
2.2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ	14
2.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΟΠΕΣ	17
2.2.2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ	19
2.2.3 Η ΔΙΟΔΟΣ p-n	24
2.2.4 ΔΙΟΔΟΣ p-i-n	34
2.2.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ	37
2.2.6 ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΒΑΘΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ (ΠΑΓΙΔΕΣ)	39
2.3 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	42
2.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	45
2.4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ	48
2.5 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	50
3.1 ΛΕΠΤΑ ΥΜΕΝΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	55
3.2 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ	59
3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ	60
4.1 Η SCLC ΘΕΩΡΙΑ	62
4.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	67
4.2.1 ΤΕΛΕΙΟΣ ΜΟΝΩΤΗΣ	67
4.2.2 ΜΟΝΩΤΗΣ/ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΣ ΠΑΓΙΔΩΝ ΑΛΛΑ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ	68
4.2.3 ΜΟΝΩΤΗΣ/ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥΣ ΚΑΙ ΠΑΓΙΔΕΥΜΕΝΟΥΣ ΦΟΡΕΙΣ	69
4.2.4 ΜΟΝΩΤΗΣ/ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΡΗΧΕΣ ΠΑΓΙΔΕΣ	70
4.2.5 ΜΟΝΩΤΗΣ/ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΒΑΘΙΕΣ ΠΑΓΙΔΕΣ	72

4.3 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΘΕΩΡΙΑ SCLC	73
4.3.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ.....	75
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	76
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	76
5.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	77
5.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	79
5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	84
5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	89
6.1 Sentaurus Synopsys	91
6.2 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ SENTAURUS DEVICE	94
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	98
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	99
Βιβλιογραφία	100
Ιστογραφία.....	102

«Η συναίσθηση της άγνοιας είναι μεγάλο βήμα προς τη γνώση»

Benjamin Disraeli

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανατέθηκε προς εκπόνηση το ακαδημαϊκό έτος 2011-2012.

Το πειραματικό της κομμάτι υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού του κτιρίου Φυσικής της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του ΕΜΠ ,στον χώρο της πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.

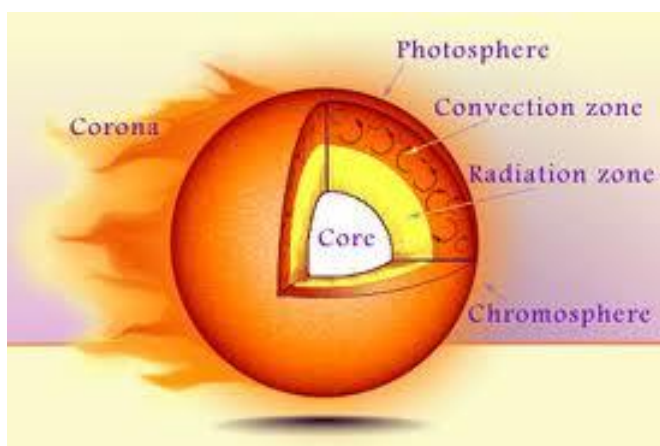
Νιώθω υποχρέωση μου να ευχαριστήσω τον καθηγητή του ΕΜΠ κ. Δημήτρη Τσουκαλά για την εμπιστοσύνη και την ανάθεση της ερευνητικής αυτής μελέτης ,την πολύτιμη καθοδήγηση και την άριστη συνεργασία καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την μεταδιδακτορική ερευνήτρια του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος Δρ. Δέσποινα Μόσχου για την απλόχερη βοήθεια και τον χρόνο που διέθεσε οποτεδήποτε την χρειάστηκα και τον Υποψήφιο Διδάκτορα της σχολής ΣΕΜΦΕ Σπύρο Σταθόπουλο καθώς η συνεχής και επιμελής επίβλεψη του στον χώρο του εργαστηρίου ήταν πολύτιμη. Επιπλέον ευχαριστώ τον Θάνο Παπαδημητρίου για την βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφερε στο μέρος της προσομοίωσης με το πρόγραμμα Sentaurus Synopsys, καθώς και όλο το προσωπικό του εργαστηρίου Ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού για το φιλικό κλίμα και την συμπαράσταση που μου έδειξαν.

Τέλος νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους και ιδιαίτερα την οικογένεια μου για την αγάπη ,την ανεξάντλητη υπομονή και την στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα κουραστικά αλλά και όμορφα χρόνια της φοίτησης μου στην ΣΕΜΦΕ.

Κεφάλαιο 1 : ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 ΗΛΙΟΣ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο Ήλιος αποτελείται από θερμή αέρια ύλη η οποία υπόκειται σε διαρκή πυρηνική σύντηξη. Η διάμετρός του ισούται περίπου με $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του μία φορά ανα τέσσερις εβδομάδες (όπως φαίνεται από τη Γη). Εξαιτίας της μη ομοιόμορφης πυκνότητάς του, ο ισημερινός του περιστρέφεται ανα 27 ημέρες ενώ οι πολικές περιοχές ανα 30 ημέρες. Ο Ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αντιδραστήρας σύντηξης του οποίου τα τοιχώματα αποτελούνται από θερμά αέρια που συγκρατώνται από βαρυτικές δυνάμεις. Ξεκινώντας ως ακτίνες X, στον πυρήνα, ακτινοβολούσες και μεταφορικές διαδικασίες μετατρέπουν την ενέργεια σε μεγαλύτερα μήκη κύματος στην επιφάνεια μέσω, εκπομπής, απορρόφησης και επανακτινοβολίας. Στο εσωτερικό σφαίρας με ακτίνα $0.23R$ (όπου R είναι η ακτίνα του ήλιου) βρίσκεται ο πυρήνας του Ήλιου, ο οποίος περιέχει το 40% της μάζας του και στον οποίο δημιουργείται το 90% της ενέργειάς του. Η θερμοκρασία στον πυρήνα του ισούται με $8-40 \times 10^6 \text{ K}$ και η πυκνότητα του πυρήνα του είναι 80 έως 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Από το $0.23R$ έως το $0.7R$ η θερμοκρασία πέφτει περίπου στους $1.3 \times 10^5 \text{ K}$ και η πυκνότητα μειώνεται φτάνοντας τα 0.07 g/cc . Από το $0,7$ έως το $1R$ βρίσκεται η μεταφορική ζώνη, κατά μήκος της οποίας η θερμοκρασία πέφτει, φτάνοντας στην επιφάνεια περίπου τους 5762 K . Η ανώτερη επιφάνεια της μεταφορικής ζώνης, η φωτόσφαιρα, αποτελεί την πηγή σχεδόν ολόκληρης της ηλιακής ακτινοβολίας. Πάνω από τη φωτόσφαιρα βρίσκεται η επιφάνεια αναστροφής, ακολουθούμενη από τη χρωμόσφαιρα σε ύψος 10000 km και τέλος το ηλιακό στέμμα.



Εικόνα 1.1 Δομή του ήλιου

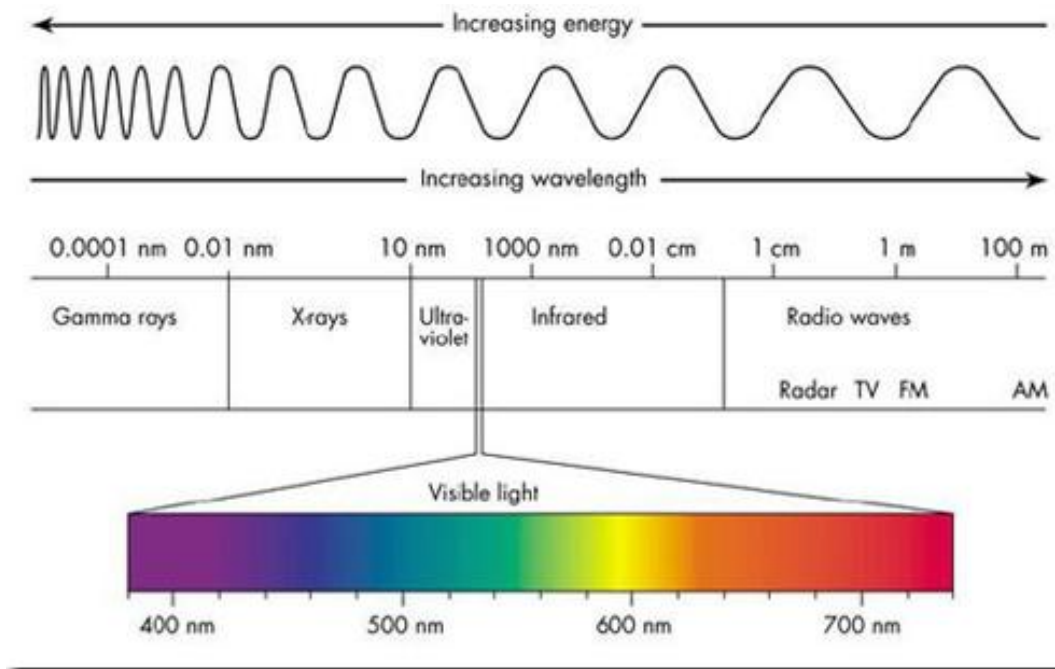
Στο παρελθόν το φως θεωρείτο ότι ήταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτό εξηγούσε με εύστοχο τρόπο πολλά από τα παρατηρούμενα φαινόμενα, όμως άλλα παρέμεναν ανεξήγητα. Στις αρχές του 20ου αιώνα, ο Einstein κατάφερε να εξηγήσει την επίδραση της συχνότητας και της έντασης του φωτός στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εισάγοντας τα κβάντα φωτός. Η προσέγγιση αυτή οδήγησε στην ανακάλυψη του στοιχειώδους σωματιδίου φωτός, του φωτονίου. Αυτό, χαρακτηρίζει τη δυαδική φύση του φωτός που συνιστά ένα κύμα ύλης. Η ενέργεια ενός σωματιδίου φωτός υπολογίζεται ως εξής:

$$E = h * f \quad (1.1.1)$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck ($6.63 \times 10^{-34} \text{ Js} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs}$), f η συχνότητα, $\hbar = h/2\pi$ και ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Το μήκος κύματος σχετίζεται με τη συχνότητα από την εξίσωση:

$$c = \lambda * f \quad (1.1.2)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και λ το μήκος κύματος. Κατά τη μελέτη της ηλιακής ενέργειας, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως στην ενέργεια του φωτός που προσπίπτει στο φ/β στοιχείο. Αυτή ονομάζεται ένταση φωτισμού ή ακτινοβολία, υπολογίζεται ως ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και μετράται σε W/m^2 (εναλλακτικά σε KW/m^2 ή W/cm^2). Το φως καλύπτει ένα ευρύ φάσμα ενεργειών. Ένα σύνολο φωτονίων με διαφορετικές ενέργειες ονομάζεται φάσμα. Η ακτινοβολία σε αυτή την περίπτωση είναι το σύνολο όλων των φασματικών συνεισφορών. Η ενέργεια ενός φωτονίου, μπορεί να εκτιμηθεί από το χρώμα του.



Εικόνα 2.2 Φάσμα ορατού φωτός

Το λευκό φως που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος είναι ένα μείγμα όλων των ενεργειακών καταστάσεων. Κάθε σώμα ακτινοβολεί φως ανάλογα με τη θερμοκρασία του ενώ ο όρος μέλαν σώμα σχετίζεται με έναν τέλει απορροφητή ο οποίος βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον του. Αν ένα σώμα έχει μεγαλύτερη ενέργεια από το περιβάλλον του, τότε προσπαθεί να απαλλαγεί από αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί εκπέμποντας φωτόνια διαφόρων ενεργειακών καταστάσεων, πράγμα που οδηγεί σε μία χαρακτηριστική φασματική ακτινοβολία, την “ακτινοβολία μέλανος σώματος”.

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι η φωτεινή ενέργεια, η θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.



Εικόνα 3.3 Δράσεις περιοχών ηλιακού φάσματος

Καθημερινά ο πλανήτης μας «λούζεται» με ασύλληπτα ποσά ηλιακής ενέργειας. Μέσα σε ένα χρόνο, κάθε τετραγωνικό μέτρο εδάφους οποιασδήποτε περιοχής με μεγάλη ηλιοφάνεια δέχεται πάνω από 2.000 κιλοβατώρες φωτεινής ενέργειας. Αν μπορούσαμε να συγκεντρώσουμε και να μετατρέψουμε σε ηλεκτρική ενέργεια αυτή τη ποσότητα, θα κρατούσαμε σε λειτουργία μια χύτρα ταχύτητας για περίπου έξι εβδομάδες. Μικρό μέρος της ενέργειας που μεταφέρει η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται από τα φύλλα των φυτών και εξασφαλίζει την ανάπτυξή τους. Το τελευταίο διάστημα, οι επιστήμονες αναζητούν τρόπους αξιοποίησης της φωτεινής ενέργειας για τις δραστηριότητες του ανθρώπου. Τα πλεονεκτήματα είναι πολύ δελεαστικά: Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη, φθηνή και δε ρυπαίνει το περιβάλλον. Πρακτικά λοιπόν όσον αφορά την εκμετάλλευση της, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Από την άλλη πλευρά, όμως, δεν είναι και τόσο εύκολο να την συγκεντρώσουμε και να την μετατρέψουμε σε μια πιο εύχρηστη μορφή ενέργειας. Τα κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται στους σταθμούς ηλιακής ενέργειας σπαταλούν μεγάλο ποσοστό της ακτινοβολίας με την ανάκλαση, ενώ τα ηλιακά στοιχεία

αξιοποιούν μόνο κάποια συγκεκριμένα μήκη κύματος. Πάντως είναι πιθανόν ότι στις επόμενες δεκαετίες η ηλιακή ακτινοβολία θα καλύπτει όλο και μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας.

1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ανανεώσιμη ενέργεια είναι η ενέργεια που αντλείται από πηγές, οι οποίες δεν εξαντλούνται ή αντικαθίστανται, όπως η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική η γεωθερμική και η ενέργεια από βιομάζα. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Οι ΑΠΕ πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον και η αξιοποίησή τους έγκειται μόνο στην ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα δεσμεύουν το δυναμικό τους. Το ενδιαφέρον στη σύγχρονη εποχή για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών και την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, παρουσιάσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού.



Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο μόνος δυνατός τρόπος που διαφαίνεται για να μπορέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση να ανταποκριθεί στο φιλόδοξο στόχο που έθεσε το 1992 στη συνδιάσκεψη του Ρίο για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, να περιορίσει δηλαδή, μέχρι το έτος 2000 τους ρύπους του διοξειδίου του άνθρακα στα επίπεδα του 1993, είναι να επιταχύνει την ανάπτυξη των ΑΠΕ.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται...
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνετε η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας πιο ορθολογική χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με γεωθερμική ενέργεια).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους:

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί.

- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.

Οι κυριότερες μορφές ΑΠΕ είναι:

- Η αιολική ενέργεια*, που γίνεται όλο και πιο δημοφιλής αφού το κόστος παραγωγής πέφτει ραγδαία – γεγονός που την καθιστά ολοένα πιο ανταγωνιστική έναντι της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Ως εκ τούτου η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας έχει παρουσιάσει ραγδαία άνθηση τα τελευταία χρόνια. Έτσι ενώ το παγκόσμιο εγκατεστημένο δυναμικό αιολικής ενέργειας ανερχόταν το 1998 σε λίγο περισσότερο από 10.000 MW συνολικά, το 2005 είχε ήδη φθάσει τα 60.000 MW. Το νούμερο αυτό αναμένεται να ανέβει στα 150.000 MW μέχρι το 2012. Η βασική αιτία αυτής της ραγδαίας ανάπτυξης είναι το σχετικά χαμηλό κόστος της αιολικής ενέργειας σε σχέση με τις άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου δεν εκπέμπεται διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα αέρια που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα (μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια κ.α.), όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε όλη τη διάρκεια της χρήσης της, μία και μόνο ανεμογεννήτρια 1,5 MW μπορεί να εξοικονομήσει περί τους 80.000 τόνους ορυκτού άνθρακα (brown coal). Αυτό σημαίνει ότι όχι μόνο δεν εντείνεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλά δεν υπάρχουν και αρνητικές συνέπειες στη δημόσια υγεία από την ατμοσφαιρική ρύπανση.
- Η Ηλιακή ενέργεια*. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά συστήματα τα οποία επωφελούνται από την ενέργεια, η οποία παράγεται από τον ήλιο: Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τέτοια στοιχεία συχνά ενσωματώνονται στις στέγες. Τα φωτοβολταϊκά προσφέρουν το πρόσθετο πλεονέκτημα να μπορούν να

προμηθεύσουν ενέργεια σε αραιοκατοικημένες περιοχές, οι οποίες δεν καλύπτονται από τα δίκτυα ηλεκτροδότησης, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα ζωής και προωθώντας την αιεφόρο ανάπτυξη. Οι σταθμοί ηλιακής θερμικής ενέργειας αξιοποιούν την θερμότητα του ήλιου, πρώτα συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία με τη βοήθεια κατόπτρων για να θερμάνουν νερό ή κάποιο άλλο μέσο και μετά μετατρέποντας τον ατμό σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας. Η ηλιακή θερμική ενέργεια είναι πολλά υποσχόμενη για τις πόλεις, όπου η ατμοσφαιρική ρύπανση τείνει να είναι μεγάλο πρόβλημα. Οι σταθμοί ηλιακής θερμικής ενέργειας ανοίγουν προοπτικές για μελλοντικές μεταφορές ενέργειας από θερμές αναπτυσσόμενες σε ψυχρές ανεπτυγμένες χώρες. Μία σχετικά απλή μέθοδος επίσης είναι το να χρησιμοποιούμε την ενέργεια από τον ήλιο για να θερμαίνουμε το νερό. Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει πάνω τους για να ζεστάνουν το νερό της βρύσης (και, σε μικρότερη έκταση, για να ζεστάνουν νερό για τη θέρμανση χώρων).

- iii. *Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια* είναι η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού των ποταμών και της μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια στροβίλων και ηλεκτρογεννητριών. Η ενέργεια αυτή διαχέεται στη φύση από δίνες και ρεύματα, καθώς το νερό ρέει. Κατηφορικά σε ρυάκια, χείμαρρους και ποτάμια μέχρι να φτάσει στη θάλασσα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του αποθηκευμένου νερού και όσο ψηλότερα βρίσκεται, τόσο περισσότερη είναι η ενέργεια που περιέχει. Η υδροηλεκτρική ενέργεια, είναι η πιο σημαντική και ευρεία χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Αντιπροσωπεύει το 19% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού και το 6% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας. Σε όλο τον κόσμο υπάρχουν σήμερα περίπου 45.000 μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα σε λειτουργία. Η χώρα με τη μεγαλύτερη παραγωγή υδροηλεκτρισμού είναι ο Καναδάς και ακολουθούν οι Η.Π.Α. και η Βραζιλία.
- iv. *Η γεωθερμική ενέργεια*, η οποία έχει να κάνει με τη χρήση της θερμότητας της Γης για την παραγωγή ενέργειας. Οι αντλίες γεωθερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν παντού. Η τεχνολογία για την άντληση γεωθερμικής ενέργειας διαφοροποιείται σε ρηχή γεωθερμική σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, και σε βαθιά γεωθερμική στις υψηλότερες θερμοκρασίες.

- ν. *Η ενέργεια από βιομάζα.* Βιομάζα ονομάζουμε οποιαδήποτε σχετικά νέα οργανική ύλη η οποία προέρχεται από τα φυτά ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Η ενέργεια από βιομάζα αντλείται από φυτικό και ζωικό υλικό, όπως το ξύλο από τα δάση, τα υπολείμματα από τις γεωργικές και δασικές διαδικασίες, και τα βιομηχανικά, ανθρώπινα ή ζωικά απόβλητα. Η βιομάζα μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες. **Παραδοσιακή βιομάζα** που γενικά περιορίζεται στις αναπτυσσόμενες χώρες και σε χρήσεις μικρής κλίμακας. Περιλαμβάνει τα καυσόξυλα και το κάρβουνο για οικιακή χρήση, την ήρα του ρυζιού, άλλα φυτικά υπολείμματα και την κοπριά ζώων. Η παραδοσιακή βιομάζα που χρησιμοποιείται σε ανοιχτά τζάκια για μαγείρεμα και για θέρμανση εξακολουθεί να είναι πολύ σημαντική στις αναπτυσσόμενες χώρες λόγω της έλλειψης εναλλακτικών λύσεων. **Σύγχρονη βιομάζα** που συνήθως αφορά χρήσεις μεγάλης κλίμακας και σκοπό να υποκαταστήσει τις συμβατικές ενεργειακές πηγές των ορυκτών καυσίμων. Περιλαμβάνει ξερά κλαδιά από το δάσος και τα γεωργικά υπολείμματα, τα οικιακά απόβλητα, τα βιοαέρια και τα βιοκαύσιμα από ενεργειακές καλλιέργειες (όπως έλαια από φυτά ή/και φυτά που περιέχουν άμυλο και σάκχαρα). Η σύγχρονη βιομάζα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και θερμότητας σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

Η Ελλάδα αποτελεί ιδανικό τόπο για ευρεία χρήση των ΑΠΕ. Τα ιδιαίτερα φυσικά τοπιολογικά χαρακτηριστικά της σε συνδυασμό με τα ποικιλόμορφα κλιματολογικά στοιχεία της ικανοποιούν την αναγκαία συνθήκη για την ανάπτυξη κάθε εφαρμογής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η χώρα μας βρίσκεται σε μια περιοχή εξαιρετικά ηλιόλουστη, όπου υπάρχουν πλούσιοι υδάτινοι πόροι και πνέουν συχνά ισχυροί άνεμοι. Η Ελλάδα διαθέτει σχεδόν ανεξάντλητο δυναμικό κάθε μορφής ΑΠΕ. Ενδεικτικά, σύμφωνα με μελέτη για τις ανανεώσιμες πηγές στη Μεσόγειο, η οικονομικά εκμεταλλεύσιμη παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα από κάθε μορφής ΑΠΕ ανέρχεται σε 55.000 GWh το χρόνο, ενώ το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό υπερβαίνει τις 218.000 GWh.

1.3 ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

Οι ανάγκες της κοινωνίας μετά την βιομηχανική επανάσταση, άλλαξαν δραματικά, με την εξ ολοκλήρου πλέον εξάρτησή της από την παραγωγή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βέλτιστος τρόπος παραγωγής, μέχρι και λίγες δεκαετίες πριν, ήταν η καύση του ορυκτού πλούτου του φλοιού του πλανήτη. Αυτή η μέθοδος όμως, εκτός από τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, άρα άμεσα και στην ποιότητα ζωής του ανθρώπου, αγνόησε το γεγονός ότι τα αποθέματα ορυκτών έχουν πεπερασμένη ποσότητα. Η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια, πολλαπλασιάστηκε με την πάροδο των χρόνων και μέσα σε 200 χρόνια καταναλώθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό των διαθέσιμων πόρων, επιτρέποντας την εκμετάλλευσή τους για 40-50 χρόνια ακόμα έως την εξάντλησή τους. Η απάντηση στο ενεργειακό πρόβλημα που προκύπτει, δίνεται από νέες μορφές παραγωγής ενέργειας, που δεν στηρίζονται σε ρυπογόνες μεθόδους εκμετάλλευσης πεπερασμένων πόρων, αλλά σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως ο άνεμος, η βιομάζα, το νερό, ο ήλιος και άλλα. Ο ήλιος, εκτός από πηγή φωτός και θερμότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή η μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, στηρίζεται στην ιδιότητα ορισμένων στοιχείων του περιοδικού πίνακα να εμφανίζουν ηλεκτρική τάση στα άκρα τους όταν προσπίπτει στην επιφάνειά τους φως.

1.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Το 1839 ο 19χρονος φυσικός Edmund Becquerel ανακαλύπτει για πρώτη φορά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο τυχαία καθώς πειραματιζόταν με ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελούμενο από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγώγιμο υγρό. Παρατήρησε ότι η ροή αυξανόταν με την έκθεση στον ήλιο και οι σημειώσεις του γύρω από το φαινόμενο, είχαν φανεί πολύ ενδιαφέρουσες στην επιστημονική κοινότητα χωρίς όμως πρακτική εφαρμογή. Το 1883 ο Charles Fritz παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ενώ περίπου 20 χρόνια αργότερα, το 1904 ο Albert Einstein γράφει την πληρέστερη θεωρία γύρω από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Για την θεωρητική του εξήγηση τιμήθηκε με βραβείο Nobel το 1921. Το 1918 ο Πολωνός Jan Czochralski κατασκευάζει το πρώτο στοιχείο μονοκρυσταλλικού Si. Το 1932 παρατηρείται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο κάδμιο σελήνιο. Σήμερα το CdS αποτελεί πολύ σημαντικό υλικό παραγωγής φωτοβολταϊκών panel, ενώ το 1954 στα Bell Laboratories, ανακαλύπτουν ότι το πυρίτιο μαζί με συγκεκριμένα ρυπαρότητες είναι πολύ ευαίσθητο στο φως. Το αποτέλεσμα είναι τα πρώτα πρακτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία με απόδοση 6%. Το 1958 κατασκευάζεται

φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 9% και στις 17 Μαρτίου εκτοξεύεται το Vanguard I, ο πρώτος δορυφόρος τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά, που θα δουλέψει συνεχόμενα για 8 χρόνια. Δύο ακόμη δορυφόροι ο Explorer III & ο Vanguard II εκτοξεύονται από τους Αμερικάνους και ο Sputnik III από τους Σοβιετικούς ενώ στην Georgia κατασκευάζεται ο πρώτος τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά στοιχεία τηλεφωνικός αναμεταδότης. Στη συνέχεια το 1959 παράγονται φωτοβολταϊκά με 10% απόδοση και η Αμερική εκτοξεύει τους δορυφόρους Explorer VI & VII με 9.600 φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το 1960 Παράγονται φωτοβολταϊκά με 14% απόδοση και το 1963 η Ιαπωνία εγκαθιστά φωτοβολταϊκά σε φάρους το οποίο αποτελεί τη μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή διάταξη της εποχής. Το 1972 οι Γάλλοι εγκαθιστούν άμορφα CdS φωτοβολταϊκά σε ένα σχολείο στην επαρχία Niger και το 1976 ξεκινούν οι πρώτες εφαρμογές φωτοβολταϊκών για την τροφοδότηση ψυγείων, τηλεπικοινωνιακού & ιατρικού εξοπλισμού, άντλησης νερού και φωτισμού. Φτάνουμε στο 1977 όπου η συνολική παραγωγή φωτοβολταϊκών ξεπερνά τα 500 kW. Στην Αυστραλία στο Pentax World Solar Challenge νικά ένα κινούμενο από φωτοβολταϊκά αυτοκίνητο της General Motors με μέση ταχύτητα 71 km/h ενώ το 1983 η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών ξεπερνά τα 21,3 MW. Το 1984 κυκλοφορούν τα άμορφα φωτοβολταϊκά και πλέον το 2002 η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ σε φωτοβολταϊκά φτάνει τα 2000MW.

Σήμερα σύμφωνα με την έκθεση του 2011 που δημοσιεύθηκε από την EPIA (European Photovoltaic Industry Association) παρόλη την οικονομική κρίση οι συνολικές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών για το 2011 ήταν πάνω από 27.7 GW . Αυτό ανεβάζει την συνολική παγκόσμια ισχύ από 39,7GW στο τέλος του 2010, σε πάνω από 67.4 GW στο τέλος του 2011

Με νούμερα:

- Το 2011 αυξήθηκαν οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις κατά 70%.
- Οι αγορές που ξεπέρασαν το 1gw το 2011 αυξήθηκαν από 4 σε 6.
- Τα φωτοβολταϊκά είναι και επίσημα η τρίτη πιο δημοφιλής ανανεώσιμη πηγή ενέργειας μετά από την υδροηλεκτρική και την αιολική.
- Η συνολική παγκόσμια ισχύς στο τέλος του 2011 είναι περίπου 67GW. Αρκετή ισχύς να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες 20 εκατομμυρίων νοικοκυριών στον κόσμο.
- Η Ευρώπη κατέχει το 75% των εγκαταστάσεων το 2011 με πάνω από 50GW φωτοβολταϊκών συστημάτων.

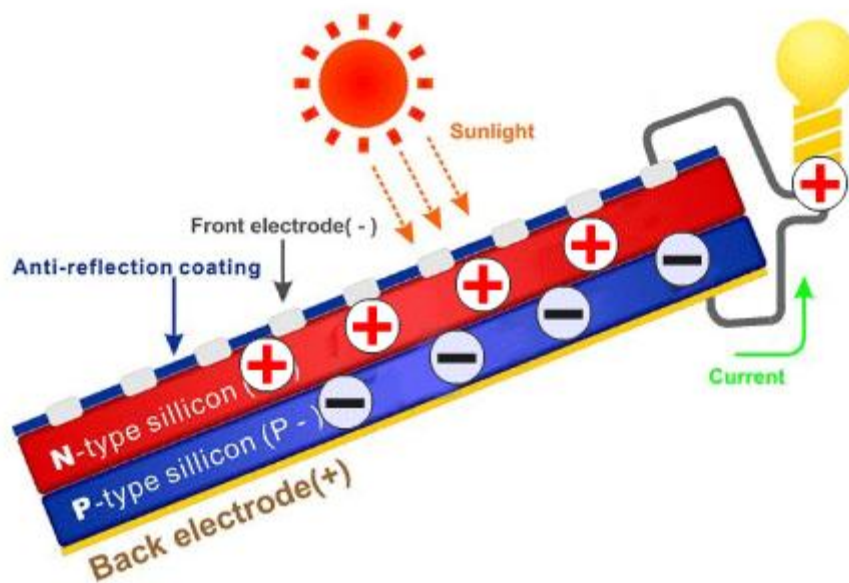
- Το 2010 οι μεγαλύτερες αγορές ήταν Γερμανία, Ιταλία, Τσεχία. Το 2011 η Ιταλία τελικά ξεπέρασε την Γερμανία, Κίνα, Αμερική και Ιαπωνία που ακολουθούν και είναι τώρα οι σημαντικότεροι παίκτες στην αγορά.
- Η Γερμανία και η Ιταλία κατέχουν το 60% της συνολικής παγκόσμιας αύξησης το 2011.

Κεφάλαιο 2 : ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Τα ηλιακά κύτταρα κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά, τα οποία μπορεί να είναι είτε μονοκρυσταλλικά, είτε πολυκρυσταλλικά, είτε άμορφα. Ανεξάρτητα όμως από την κρυσταλλική τους δομή, όλα τα ηλιακά κύτταρα, εμπεριέχουν μία δίοδο ημιαγωγού που εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου (δισκοειδής μορφή). Συνήθως η δίοδος αυτή παρέχεται από την επαφή ενός στρώματος τύπου-n, με ένα στρώμα τύπου-p (δίοδος επαφής p-n) ή ακόμα και από την επαφή μεταξύ ενός ημιαγωγού και ενός κατάλληλα επιλεγμένου μετάλλου (δίοδος Schottky). Από τα μήκη κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μόνο τα φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση της ενέργειας μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας, απορροφούνται και δημιουργούν ελεύθερους φορείς, από τους οποίους άλλοι διαχωρίζονται και άλλοι επανασυνδέονται. Επίσης από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, ένα μέρος ανακλάται και ένα μέρος διαπερνά τον ημιαγωγό και θερμαίνει το μεταλλικό ηλεκτρόδιο της πίσω όψης. Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων (ανεξάρτητα με το είδος διόδου που εμπεριέχουν), βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, το οποίο εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το φράγμα βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά που προσπίπτει το φως. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να «σπάσει» ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ζεύγος ελευθέρων φορέων (ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας και μία οπή στη ζώνη σθένους). Όσο λοιπόν διαρκεί η ακτινοβολία του στοιχείου, δημιουργείται μία περίσσεια από ζεύγη φορέων, που υπερβαίνει τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Αν οι ελεύθεροι αυτοί φορείς, δεν επανασυνδεθούν αλλά βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, θα δεχτούν το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο της διόδου και θα διαχωριστούν με σκοπό τη μείωση της δυναμικής τους ενέργειας. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου-n και οι οπές μεταφέρονται στο τμήμα τύπου-p, με αποτέλεσμα η συσσώρευση αυτή του φορτίου στα δύο τμήματα να δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της διόδου. Η διάταξη δηλαδή λειτουργεί ως ορθά πολωμένη δίοδος και ως πηγή ηλεκτρικού ρεύματος για όσο διάστημα διαρκεί η οπτική διέγερση.

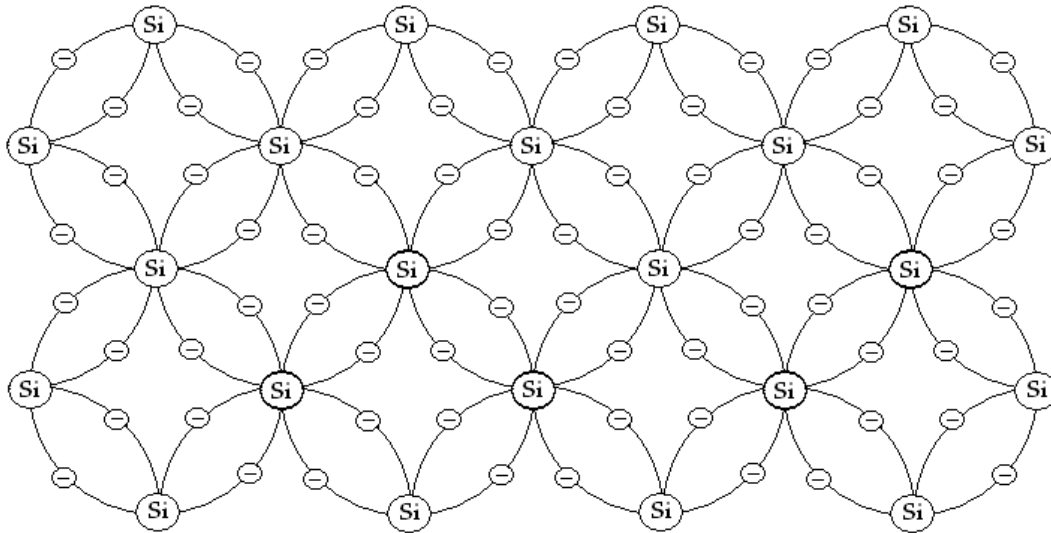
Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου ηλιακού στοιχείου σύμφωνα με τη διαδικασία που προαναφέρθηκε ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Εικόνα 2.1.1 Σχηματικά η λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου

2.2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

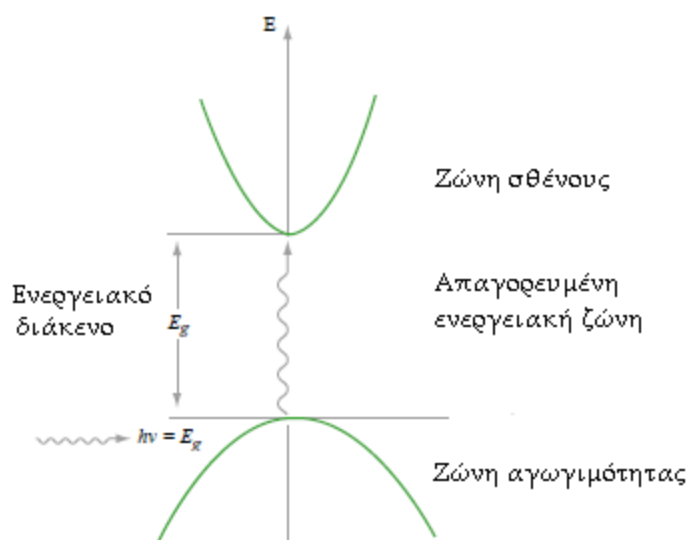
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγούς, που είναι σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, ανάμεσα στους αγωγούς και στους μονωτές. Ο δημοφιλέστερος ημιαγωγός, ήδη από το 1950 είναι το πυρίτιο (Si), καθώς τα πρώτα φ/β στοιχεία, αλλά και το 90% περίπου της σημερινής παραγωγής στηρίζονται σε αυτό. Είναι το δεύτερο στοιχείο στη Γη σε αφθονία, μετά το οξυγόνο (21% έναντι 30%) και χαρακτηρίζεται από την τετραεδρική κρυσταλλική δομή του.



Εικόνα 2.2.1 Δομή στοιχείου πυριτίου

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, κάθε άτομο πυριτίου του πλέγματος συνδέεται με 4 χημικούς δεσμούς (2 ηλεκτρόνια δεσμεύονται για τη δημιουργία ενός δεσμού, ένα από κάθε μετέχον άτομο) με τα γειτονικά του άτομα. Συνεπώς, στη θεμελιώδη κατάσταση, όπου και τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους είναι απασχολημένα για την δημιουργία ομοιοπολικών δεσμών μεταξύ ατόμων πυριτίου, ο ημιαγωγός δεν έχει ελεύθερους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος. Στην περίπτωση που ένας ημιαγωγός απορροφήσει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας (με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας), τότε η ενέργεια αυτή κατανέμεται στα άτομά του και προκαλεί την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τους δεσμούς λόγω ιονισμού. Τα ελευθερωμένα ηλεκτρόνια, απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η αποδυνάμωση των δεσμών στο πλέγμα δεν συνεπάγεται την κατάρρευση της συνοχής του σώματος αφού οι τρεις εναπομείναντες χημικοί δεσμοί μαζί με τον ένα ατελή δεσμό, επαρκούν για τη συγκράτηση των ατόμων στη θέση τους. Τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, τα ελεύθερα δηλαδή ηλεκτρόνια, περιστρέφονται άτακτα στο σώμα όσο διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια. Αν αυτή μειωθεί σημαντικά, τότε επιστρέφουν στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού. Η κάλυψη της κενής θέσης μπορεί να γίνει και από κάποιο γειτονικό ηλεκτρόνιο, το οποίο θα αφήσει μία νέα κενή θέση στο αρχικό του άτομο. Η μετατόπιση των κενών θέσεων στο πλέγμα μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ιδεατό σωματίδιο, τις οπές (h), οι οποίες θεωρητικά έχουν ίδια μάζα και αντίθετο φορτίο από τα ηλεκτρόνια. Από ενεργειακής άποψης, τα ηλεκτρόνια χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Στα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων (λιγότερο ενεργά) που

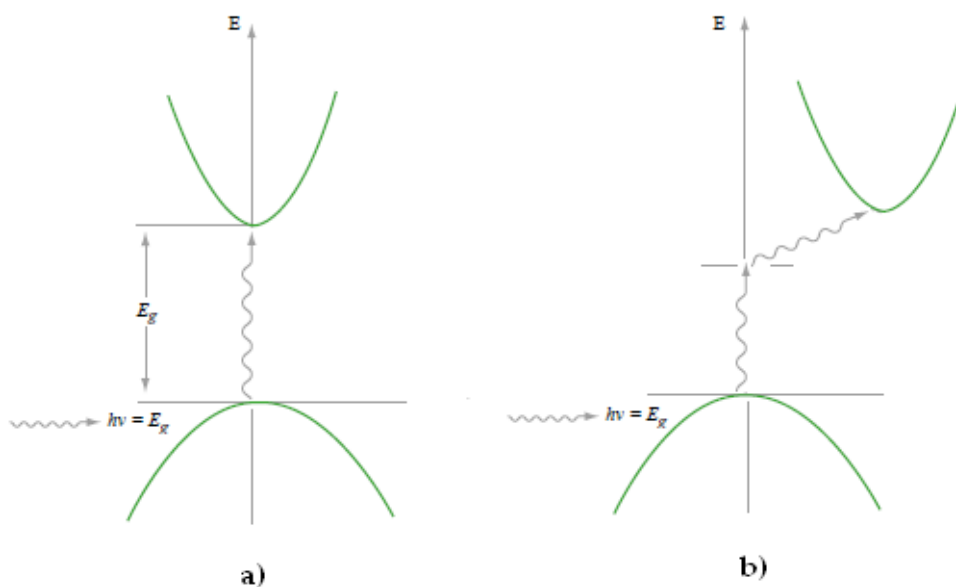
δεν συμμετέχουν στον σχηματισμό των χημικών δεσμών, στα ηλεκτρόνια σθένους που σχηματίζουν τους δεσμούς και στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων σθένους σχηματίζουν μία ενεργειακή ζώνη, την ζώνη σθένους και αντίστοιχα οι ενέργειες των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας σχηματίζουν τη ζώνη αγωγιμότητας. Η ενεργειακή απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του λιγότερου ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και του περισσότερο ενεργού από τα ηλεκτρόνια σθένους, ονομάζεται ενεργειακό διάκενο και εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας με ταυτόχρονη δημιουργία μίας οπής. Σε ένα απολύτως καθαρό σώμα, χωρίς καθόλου προσμίξεις και τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα, δεν υπάρχουν ενεργειακές στάθμες στο διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους (E_v) και τη ζώνη αγωγιμότητας (E_c) και η περιοχή αυτή αποτελεί μία απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη.



Εικόνα 2.2.2 Ενεργειακές Ζώνες σε ημιαγωγό

Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους μπορεί να γίνει όταν του προσφερθεί μία ποσότητα ενέργειας, όπως μια δέσμη ακτινοβολίας με φωτόνια ενέργειας $E=hf$. Στην περίπτωση που η ενέργεια των φωτονίων είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο E_g του στοιχείου, τότε το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να την απορροφήσει. Αν τα προσπίπτοντα φωτόνια έχουν ενέργεια μεγαλύτερη του E_g , το ηλεκτρόνιο αφήνει το χημικό δεσμό και η περίσσεια ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική, η οποία γίνεται αντιληπτή ως αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Η πιθανότητα να αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια σθένους αρκετή ενέργεια από το περιβάλλον ώστε να διεγερθούν και να υπερπηδήσουν το ενεργειακό διάκενο, εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία του

σώματος και έχει τιμή ανάλογη προς το μέγεθος $\exp(-E_g/2kT)$ όπου k είναι η σταθερά Boltzmann. Η απορρόφηση ενός κατάλληλου φωτονίου όμως δεν είναι πάντα η μοναδική προϋπόθεση για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους. Το ενεργειακό διάκενο μπορεί να είναι άμεσο ή έμμεσο. Σε υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο, φωτόνια με ενέργεια E μεγαλύτερη του E_g επαρκούν για τη δημιουργία ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και οπών. Σε υλικό με έμμεσο διάκενο, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές έχουν διαφορετική ορμή που σημαίνει ότι για την πραγματοποίηση της διέγερσης απαιτείται και η συμμετοχή ενός επιπλέον “σωματιδίου” ώστε να διατηρηθεί η ορμή του συστήματος. Το σωματίδιο αυτό ονομάζεται φωνόνιο και είναι το ενεργειακό κβάντο της θερμικής ταλάντωσης του κρυσταλλικού πλέγματος του ημιαγωγού. Συνεπώς, η απαίτηση της συμμετοχής τριών σωματιδίων, καθιστά την πιθανότητα διέγερσης πολύ μικρότερη από την πιθανότητα διέγερσης σε υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο.



Εικόνα 2.2.3 Ενεργειακές Ζώνες σε ημιαγωγό α) με άμεσο και b) με έμμεσο ενεργειακό διάκενο

Υλικά με έμμεσο ενεργειακό διάκενο, παρά τη δυσκολία στην δημιουργία φορέων, ευνοούν και την καθυστέρηση της επανασύνδεσής τους, δηλαδή την επιστροφή ενός ηλεκτρονίου αγωγιμότητας στο πλέγμα, καλύπτοντας μία κενή θέση και εκλύοντας ενέργεια ίση περίπου με την τιμή του ενεργειακού διακενου.

2.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΟΠΕΣ

Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, συνήθως γίνεται με θερμική ή οπτική διέγερση με ελάχιστο ποσό ενέργειας ίσο με το

ενεργειακό χάσμα του κρυστάλλου E_g . Ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ελεύθερο να κινηθεί στον κρύσταλλο. Ας θεωρήσουμε την περίπτωση, όπου ένα φωτόνιο με ενέργεια $h\nu > E_g$ αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους και απορροφάται απ' αυτό. Το ηλεκτρόνιο τότε αποκτά ενέργεια ικανή για να ξεπεράσει το ενεργειακό χάσμα E_g , να φθάσει στη ζώνη αγωγιμότητας και να καταστεί ελεύθερο. Είναι φανερό ότι κατά την μετακίνηση του ηλεκτρονίου προς τη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργείται μια ελεύθερη θέση στη ζώνη σθένους, που καλείται οπή. Η περιοχή γύρω από την οπή είναι θετικά φορτισμένη λόγω της αφαίρεσης ενός αρνητικού φορτίου από μια ουδέτερη, κατά τα άλλα περιοχή. Η οπή, που συμβολίζεται ως h , επίσης μετακινείται ελεύθερα στον κρύσταλλο λόγω του ότι ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού δεσμού, μπορεί να καλύψει τη θέση της, δημιουργώντας έτσι μια καινούργια ελεύθερη θέση. Αυτό ισοδυναμεί με κίνηση της οπής προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του ηλεκτρονίου. Έτσι και τα ηλεκτρόνια και οι οπές με φορτία $-e$ και $+e$ αντίστοιχα, συμμετέχουν στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Αν και στο συγκεκριμένο παράδειγμα, φωτόνιο ενέργειας $h\nu > E_g$ δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής, υπάρχουν και άλλες πηγές ενέργειας, που επίσης δημιουργούν επανασύνδεση.

Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί επανασύνδεσης είναι η επανασύνδεση μέσω κέντρων επανασύνδεσης (defects), η άμεση επανασύνδεση με ακτινοβολήση (band-to-band) και η επανασύνδεση Auger. Οι τρεις μηχανισμοί παρουσιάζονται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα

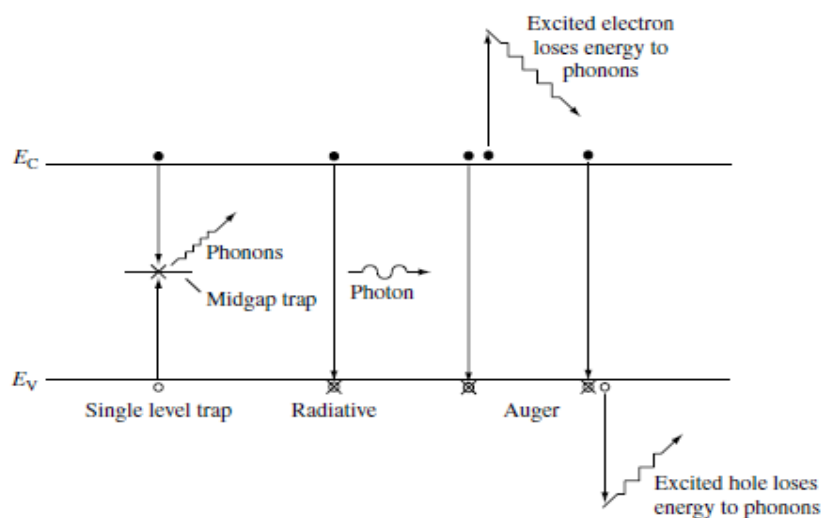


Figure 3.9 Recombination processes in semiconductors

Εικόνα 2.2.4 Διαδικασίες επανασύνδεσης φορέων σε ημιαγωγούς

Στους στοιχειακούς ημιαγωγίμους κρυστάλλους ,όπως είναι και το πυρίτιο ,τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται κυρίως μέσω κέντρων επανασύνδεσης. Τα κέντρα αυτά μπορεί να είναι είτε προσμίξεις δοτών-αποδεκτών είτε κρυσταλλικές ατέλειες, οι οποίες αποτελούν εντοπισμένες ενεργειακές καταστάσεις μέσα στο ενεργειακό διάκενο. Το ηλεκτρόνιο «δεσμεύεται» από το κέντρο επανασύνδεσης και από ελεύθερο γίνεται εντοπισμένο σ αυτή τη θέση έως ότου μια οπή πλησιάσει και επανασυνδεθεί μαζί του. Κατά την επανασύνδεση ,η ενέργεια του ηλεκτρονίου χάνεται συνήθως μετατρέπόμενη σε ταλαντώσεις πλέγματος ,δηλαδή φωνόνια. Στην επανασύνδεση Auger αν ένα ηλεκτρόνιο συγκρουστεί ταυτόχρονα με ένα άλλο ηλεκτρόνιο, η ενέργεια που απελευθερώνεται από την επανασύνδεση απορροφάται από το σκεδαζόμενο ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο που δεν επανασυνδέθηκε χάνει σταδιακά την προσληφθείσα ενέργεια σε μια σειρά διαδοχικών κρούσεων με το κρυσταλλικό πλέγμα. Όλοι οι μηχανισμοί που αναφέραμε για την επανασύνδεση μπορούν να εξελιχθούν αντίστροφα δίνοντας μας τις αντίστοιχες διαδικασίες γένεσης φορέων, αυτές είναι:

-Άμεση θερμική διέγερση: Ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους απορροφά θερμική ενέργεια ή ακτινοβολία και μεταβαίνει στη ζώνη αγωγιμότητας.

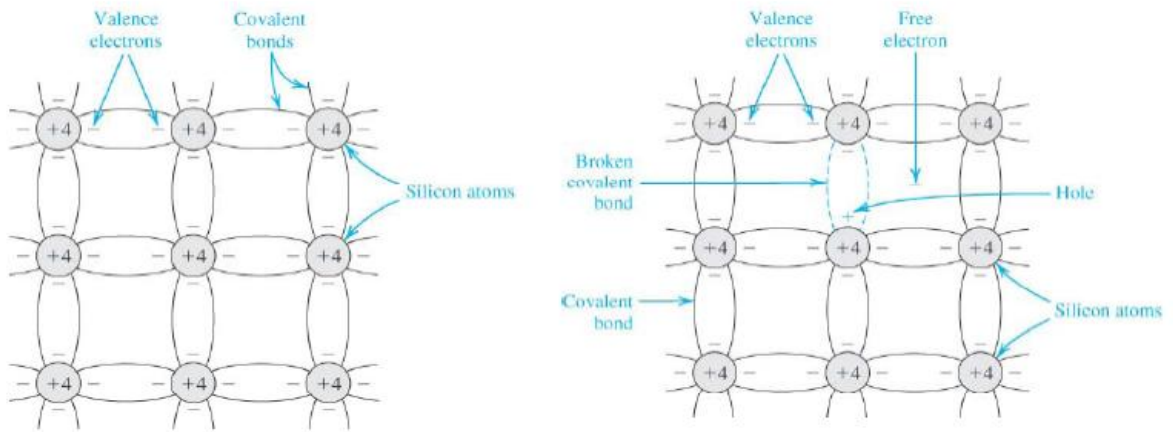
-Έμμεση θερμική διέγερση : Ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους απορροφά θερμική ενέργεια ή ακτινοβολία και μεταβαίνει στη ζώνη σθένους μέσω μια βαθιάς ή ρηχής ενδοχασματικής ενεργειακής στάθμης.

-Μαζικός Ιονισμός : Δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου οπής λόγω σύγκρουσης ηλεκτρονίου με το κρυσταλλικό πλέγμα.

2.2.2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ

Αν εισάγουμε ξένα άτομα σε ένα καθαρό κατά τα άλλα κρύσταλλο όπως αυτό τους σχήματος (ενδογενές υλικό)

Ενδογενές πυρίτιο

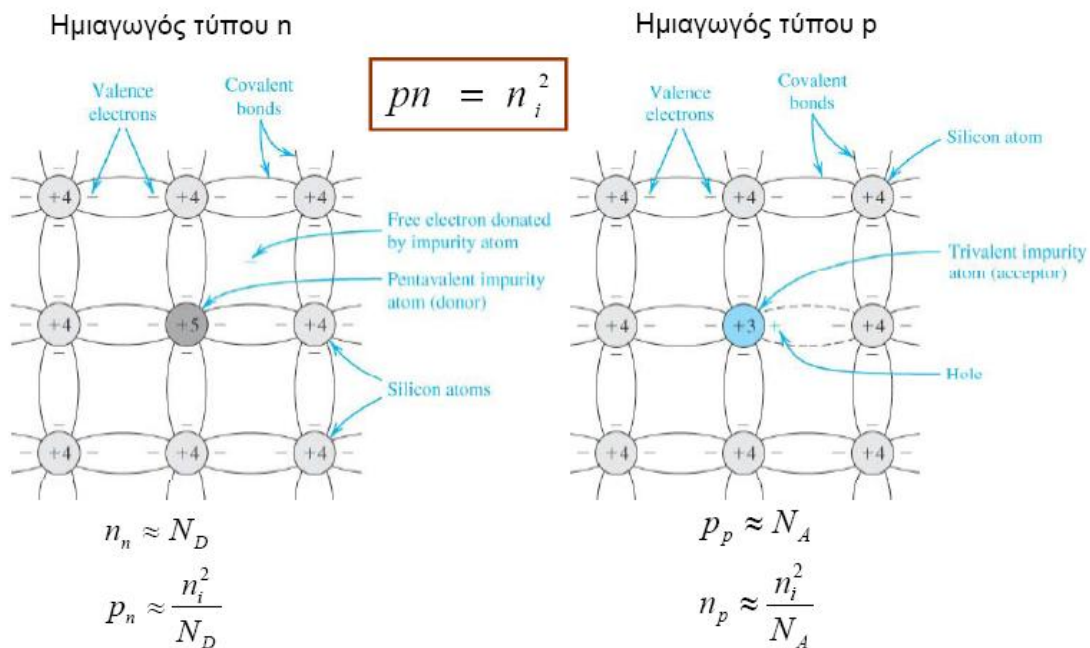


$$n = p = n_i$$

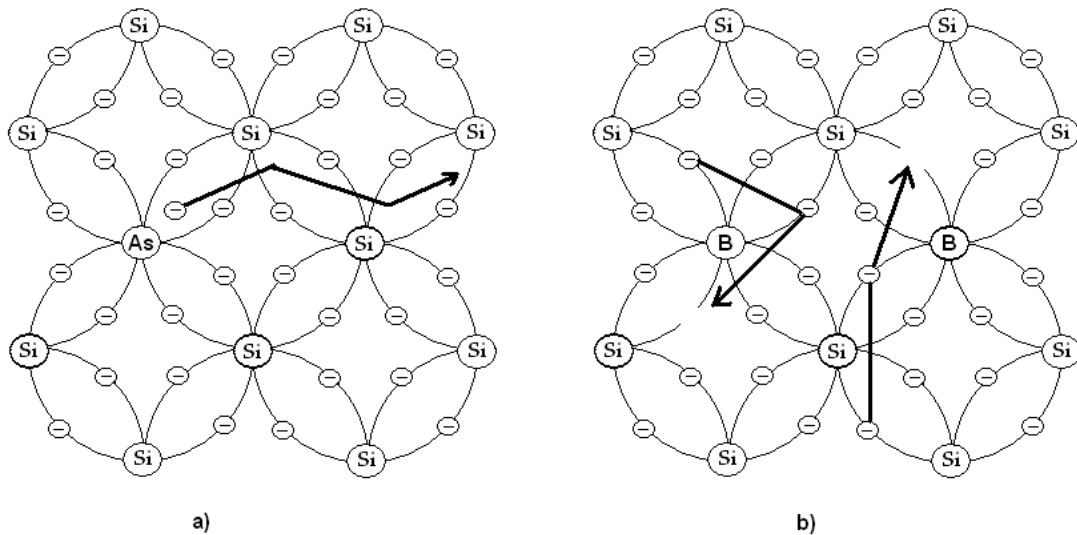
$$pn = n_i^2$$

είναι δυνατό να δημιουργήσουμε ένα ημιαγωγό, που η συγκέντρωση φορέων μιας πολικότητας να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του άλλου τύπου. Αυτοί οι ημιαγωγοί καλούνται ημιαγωγοί πρόσμιξης και ένα τέτοιο παράδειγμα μαζί με τις εξισώσεις για τις συγκεντρώσεις οπών και ηλεκτρονίων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Ημιαγωγοί με προσμίξεις

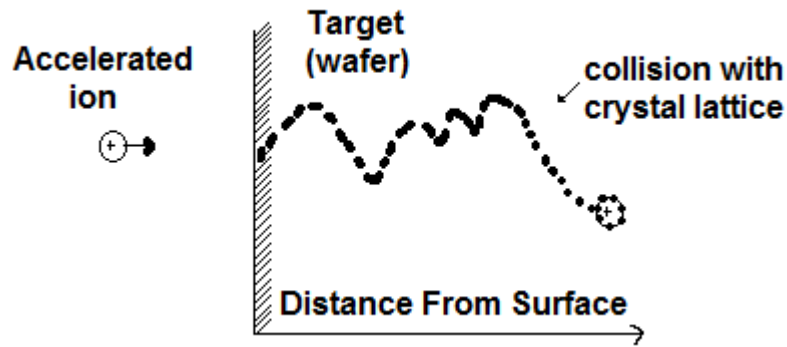


Η δημιουργία ελεύθερων φορέων, απαιτεί όχι μόνο την παρουσία προσμίξεων, αλλά και την ικανότητά τους να προσθέσουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας. Σ' αυτή την περίπτωση καλούνται δότες. Αν προσθέσουν οπές στη ζώνη σθένους, καλούνται αποδέκτες (δέχονται ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους, δημιουργώντας έτσι μια οπή). Κατά τον ιονισμό, ο δότης δίνει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας ενώ ο αποδέκτης δίνει μια οπή στη ζώνη σθένους. Βαριές προσμίξεις, που η ενεργειακή στάθμη τους απέχει πολύ από τις δυο ζώνες μπορούν να αποτελέσουν κέντρα επανασύνδεσης. Τέτοιες προσμίξεις καλούνται και παγίδες. Ένας ημιαγωγός με προσμίξεις δοτών καλείται n-τύπου, ενώ με προσμίξεις αποδεκτών καλείται p-τύπου. Σ' ένα ημιαγωγό n-τύπου, τα ηλεκτρόνια είναι φορείς πλειοψηφίας και οι οπές φορείς μειοψηφίας. Στην περίπτωση p-τύπου ημιαγωγού ($p > n$), οι οπές είναι φορείς πλειοψηφίας και τα ηλεκτρόνια φορείς μειοψηφίας.



Εικόνα 2.2.5 Προσμίξεις α)αρσενικού(As) και β)βόριου(B) σε ημιαγωγό πυριτίου(Si)

Η εμφύτευση ιόντων είναι μία μέθοδος εισαγωγής προσμίξεων σε έναν ημιαγωγό. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί ιόντα τα οποία επιταχύνονται ηλεκτροστατικά για να βομβαρδίσουν τα ημιαγωγιμα υλικά. Η επιλογή του προς εμφύτευση ιόντος γίνεται μέσω ενός μαγνήτη ο οποίος αποκλίνει την πορεία ενός ιόντος ανάλογα με το ατομικό του βάρος. Τα κύρια πλεονεκτήματα της ιοντικής εμφύτευσης έναντι της διαδικασίας της εισαγωγής προσμίξεων μέσω διάχυσης με εναπόθεση είναι ότι το βάθος διείσδυσης των προσμίξεων στην εμφύτευση μπορεί να καθορισθεί με ακρίβεια με βάση την ενέργεια της εμφύτευσης η δε ποσότητα της εισαγόμενης πρόσμιξης με βάση το μετρούμενο ρεύμα. Για μερικούς ημιαγωγούς η ιοντική εμφύτευση είναι η μόνη δυνατή διαδικασία εισαγωγής προσμίξεων μια και οι υψηλές θερμοκρασίες εισαγωγής προσμίξεων με εναπόθεση θα είχαν σαν αποτέλεσμα διάλυση του σύνθετου ημιαγωγού όπως π.χ. το GaAs. Επίσης η ιοντική εμφύτευση βοηθάει στην σμίκρυνση των διαστάσεων των διατάξεων με την ελαχιστοποίηση των φαινομένων δύο διαστάσεων. Ο συνολικός αριθμός των ατόμων της πρόσμιξης που περνάει στον ημιαγωγό από την επιφάνεια (δηλ. η δόση) είναι ανάλογη του ρεύματος της δέσμης σε όλη την εμφυτευμένη επιφάνεια. Η κατανομή της συγκέντρωσης των προσμίξεων είναι συνάρτηση του εμφυτευμένου είδους, του υποστρώματος και της ενέργειας. Οι συγκρούσεις μεταξύ του εμφυτευμένου ιόντος και των ατόμων του κρυστάλλου καθορίζουν την πορεία του ιόντος. Συνήθως θεωρούμε ότι το εισαγόμενο άτομο αλληλεπιδρά μόνο με ένα κρυσταλλικό άτομο σε κάθε του σύγκρουση ακολουθώντας μία πορεία που φαίνεται στο σχήμα:



Εικόνα 2.2.2.2 Πορεία πρόσμιξης μέσα στον ημιαγωγό

Πιο αναλυτικά η κατανομή των προσμίξεων κατά την εμφύτευση ελέγχεται κυρίως από μηχανισμούς απώλειας ενέργειας των ιόντων μέσω αλληλεπιδράσεων τόσο με τα άτομα του πλέγματος του υποστρώματος όσο και με τα ηλεκτρόνια. Υπάρχουν δύο κυρίως μηχανισμοί :

- Απώλεια ενέργειας λόγω συγκρούσεων με τους πυρήνες των ατόμων. Τέτοιου είδους συγκρούσεις έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλη απώλεια ενέργειας του εμφυτευμένου ιόντος, μεγάλες αποκλίσεις τροχιάς αλλά και καταστροφή του κρυσταλλικού πλέγματος του ημιαγωγού. Ο μηχανισμός αυτός είναι κυρίαρχος για μικρές ενέργειες και βαριά ιόντα.
- Απώλεια ενέργειας λόγω συγκρούσεων με τα ηλεκτρόνια. Τέτοιου είδους συγκρούσεις έχουν σαν αποτέλεσμα μικρή απώλεια ενέργειας του εμφυτευμένου ιόντος, μικρές αποκλίσεις τροχιάς αλλά και αμελητέα καταστροφή του κρυσταλλικού πλέγματος του ημιαγωγού. Ο μηχανισμός αυτός είναι κυρίαρχος για μεγάλες ενέργειες και ελαφριά ιόντα.

Μπορούμε να γράψουμε ότι :

$$S = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{πυρην}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ηλεκτρον}} \quad (2.2.1)$$

όπου S είναι η ανασχετική ισχύς του στόχου, που ορίζεται ως η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους της τροχιάς κίνησης του προσπίπτοντος ιόντος. Αν γνωρίζουμε το S μπορούμε να ολοκληρώσουμε όλες τις απώλειες ενέργειας μέχρις ότου το ιόν χάσει όλη την αρχική του ενέργεια και να υπολογίσουμε το μήκος που θα έχει μέχρι τότε διανύσει. Θεωρώντας τους φυσικούς μηχανισμούς ανασχεσης που περιγράψαμε

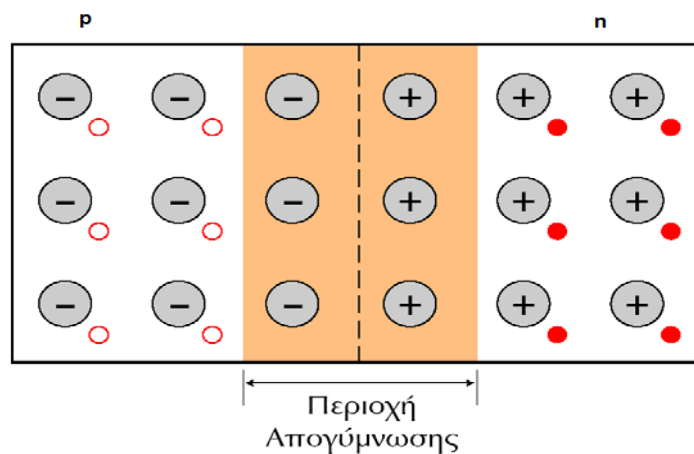
παραπάνω ένα προσπίπτον ιόν κάθετα στην επιφάνεια του ημιαγωγίμου υποστρώματος διανύει απόσταση ίση με R που θα την ονομάσουμε βεληνεκές. Η απόσταση αυτή έχει τόσο μία κάθετη προς την επιφάνεια συνιστώσα όσο και μια οριζόντια. Η διαδικασία όμως της εμφύτευσης περιλαμβάνει ένα σύνολο ιόντων σε δόση που είναι συνήθως μεγαλύτερη από 10^{12} ατ /cm². Το μέσο λοιπόν μήκος κατά την διεύθυνση του βάθους που διανύουν τα ιόντα αυτά ονομάζεται προβεβλημένο βεληνεκές R_p και η κατανομή των ιόντων γύρω από το βάθος αυτό η οποία είναι τύπου Gauss έχει μια τυπική απόκλιση σ_p . Γράφουμε λοιπόν για την συγκέντρωση των ιόντων $N(x)$:

$$N(x) = N_0 \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (2.2.2)$$

Εάν η συνολική δόση των εμφυτευμένων ιόντων Q τότε ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση βρίσκουμε για το μέγιστο της συγκέντρωσης:

$$N_0 = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \quad (2.2.3)$$

2.2.3 Η ΔΙΟΔΟΣ p-n



Εικόνα 2.2.6 Δίοδος p-n

Θεωρούμε δυο κρυστάλλους από ημιαγωγό p και n αντίστοιχα που βρίσκονται σε κρυσταλλική επαφή. Είναι φανερό ότι σε κάθε μεμονωμένο ημιαγωγό, θα υπάρχουν οι φορείς που κινούνται ελεύθερα μέσα σ' όλο τον όγκο του κρυστάλλου, με φορτίο θετικό ή αρνητικό ανάλογα με τον τύπο του ημιαγωγού. Τα άτομα από τα οποία προέρχονται οι φορείς αυτοί, έχουν απομείνει σαν θετικά ή

αρνητικά ιόντα με αποτέλεσμα ολόκληρος ο μονωμένος κρύσταλλος να είναι ηλεκτρικά ουδέτερος. Με την κρυσταλλική ένωση των δυο ημιαγωγών, επειδή στην επαφή παρατηρείται μεγάλη μεταβολή της συγκέντρωσης των φορέων πλειονότητας σε κάθε ημιαγωγό, δημιουργείται ισχυρό στην αρχή ρεύμα διάχυσης με αποτέλεσμα ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό n να διαχέονται προς τον ημιαγωγό p όπου επανασυνδέονται με τις εκεί υπάρχουσες οπές. Το ίδιο θα συμβεί και με τις οπές του ημιαγωγού p. Έτσι οι φορείς πλειονότητας που υπήρχαν σε μια ορισμένη απόσταση γύρω από την επαφή επανασυνδέθηκαν με αποτέλεσμα η περιοχή αυτή να παραμένει απογυμνωμένη από φορείς. Αυτός είναι και ο λόγος που η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης. Με απογυμνωμένη λοιπόν την περιοχή εκατέρωθεν της επαφής από φορείς πλειονότητας απομένουν τα ιόντα του αποδέκτη ή του δότη αντίστοιχα για τους ημιαγωγούς p και n τα οποία έτσι θα προσδίδουν ένα πλεόνασμα αρνητικού ή θετικού φορτίου. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι στην πραγματικότητα δεν υπάρχει βαθμωτή μεταβολή στην πυκνότητα φορτίου, αλλά πάντα αυτή μεταβάλλεται συνεχώς. Ωστόσο με πολύ καλή προσέγγιση μπορούμε να υποθέσουμε την περίπου σταθερή πυκνότητα φορτίου κατά μήκος κάθε κομματιού της περιοχής απογύμνωσης και να αμελήσουμε ένα μικρό σφάλμα που υπεισέρχεται κυρίως στα όρια των περιοχών αυτών.

Είναι γνωστό ότι η κατανομή φορτίου που προέκυψε γενικά δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, που περιγράφεται από την εξίσωση Poisson. Η εξίσωση Poisson στη γενική της μορφή για τις τρεις διαστάσεις είναι:

$$\nabla E = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.2.4)$$

όπου ε είναι η διηλεκτρική σταθερά του υλικού ($\varepsilon = \varepsilon^* \varepsilon_0$), ρ : πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου και E : ένταση ηλεκτρικού πεδίου. Σε μια διάσταση (πχ τη διεύθυνση του άξονα x), αν υποθέσουμε ότι στους άλλους δυο άξονες η κατανομή είναι σταθερή, δίνει:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.2.5)$$

Με ολοκλήρωση κατά μήκος της περιοχής απογύμνωσης

$$E = \int_{x_0}^x \frac{\rho}{\varepsilon} dx \quad (2.2.6)$$

όπου x_0 : η θέση στην οποία $E=0$.

Για να βρούμε την ένταση του πεδίου μέσα στον n-ημιαγωγό, αντικαθιστούμε την πυκνότητα φορτίου ρ με την τιμή της που είναι eN_D όπου e : φορτίο ηλεκτρονίου και N_D : συγκέντρωση δότη.

$$E = \int_{x_0}^x \frac{eN_D}{\varepsilon} dx = \frac{eN_D}{\varepsilon} (x - x_0) \quad (2.2.7)$$

και επειδή για τον ημιαγωγό τύπου n η θέση x_0 είναι το όριο της περιοχής απογύμνωσης, $x_0 = W_n$. Έτσι τελικά:

$$E = \frac{eN_D}{\varepsilon} (x - W_n) \quad (2.2.8)$$

Για τον ημιαγωγό p-τύπου, θα ισχύει ο αντίστοιχος τύπος:

$$E = -\frac{eN_A}{\varepsilon} (x - W_p) \quad (2.2.9).$$

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω τύπους, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που σχηματίζεται, μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση και με αντικατάσταση στο x των οριακών του τιμών βρίσκονται και οι οριακές τιμές του E . Ακριβώς στην επαφή ($x=0$) η τιμή του E παίρνει δυο τιμές από τους δυο παραπάνω τύπους οι οποίες θα πρέπει να είναι ίσες μεταξύ τους. Η συνθήκη αυτή δίνει τη σχέση: $N_A W_p = N_D W_n$. Επειδή στην κατασκευή μιας επαφής p-n ισχύει σχεδόν πάντοτε $N_A \gg N_D$ είναι προφανές ότι επίσης θα ισχύει $W_n \gg W_p$. Αυτή η τελευταία σχέση εκφράζει ότι το τμήμα της περιοχής απογύμνωσης που εκτείνεται μέσα στον ημιαγωγό n είναι πολύ μεγαλύτερο από το τμήμα της μέσα στον ημιαγωγό p, και αυτό στη συνέχεια ότι το όλο μήκος της περιοχής απογύμνωσης βρίσκεται μέσα στον ημιαγωγό n, $W = W_p + W_n$. Όπως είναι γνωστό, η ολοκλήρωση της σχέσης ορισμού της έντασης ($E = -dV/dx$) δίνει την σχέση:

$$V = -\int E dx + c \quad (2.2.10)$$

Με αντικατάσταση στο παραπάνω ολοκλήρωμα της τιμής του E για τον ημιαγωγό τύπου n παίρνουμε:

$$V = -\int \frac{eN_D}{\varepsilon} (x - W) dx + c = -\frac{eN_D}{\varepsilon} \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right) + c \quad (2.2.11).$$

Όπως φαίνεται η εξίσωση που καθορίζει το δυναμικό, είναι 2ου βαθμού δηλαδή η αντίστοιχη γραφική παράσταση θα είναι τμήμα παραβολής. Η σταθερά C καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες, και για τον ημιαγωγό p βρίσκεται από την παραδοχή ότι στη θέση $-W_p$ το δυναμικό είναι μηδέν. Επειδή μάλιστα $W_p \ll W$ μπορούμε με προσέγγιση να πούμε ότι $W_p = 0$ και επομένως, για να έχουμε $V=0$ στη θέση $x=0$, προκύπτει στο οριακό αυτό σημείο ότι $c=0$.

2.2.3.1 Η ΖΩΝΗ ΑΠΟΓΥΜΝΩΣΗΣ

Κατά την υλοποίηση της επαφής p-n, σημειώνεται μετακίνηση ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό-n προς τον ημιαγωγό-p, προς επανασύνδεση με τις παραπλήσιες οπές, οπότε λαμβάνει χώρα η αντίδραση: ηλεκτρόνιο + οπή → ενέργεια. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι η αλληλοεξουδετέρωση των φορέων και η δημιουργία εκατέρωθεν της επαφής δύο τμημάτων «απογυμνωμένων» από τους φορείς τους, δηλ. ένα τμήμα στον ημιαγωγό-n με θετικά ιόντα μόνο, χωρίς ηλεκτρόνια και ένα τμήμα στον ημιαγωγό-p με αρνητικά ιόντα μόνο, χωρίς οπές.

Σε αντίθεση με τους ευκίνητους φορείς των ημιαγωγών (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που τείνουν να διαχέονται προς τις περιοχές με τη μικρότερη συγκέντρωσή τους, η συγκέντρωση των αρνητικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες του τμήματος τύπου p και η συγκέντρωση των θετικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι δότες στο τμήμα τύπου n, παραμένουν αμετάβλητες, αφού τα ιόντα μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι, το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική του ουδετερότητα και οι πλευρές της ένωσης φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού (συνήθως 0.6-0.8 Volts), της οποίας το ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Τα δύο αυτά τμήματα συνιστούν την περιοχή απογύμνωσης (depletion region) της διόδου. Έξω από την περιοχή απογύμνωσης η δομή των ημιαγωγών παραμένει ως είχε. Η ζώνη απογύμνωσης δημιουργεί φραγμό στη μετακίνηση ηλεκτρονίων διαμέσου αυτής. Το ελάχιστο δυναμικό V_0 που πρέπει να επιβληθεί για να υπερπηδηθεί η ζώνη απογύμνωσης από τα ηλεκτρόνια ονομάζεται δυναμικό φραγμού. Η διάδος p-n υλοποιείται με σύνδεση των άκρων των δύο ημιαγωγίμων τμημάτων p και n με μεταλλικές επαφές. Έτσι, προκύπτουν η άνοδος A και η κάθοδος K της διόδου, η οποία στα ηλεκτρικά κυκλώματα συμβολίζεται με ένα βέλος στην πλευρά p και μία γραμμή στην πλευρά n. Η ζώνη απογύμνωσης λειτουργεί ως πυκνωτής με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Χωρητικότητα επαφής ή στατική χωρητικότητα φραγμού:

$$C_T = \frac{dQ}{dV} = \varepsilon \frac{S}{L} \quad (2.2.12)$$

η οποία επηρεάζει το ρεύμα που διέρχεται από την διάοδο σύμφωνα με την σχέση:

$$I = C_T \frac{dV}{dt} \quad (2.2.13)$$

Η τάση της επαφής δίνεται από την διαφορά δυναμικού: $\Delta V = V_o - V$

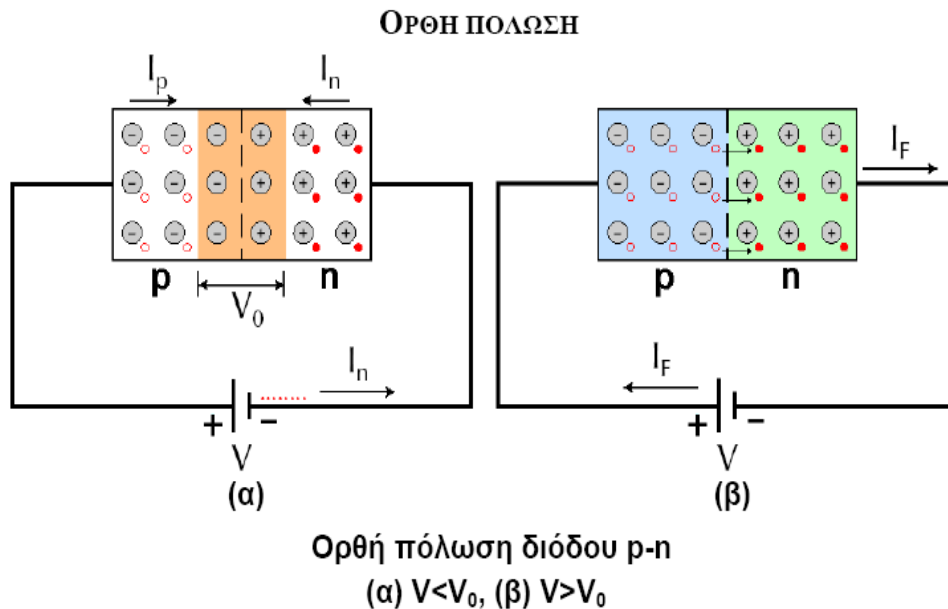
όπου: ΔQ μεταβολή του φορτίου της ζώνης, S η διατομή της επαφής, L το μήκος της ζώνης απογύμνωσης, ϵ η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού, V η εξωτερικά επιβαλλόμενη ορθή τάση, V_0 το δυναμικό φραγμού. Η χωρητικότητα C_T λαμβάνει τιμές στην περιοχή 1-100 pF.

2.2.3.2 ΠΟΛΩΣΗ ΔΙΟΔΟΥ p-n

Ανάλογα με την σύνδεση εξωτερικής πηγής με τα άκρα της διόδου p-n διακρίνουμε δύο είδη πόλωσης της:

- (α) Ορθή πόλωση (forward bias), όταν ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής συνδέεται με το τμήμα p της διόδου
- (β) Ανάστροφη πόλωση (reverse bias), όταν ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής συνδέεται με το τμήμα n της διόδου

ΟΡΘΗ ΠΟΛΩΣΗ

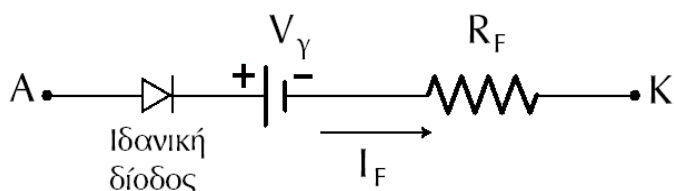


ΕΙΚΟΝΑ 2.2.7 Δίοδος p-n σε ορθή πόλωση

Ορθή πόλωση έχουμε όταν το p-τύπου ημιαγωγίμο υλικό είναι συνδεδεμένο με το θετικό πόλο μιας πηγής και το n-τύπου ημιαγωγίμο υλικό είναι συνδεδεμένο με το αρνητικό. Αυτό κάνει τη p-n ένωση να άγει. Με την πηγή συνδεδεμένη με αυτόν τον τρόπο, οι σπές στη p-τύπου περιοχή και τα ηλεκτρόνια στην n-τύπου περιοχή ωθούνται προς την ένωση. Αυτό μειώνει το πλάτος της ζώνης απογύμνωσης. Το θετικό φορτίο που εφαρμόζεται στο p-τύπου υλικό απωθεί τις τρύπες, ενώ το αρνητικό φορτίο που εφαρμόζεται στο n-τύπου υλικό απωθεί τα ηλεκτρόνια. Καθώς

ηλεκτρόνια και οπές ωθούνται προς την ένωση, η απόσταση μεταξύ τους μειώνεται. Το γεγονός αυτό μειώνει το φράγμα δυναμικού. Αυξάνοντας την τάση, η ζώνη απογύμνωσης γίνεται τελικά αρκετά λεπτή ώστε το ηλεκτρικό πεδίο της ζώνης δεν μπορεί να αντισταθμίσει τη ροή φορτίου, με συνέπεια τη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης. Τα ηλεκτρόνια που διασχίζουν την ένωση p-n και καταλήγουν στο p-τύπου υλικό (ή οι τρύπες οι οποίες μεταφέρονται στο n-τύπου υλικό) εξουδετερώνουν την περιοχή απογύμνωσης. Ως εκ τούτου, το ποσό της διάχυσης των φορέων μειονότητας καθορίζει το ποσό του ρεύματος που ενδέχεται να περάσει από την δίοδο. Μόνο οι φορείς πλειονότητας (ηλεκτρόνια σε n-τύπου υλικό ή τρύπες στο p-τύπου) μπορούν να ρέουν μέσω του ημιαγωγού για μακροσκοπικό μήκος. Με αυτό κατά νου, θα εξετάσουμε τη ροή των ηλεκτρονίων σε όλη τη ένωση.

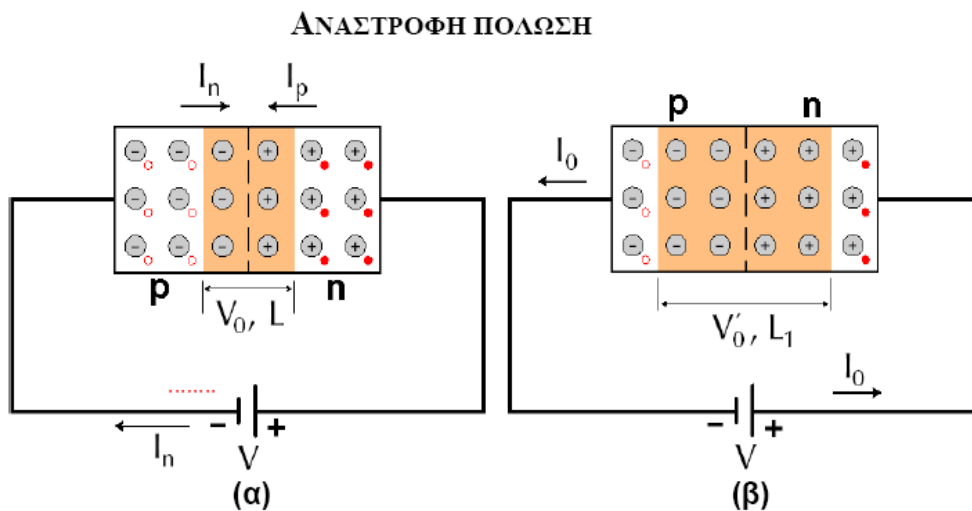
Η ορθή πόλωση δημιουργεί μια δύναμη η οποία ωθεί τα ηλεκτρόνια από την πλευρά n προς την πλευρά p. Με την ορθή πόλωση, η περιοχή απογύμνωσης είναι αρκετά στενή ώστε τα ηλεκτρόνια μπορούν να διασχίσουν την ένωση και να ενσωματωθούν στο p-τύπου υλικό. Ωστόσο, δεν συνεχίζουν να ρέουν επ' αόριστον, επειδή είναι ενεργειακά προτιμώμενο απ' αυτά να επανασυνδεθούν με οπές. Η μέση απόσταση που ταξιδεύει ένα ηλεκτρόνιο μέσα στο p-τύπου υλικό πριν ανασυνδυαστεί ονομάζεται μήκος διάχυσης, και είναι συνήθως της τάξης των μικρομέτρων. Παρά το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια διεισδύουν σε μικρή απόσταση το p-τύπου υλικό, το ηλεκτρικό ρεύμα συνεχίζει χωρίς διακοπή, διότι οι οπές (οι φορείς πλειονότητας) αρχίζουν να ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το συνολικό ρεύμα (το άθροισμα των ρευμάτων που οφείλονται στη ροή ηλεκτρονίων και των οπών) είναι σταθερή, διότι οποιαδήποτε μεταβολή θα προκαλούσε συσσώρευση φορτίου στην πάροδο του χρόνου (κανόνας του Kirchhoff). Η ροή των οπών από την p-τύπου στη n-τύπου περιοχή είναι ακριβώς ανάλογη με τη ροή των ηλεκτρονίων από την n στην p (τα ηλεκτρόνια και οπές αλλάζουν ρόλους και όλα τα ρεύματα και οι τάσεις αντιστρέφονται). Έτσι, η μακροσκοπική εικόνα της ροής του ρεύματος μέσω της δίοδου περιλαμβάνει ηλεκτρόνια που διέρχονται από τη n-τύπου περιοχή προς την ένωση, οπές που διέρχονται από την p-τύπου περιοχή προς τη διασταύρωση, και τα δύο είδη των ρευμάτων που συνεχώς ανασυνδυάζονται πλησίον του κόμβου. Τα ηλεκτρόνια και οπές ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις, αλλά έχουν επίσης και αντίθετα φορτία, έτσι ώστε το συνολικό ρεύμα να είναι προς την ίδια κατεύθυνση και στις δύο πλευρές της δίοδου, όπως απαιτείται. Η ορθά πολωμένη δίοδος p-n λειτουργεί ως κλειστός διακόπτης και το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμά της φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα:



ΕΙΚΟΝΑ 2.2.8 Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου p-n με ορθή πόλωση

ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΟΛΩΣΗ

Εάν μια δίοδος είναι αναστρόφως πολωμένη, η τάση στην κάθοδο είναι υψηλότερη από ότι στην άνοδο. Ως εκ τούτου, δεν θα υπάρξει ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέχρι η δίοδος να καταρρεύσει. Συνδέοντας την p-τύπου περιοχή στον αρνητικό πόλο της πηγής και την n-τύπου περιοχή στον θετικό, επιτυγχάνουμε ανάστροφη πόλωση. Οι συνδέσεις απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί:

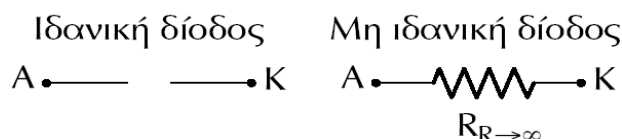


Ανάστροφη πόλωση διόδου p-n: (α) $V < V_0$, (β) $V > V_0$

Εικόνα 2.2.9 Δίοδος p-n σε Ανάστροφη Πόλωση

Επειδή το p-τύπου υλικό είναι συνδεδεμένο με τον αρνητικό πόλο της πηγής, οι οπές του p-τύπου ωθούνται μακριά από τη ένωση, με αποτέλεσμα το πλάτος της ζώνης απογύμνωσης να αυξάνεται. Ομοίως, επειδή η n-τύπου περιοχή είναι συνδεδεμένη με τον θετικό πόλο, τα ηλεκτρόνια ωθούνται μακριά από την ένωση. Συνεπώς, η περιοχή απογύμνωσης διευρύνεται, και μάλιστα όλο και περισσότερο με την αύξηση της τάσης ανάστροφης πόλωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση κατωφλιού προκαλώντας υψηλή αντίσταση στη ροή του φορτίου επιτρέποντας έτσι ελάχιστο ηλεκτρικό ρεύμα για να διασχίζει τη ένωση p-n. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της ζώνης απογύμνωσης αυξάνει με την αύξηση της τάσης της ανάστροφης πόλωσης. Μετά την αύξηση της έντασης ηλεκτρικού πεδίου πέρα από ένα κρίσιμο επίπεδο, η ζώνη απογύμνωσης καταρρέει και αρχίζει να ρέει ηλεκτρικό ρεύμα είτε λόγω του φαινομένου Zener ή λόγω της διάσπασης χιονοστιβάδας. Και οι δύο αυτές

διεργασίες διάσπασης είναι μη καταστρεπτικές και είναι αναστρέψιμες, εφόσον το ποσό του ρεύματος που διαρρέει δεν φτάσει τα επίπεδα που προκαλούν υπερθέρμανση και θερμική βλάβη στο ημιαγωγικό υλικό. Η ανάστροφα πολωμένη δίοδος p-n αντιμετωπίζεται σε κύκλωμα ως ανοικτός διακόπτης (ιδανική δίοδος) ή ως πολύ μεγάλη αντίσταση (μη ιδανική δίοδος).



ΕΙΚΟΝΑ 2.2.10 Ισοδύναμο κύκλωμα δίοδου p-n με ανάστροφη πόλωση

Για αρνητικές τιμές της επιβαλλόμενης τάσης, σε ανάστροφη πόλωση δηλαδή, η ένταση του ρεύματος σταθεροποιείται σε μία τιμή I_o , το ανάστροφο ρεύμα κόρου, ενώ για θετικές τιμές της τάσης, άρα ορθή πόλωση, η ένταση του ρεύματος αυξάνεται εκθετικά. Το ρεύμα σε μία δίοδο p-n στην οποία επιβάλλεται μια τάση V δίνεται από τη σχέση

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (2.2.14)$$

όπου: e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

k η σταθερά του Boltzmann

T η απόλυτη θερμοκρασία

γ συντελεστής που χαρακτηρίζει τη δίοδο και $1 < \gamma < 2$

Ρεύματα μέσα σε μια επαφή p-n

Έστω κατ' αρχάς ότι επαφή p-n συνιστώμενη από δυο ημιαγωγούς είναι συνδεδεμένη με εξωτερική τάση πόλωσης V , η οποία μπορεί να μεταβάλλεται. Στο σημείο της επαφής υπάρχει μια μεταβολή στη συγκέντρωση των φορέων, με αποτέλεσμα οι μεν οπές να διαχέονται προς τον n ημιαγωγό, τα δε ηλεκτρόνια προς τον p. Εκεί επειδή ο κάθε φορέας συναντάει τον συζυγή του, επανασυνδέεται με αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσής του και κατά συνέπεια τη διατήρηση της βαθμίδας που είναι απαραίτητη για τη συνεχή ροή φορέων. Από την άλλη μεριά επίσης, όπως είδη γνωρίσαμε, μέσα στην περιοχή απογύμνωσης επικρατεί ένα ηλεκτρικό πεδίο με φορά από τον ημιαγωγό n προς τον p. Αυτό το πεδίο ασκεί δυνάμεις στους φορείς που βρίσκονται μέσα σ' αυτό με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός άλλου ρεύματος μετατόπισης με φορά αντίθετη του προηγούμενου. Πρέπει να

σημειώσουμε ότι τα δυο αυτά ρεύματα συνίστανται από μετακινήσεις οπών όσο και ηλεκτρονίων. Ας δούμε λοιπόν την έκφραση για το συνολικό ρεύμα οπών.

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p dp/dx \quad (2.2.15)$$

Ο όρος J_p είναι πολύ μικρότερος από τους δυο όρους του δεξιού μέρους της παραπάνω ισότητας και γι' αυτό μπορούμε να πούμε ότι οι δυο αυτοί όροι είναι περίπου ίσοι μεταξύ τους

$$qp\mu_p E = qD_p dp/dx \quad (2.2.16)$$

Χρησιμοποιώντας τώρα τη σχέση του Einstein $\frac{\mu_p}{q} = \frac{D_p}{kT}$ παίρνουμε :

$$E = \frac{V_T}{p} \frac{dp}{dx}, V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.2.17)$$

ενώ επίσης από τον ορισμό της έντασης $E = -dV/dx$.

Εξισώνοντας τα δεύτερα μέλη και ολοκληρώνοντας από τη μια άκρη της περιοχής απογύμνωσης στην άλλη, παίρνουμε

$$\int_{p_{po}}^{p_n(0)} dp/p = -\int_0^{V_j} dV/V_T \quad (2.2.18)$$

όπου p_{po} είναι η συγκέντρωση οπών στο αριστερό άκρο που συμπίπτει με την τιμή θερμικής ισορροπίας, ενώ στο δεξιό άκρο η συγκέντρωση είναι $p_n(0)$. V_j είναι η διαφορά δυναμικού στα άκρα της περιοχής απογύμνωσης και συνίσταται από την τάση V_o που γνωρίσαμε προηγούμενα μειωμένη κατά το ποσό V της τάσης που εφαρμόζεται εξωτερικά. Δηλαδή ισχύει $V_j = V_o - V$.

Η παραπάνω ολοκλήρωση μας δίνει

$$\ln p \Big|_{p_{po}}^{p_n(0)} = \frac{V}{V_T} \Big|_0^{V_j} \quad (2.2.19)$$

$$\ln \frac{p_n(0)}{p_{po}} = \frac{V_j - 0}{V_T} = \frac{V_o - V}{V_T} \quad (2.2.20)$$

$$\ln p_n(0) = p_{po} e^{\frac{(V_o - V)}{V_T}} = p_{po} e^{\frac{V_o}{V_T}} e^{-\frac{V}{V_T}} \quad (2.2.21)$$

Αν στην επαφή p-n δεν εφαρμοστεί εξωτερική τάση ($V=0$) τότε η συγκέντρωση των οπών που διαχέονται στον n ημιαγωγό θα είναι ίση με την αντίστοιχη της θερμικής ισορροπίας ($p_n(0) = p_{no}$). Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται

$$p_{no} = p_{po} e^{\frac{V_o}{V_T}} \quad (2.2.22)$$

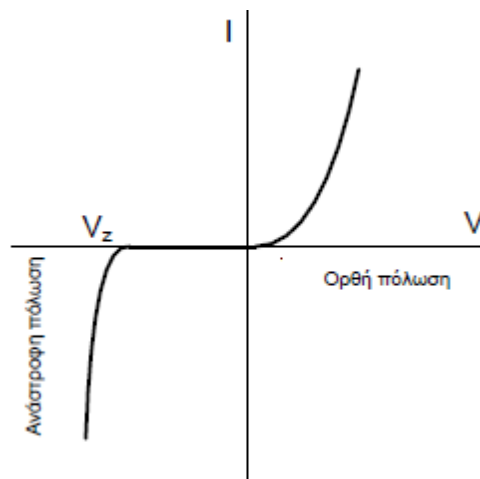
και με αντικατάσταση της σχέσης αυτής στην παραπάνω, παίρνουμε

$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{V}{V_T}} \quad (2.2.23)$$

Η σχέση αυτή είναι γνωστή σαν νόμος της επαφής και εκφράζει ότι αν εφαρμοστεί κάποια θετική τάση στην επαφή p-n , τότε αυξάνει εκθετικά η συγκέντρωση των φορέων που διαχέονται στον απέναντι ημιαγωγό. Εφαρμογή κάποιας αντίθετης τάσης μειώνει στο μηδέν τη συγκέντρωση αυτή.

Χαρακτηριστική I – V διόδου pn σε συνθήκες ορθής και ανάστροφης πόλωσης

Στο παρακάτω φαίνεται η χαρακτηριστική I-V για μία δίοδο p-n. Για αρνητικές τιμές δυναμικού (ανάστροφη πόλωση) παρατηρούμε ότι η τιμή της έντασης του ρεύματος είναι πολύ μικρή (σχεδόν μηδέν) κάτι που είναι αναμενόμενο βάσει της ανάλυσης που έγινε στην περίπτωση της ανάστροφης πόλωσης. Ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση η δίοδος συμπεριφέρεται σαν ανοιχτό κύκλωμα. Παρατηρούμε όμως ότι αν η τιμή της τάσης της αντίστροφης πόλωσης ξεπεράσει μία τιμή (V_Z) τότε η ένωση p-n οδηγείται σε διάσπαση και το ρεύμα αυξάνεται απότομα. Για θετικές τιμές τάσης (ορθή πόλωση) παρατηρούμε εκθετική αύξηση του ρεύματος με την τάση.



Εικόνα 2.2.11 Χαρακτηριστική I-V για μια δίοδο p-n

ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Ας θεωρήσουμε την εξίσωση τάσης- ρεύματος λυμένη ως προς V :

$$V = 2V_T(\ln I - \ln I_0) \quad (2.2.24)$$

Στην παραπάνω συνάρτηση, υπάρχουν δυο μεταβλητές που επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, δηλαδή η $V_T (=kT/q)$ και το ανάστροφο ρεύμα κόρου. Άρα θα ισχύει

$$\frac{dV}{dT} = \frac{\partial V}{\partial V_T} \frac{dV_T}{dT} + \frac{\partial V}{\partial I_0} \frac{dI_0}{dT} \quad (2.2.25)$$

Η παραγωγή της (2.2.24) ως προς V_T δίνει $\partial V / \partial V_T = 2(\ln I - \ln I_0) = V / V_T$ ενώ η παραγωγή του V_T ως προς T δίνει $dV_T/dT = k/qe = V_T/T$. Η παραγωγή της ως προς I δίνει :

$$\partial V / \partial I_0 = 2V_T / I_0 \quad (2.2.26)$$

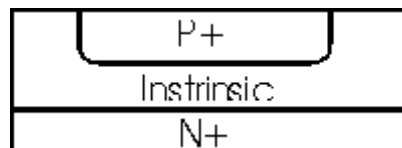
ενώ η παράγωγος dI_0 / dT είναι ήδη γνωστή. Αντικαθιστώντας λοιπόν στη σχέση παίρνουμε:

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V}{T} - \frac{2V}{I_0} \left(\frac{dI_0}{dT} \right) \quad (2.2.27)$$

Δίνοντας πραγματικές τιμές στην παραπάνω σχέση όπως: $T = 300^\circ\text{K}$, $V = 0.6\text{V}$ (για Si) , $V = 0.026\text{V}$, $dI_0 / dT = 0.08I_0$ (Si) παίρνουμε μια προσεγγιστική θεωρητική μεταβολή $dV/dT = -2.16 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ για το Si.

2.2.4 ΔΙΟΔΟΣ p-i-n

Η δίοδος p-i-n ανακαλύφθηκε το 1952 από τον Hall και συγκέντρωσε το ενδιαφέρον στην ιδιότητά της να εμφανίζει μεγάλη ανάστροφη τάση κατάρρευσης. Το 1958 ερευνήθηκε η συμπεριφορά της στις υψηλές συχνότητες από τον Uhler. Η δίοδος p-i-n αποτελείται από τρία στρώματα ημιαγωγού, ένα τύπου p και ένα τύπου n στα άκρα με ένα στρώμα ενδογενούς ημιαγωγού (i) στη μέση. Στο σχήμα φαίνεται η δομή της διόδου αυτής.



ΕΙΚΟΝΑ 2.2.12 Κατασκευαστική δομή της διόδου p-i-n.

Σε ανάστροφη τάση, το ενδιάμεσο στρώμα ενδογενούς ημιαγωγού εμφανίζεται απογυμνωμένο από φορείς και με μηδαμινό φορτίο και συνεπώς η τάση κατάρρευσης της διόδου θα είναι πολύ αυξημένη, σύμφωνα και με τον τύπο

$$V_B = E_B * x_i \quad (2.2.28)$$

όπου E_B : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στην περιοχή απογύμνωσης όταν συμβαίνει η κατάρρευση, και x_i : το πάχος του ενδογενούς ημιαγωγού. Η χωρητικότητα επαφής στην ανάστροφη πόλωση δίνεται :

$$C = \epsilon \frac{S}{x_i} \quad (2.2.29)$$

,όπου S η διατομή της επαφής, ϵ η διηλ. σταθερά και x_i το πάχος του ενδογενούς στρώματος. Εδώ η αντιστοιχία με επίπεδο πυκνωτή είναι εμφανής, με τις δυο επαφές p - i και i - n να έχουν το ρόλο των επιπέδων πλακών, ενώ η περιοχή i αποτελεί το διηλεκτρικό υλικό. Φαίνεται καθαρά εδώ ότι αφ' ενός η χωρητικότητα επαφής θα είναι σταθερή επειδή και το x_i είναι σταθερό και εφ' ετέρου ότι όσο μεγαλύτερο είναι το x_i τόσο μικρότερη η χωρητικότητα.

Σε ορθή πόλωση, μέσα στην περιοχή i θα διαχέονται φορείς και από τις δυο πλευρές, n και p αντίστοιχα. Η συγκέντρωση οπών θα είναι στην περιοχή αυτή ίση με τη συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων $n_i = p_i$. Εκεί οι φορείς επανασυνδέονται δημιουργώντας έτσι ένα συνολικό ρεύμα επανασύνδεσης μέσα από τη δίοδο. Το ρεύμα αυτό θα είναι

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{e * n_i * S * x_i}{\tau} \quad (2.2.30)$$

όπου S : διατομή της επαφής, τ : μέσος χρόνος ζωής των φορέων. Στη δίοδο αυτή η δυναμική αντίστασή της στις υψηλές συχνότητες εξαρτάται από το ρεύμα πόλωσης όπως εύκολα μπορούμε να δείξουμε. Πραγματικά

$$R_{RF} = \rho \frac{x_i}{S} = \frac{x_i}{en_i(\mu_n + \mu_p)S} = \frac{x_i^2}{I \tau(\mu_n + \mu_p)} \quad (2.2.31)$$

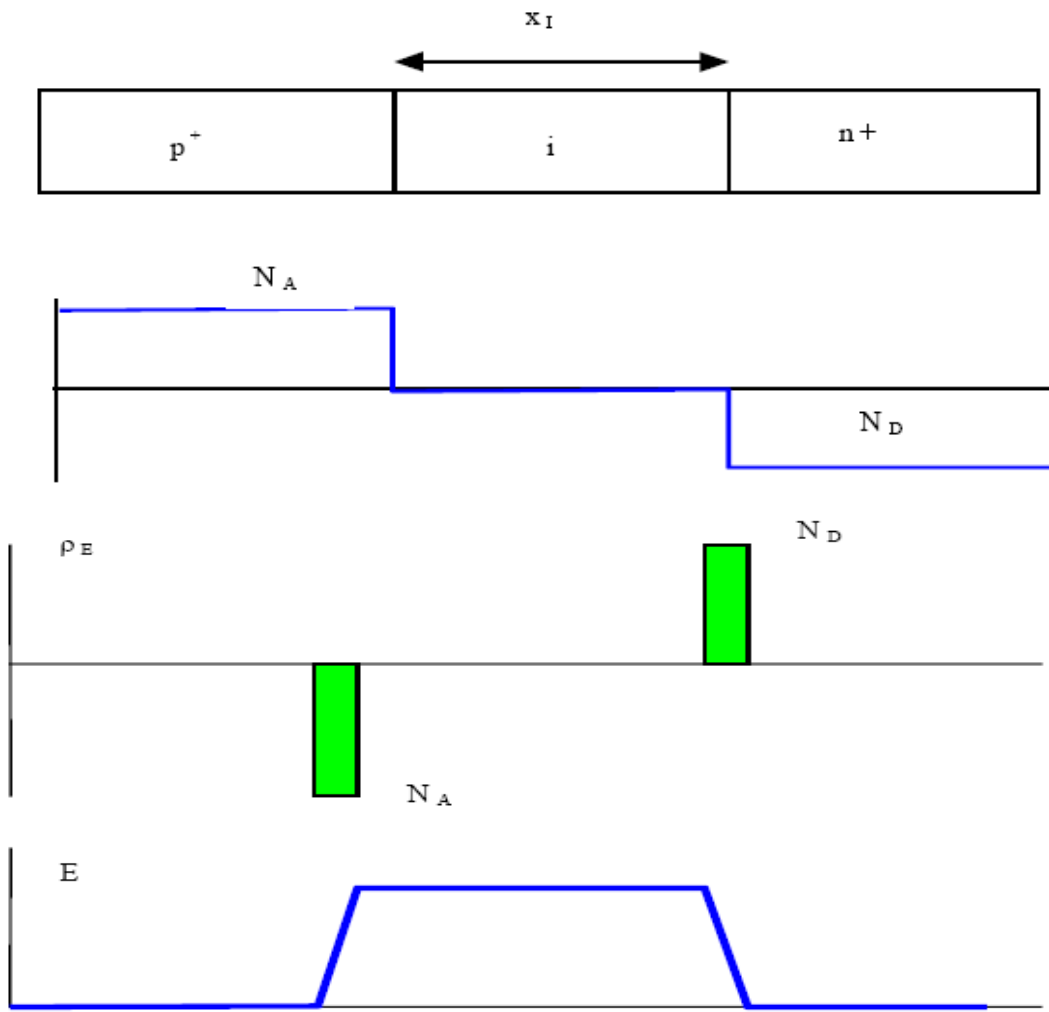
όπου ρ η ειδική αντίσταση, μ_n και μ_p η ευκινησία ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα, τ ο μέσος χρόνος ζωής των φορέων και n_i η ενδογενής συγκέντρωση ηλεκτρονίων. Εδώ βλέπουμε ότι, πρώτον η αντίσταση αυτή μειώνεται αυξανόμενου του ρεύματος, δηλαδή σε μεγάλα ρεύματα ελαττώνεται η απόκριση της δίοδου η οποία τείνει να γίνει βραχυκύκλωμα, δεύτερον ότι για μεγάλο x_i μπορεί η αντίσταση αυτή να διατηρηθεί αρκετά υψηλή εξασφαλίζοντας καλή απόκριση της δίοδου σε υψηλές συχνότητες. Η τελευταία αυτή σχέση εκφράζει και ένα τρόπο διαμόρφωσης της αντίστασης R_F από το ρεύμα πόλωσης γεγονός που εφαρμόζεται στη χρήση της δίοδου αυτής για διαμόρφωση υψηλής συχνότητας φέροντος από σήμα χαμηλής συχνότητας. Οι αποθηκευμένοι φορείς μέσα στην περιοχή i λειτουργούν και ως ανασχετικός παράγοντας για ταχεία αποκατάσταση της ανάστροφης πόλωσης όταν στη δίοδο εφαρμοστεί ανάστροφη τάση. Ο χρόνος αποθήκευσης δίνεται από τη σχέση :

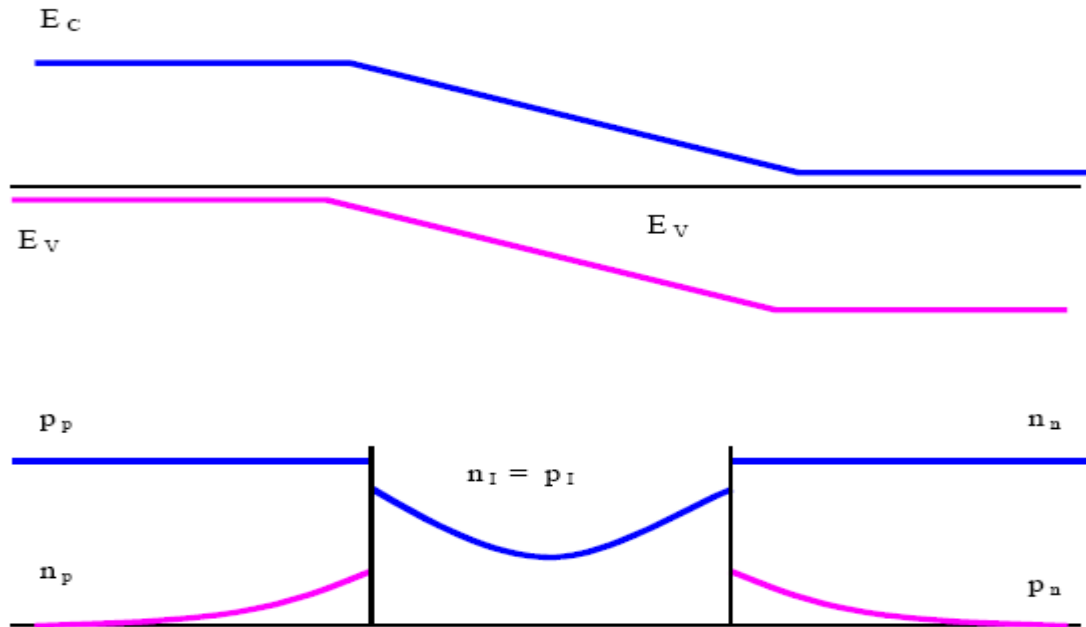
$$t_s = \tau \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_r}\right) \quad (2.2.32)$$

όπου I_f , I_r είναι τα ρεύματα ορθής και ανάστροφης πόλωσης αντίστοιχα. Σημαντικό ρόλο όπως φαίνεται παίζει ο μέσος χρόνος ζωής των φορέων τ . Μια πιο πολύπλοκη

σχέση προσδιορίζει το χρόνο μετάβασης (transition time). Οι χρόνοι αυτοί καθορίζουν και τη μέγιστη συχνότητα διακοπής της διόδου.

Σχηματικά μια διόδος p-i-n και τα βασικά χαρακτηριστικά της





Εικόνα 2.2.13 Δίοδος pin. α) Δομή, β) Προσμίξεις, γ) Κατανομή πυκνότητας φορτίου, δ) Ηλεκτρικό πεδίο, ε) Ενεργειακό διάγραμμα, ζ) Συγκέντρωση φορέων.

2.2.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Σε ένα ημιαγωγό που για παράδειγμα προσπίπτουν φωτόνια ενέργειας $h\nu > E_g$, μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας ταυτόχρονα μια οπή στην ζώνη σθένους. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί επιπλέον συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών Δ_n , Δ_p . Αυτό αποτελεί ένα κλασσικό παράδειγμα έγχυσης φορέων στον ημιαγωγό. Η οπτική διέγερση (G^0) συνοδεύεται και από θερμική διέγερση (g^t). Οι διεγέρσεις αυτές συνυπάρχουν (και αντισταθμίζονται) με την διαδικασία ανασύνδεσης των φορέων που επιτελείται στο υλικό με ρυθμό r . Το δυναμικό σύστημα στο οποίο αναφερθήκαμε περιγράφεται αναλυτικά από την διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = G^0 + g^t - r \Rightarrow \frac{d(\Delta p)}{dt} = G^0 - R \quad (2.2.33)$$

, όπου $R = -g^t + r$, ο συνολικός αριθμός επανασύνδεσης φορέων στο υλικό. Το μέγεθος αυτό είναι ανάλογο των τελικών συγκεντρώσεων n και p που υπάρχουν πια στο υλικό. Πιο συγκεκριμένα θεωρώντας υλικό τύπου n , ισχύει για τις μεταβολές Δ_n , Δ_p : $\Delta_n \ll n_0$ αλλά $\Delta_p \gg p_0$ όπου $n_0 = N_D$ και $p_0 = n_i^2 / N_D$ παριστάνουν τις συγκεντρώσεις των φορέων στην κατάσταση ισορροπίας (πριν την επιβολή φωτισμού). Οι τελικές συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών n και p (μετά την επιβολή φωτισμού) και την αποκατάσταση της ισορροπίας:

$$\begin{aligned}
 n &= n_o + \Delta n \cong n_o \\
 p &= p_o + \Delta p \cong \Delta p \quad (2.2.34)
 \end{aligned}$$

δηλαδή η συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας μένει σχεδόν σταθερή ενώ η συγκέντρωση των φορέων μειονότητας αυξάνεται σημαντικά.

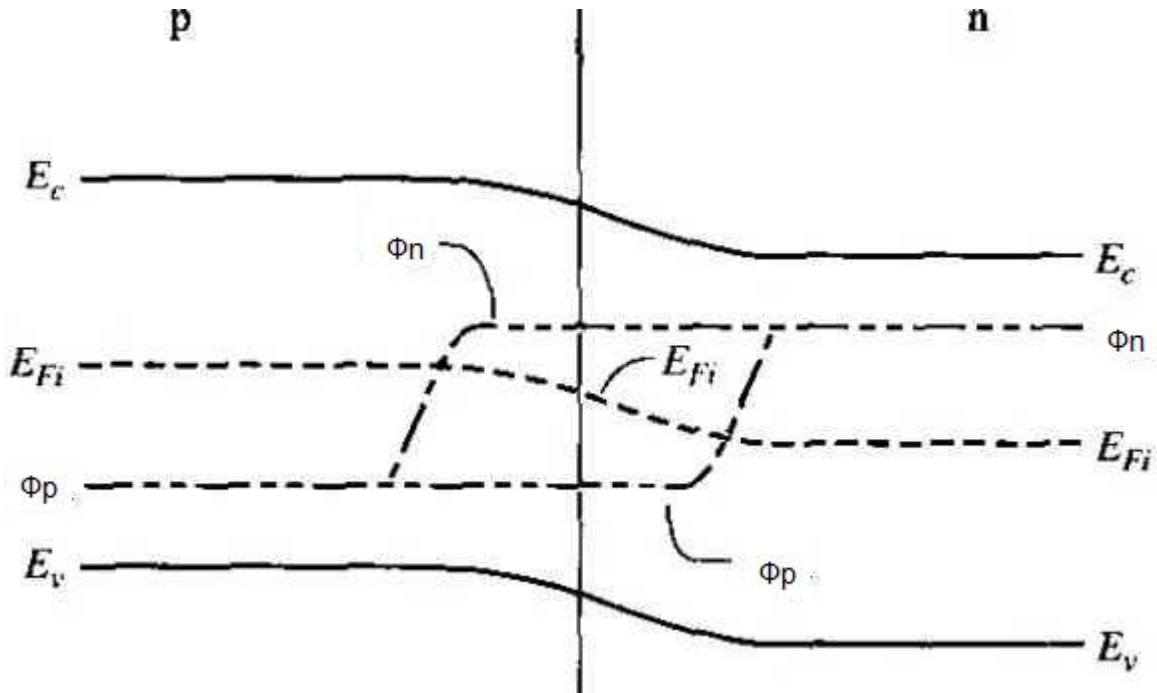
Με βάση τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει για τον συνολικό ρυθμό επανασύνδεσης των φορέων:

$$R - np \cong n_o \Delta p \Rightarrow R - \Delta p \Rightarrow R = \Delta p / \tau_p \quad (2.2.35)$$

, όπου τ_p ο χρόνος ζωής των οπών. Επίσης ισχύει ο γενικός κανόνας έγχυσης φορέων $d(\Delta p) / dt = 0$ οπότε :

$$G^0 = R = \frac{\Delta p}{\tau_p} \Rightarrow \Delta p = G^0 \tau_p \quad (2.2.36)$$

Δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος ζωής των φορέων τόσο περισσότερο μεγαλώνει η συγκέντρωση των εγχόμενων φορέων ($\Delta_n = \Delta_p$) με την προϋπόθεση βέβαια ότι οι άλλοι παράγοντες μένουν σταθεροί (π.χ ο ρυθμός διέγερσης φορέων). Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν οι συγκεντρώσεις φορέων σε έναν ημιαγωγό διαταραχθούν (π.χ όταν υπάρχει έγχυση φορέων), χρησιμοποιείται πλέον η έννοια της στάθμης quasi-Fermi και όχι η Fermi. Η τελευταία διασπάται πλέον σε δύο διακριτές στάθμες quasi-Fermi, μία για τα ηλεκτρόνια Φ_n και μία για τις οπές Φ_p .



Εικόνα 2.2.14 Ενεργειακό διάγραμμα ημιαγωγού σε μη θερμοδυναμική ισορροπία

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις για την συγκέντρωση φορέων διαμορφώνονται ως εξής :

$$\begin{aligned}n &= (n_o + \Delta n) = N_c \exp[-(E_c - \Phi_n) / kT] \\p &= (p_o + \Delta p) = N_v \exp[-(\Phi_p - E_v) / kT] \quad (2.2.37)\end{aligned}$$

Αφού $n \cong n_o$ για τον φωτιζόμενο ημιαγωγό τύπου n συμπεραίνουμε ότι $\Phi_n \cong Ef$ δηλαδή η στάθμη Φ_n δεν μετατοπίζεται σημαντικά ενεργειακά ενώ αντίθετα παρατηρείται σημαντική ενεργειακή μετατόπιση της Φ_p προς την κορυφή της ζώνης σθένους. Όσο περισσότερη η έγχυση φορέων τόσο μεγαλύτερος γίνεται και ο ενεργειακός διαχωρισμός των Φ_n και Φ_p .

Να σημειώσουμε ότι σε υλικά με έμμεσο ενεργειακό διάκενο όπως είναι το πυρίτιο προκειμένου να επανασυνδεθεί ένα ηλεκτρόνιο μέσω του ενεργειακού διακένου θα πρέπει να μεταβληθεί τόσο η ενέργεια του όσο και η ορμή του. Αυτός είναι και ο λόγος που στο πυρίτιο η εκπομπή φωτός δεν είναι αρκετή για την απαγωγή της εκλυόμενης ενέργειας κατά την επανασύνδεση. Εδώ η εκπομπή φωτός συνυπάρχει με έντονες ταλαντώσεις πλέγματος (φωνόνια) οι οποίες εξασφαλίζουν την διατήρηση της ενέργειας κατά την επανασύνδεση. Γ αυτό και το πυρίτιο δεν είναι κατάλληλο για παραγωγή διόδων εκπομπής φωτός (LEDS).

2.2.6 ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΒΑΘΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ (ΠΑΓΙΔΕΣ)

Για τα ημιαγώγιμα υλικά με έμμεσο ενεργειακό διάκενο η επανασύνδεση φορέων επιτυγχάνεται συνήθως μέσα από στάθμες που βρίσκονται στο κέντρο του ενεργειακού διακένου και εισάγονται πρακτικά στο υλικό από τις ατέλειες (δηλαδή προσμίξεις που δεν υπακούουν στο υδρογονικό μοντέλο π.χ πρόσθετα άτομα που καταλαμβάνουν παραπλεγματικές θέσεις). Οι στάθμες αυτές ονομάζονται βαθιές ενεργειακές στάθμες και έχουν τεράστια βιομηχανική σημασία για τον ποιοτικό έλεγχο των ημιαγώγιμων υλικών.

Η βασική ιδέα για την επανασύνδεση φορέων μέσα από ενεργειακές στάθμες συνοψίζεται στα ακόλουθα στάδια:

- 1) Ένα ηλεκτρόνιο που βρισκόταν σε βαθιά ενεργειακή στάθμη καταρρέει στην ζώνη σθένους όπου επανασυνδέεται με μια οπή
- 2) Η παραπάνω διαδικασία καταλήγει σε μια κενή βαθιά στάθμη
- 3) Ηλεκτρόνιο από την ζώνη αγωγιμότητας καταρρέει προς την κενή βαθιά ενεργειακή στάθμη όπου και παραμένει «παγιδευμένο» . Επανερχόμαστε στο πρώτο στάδιο και έτσι ένας κύκλος επανασύνδεσης φορέων ξεκινά.

Οι κυριότερες ιδιαιτερότητες για την επανασύνδεση μέσα από βαθιές στάθμες είναι ότι η αποδιδόμενη ενέργεια σε κάθε βήμα είναι $\cong E_g / 2$ και ότι οι απαραίτητες μεταβολές στην ορμή των φορέων ελέγχονται ικανοποιητικά από τις βαθιές στάθμες. Μάλιστα αυτός ο τύπος επανασύνδεσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα ταχύς.

Μία υψηλή θεωρία για την επανασύνδεση φορέων μέσα από βαθιές στάθμες αναπτύχθηκε από τους Shockley και Read. Η βασική ιδέα είναι ότι για να περιγραφεί σωστά ο παραπάνω μηχανισμός θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι τα ηλεκτρόνια μπορούν να διεγερθούν από την βαθιά στάθμη στην ζώνη αγωγιμότητας (θερμική διέγερση) και αντίστοιχα οι οπές προς την ζώνη σθένους. Αυτές οι διαδικασίες είναι αντίστροφες αυτών που περιγράψαμε και «ανταγωνίζονται» την επανασύνδεση. Ορίζονται τώρα 4 ρυθμοί για την επανασύνδεση φορέων:

- r_1 , ο ρυθμός παγίδευσης ηλεκτρονίων
- r_2 , ο ρυθμός εκπομπής ηλεκτρονίων
- r_3 , ο ρυθμός σύλληψης οπών
- r_4 , ο ρυθμός εκπομπής οπών.

Οι εκφράσεις για τα r_i αποδεικνύονται όταν εξετάσουμε τα r_1, r_2 σε θερμοδυναμική ισορροπία. Η πιθανότητα να είναι κατειλημμένη από ηλεκτρόνιο μία βαθιά στάθμη με ενέργεια E_T στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, δίνεται από την στατιστική Fermi-Dirac και είναι :

$$f_T = \frac{1}{1 + \exp[(E_T - E_f) / kT]} \quad (2.2.38)$$

όμως ο ρυθμός r_1 είναι ανάλογος προς την συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων και την συγκέντρωση κενών βαθιών σταθμών, οπότε μαθηματικά έχουμε:

$$r_1 = nN_T[1 - f_T] = \sigma_n V_{th} n N_T [1 - f_T] \quad (2.2.39)$$

, όπου N_T η συγκέντρωση των προσμίξεων που εισάγουν τις βαθιές ενεργειακές στάθμες στο ενεργειακό διάκενο του υλικού και σ_n παριστάνει την διατομή παγίδευσης για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια από κενή βαθιά στάθμη. Το γινόμενο μάλιστα $\sigma_n V_{th}$ παριστάνει τον όγκο του υλικού που σαρώνεται στην μονάδα του χρόνου από την βαθιά στάθμη (κάθε ηλεκτρόνιο που εισέρχεται στον όγκο αυτό, παγιδεύεται από την βαθιά στάθμη). Με αντίστοιχους συλλογισμούς καταλήγουμε στο ότι $r_2 \cong e_n N_T f_T$, όπου e_n δηλώνει την πιθανότητα, ανά μονάδα χρόνου, για ένα ηλεκτρόνιο παγιδευμένο σε βαθιά στάθμη να διεγερθεί προς την ζώνη αγωγιμότητας. Μαθηματικά για το e_n ισχύει:

$$r_1 = r_2 \Rightarrow \sigma_n V_{th} n N_T [1 - f_T] = e_n N_T f_T \Rightarrow \sigma_n V_{th} n \frac{[1 - f_T]}{f_T} = e_n \quad (2.2.40)$$

και από τον τύπο για το f_T προκύπτει με αντικατάσταση:

$$e_n = \sigma_n V_{th} N_c \exp[-(E_c - E_T) / kT] \quad (2.2.41)$$

Εργαζόμενοι αντίστοιχα και για τα r_3, r_4 έχουμε συνολικά :

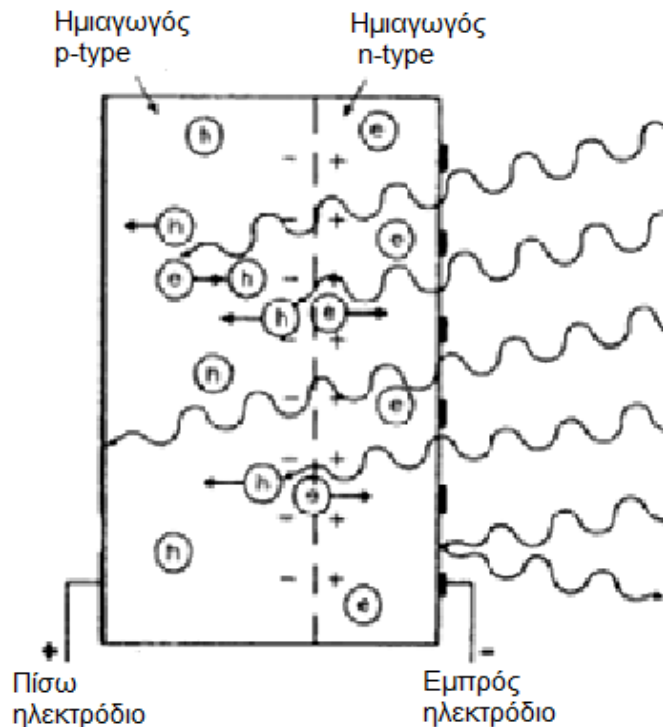
$$\begin{aligned} r_1 &= \sigma_n V_{th} n N_T [1 - f_T] \\ r_2 &= N_T f_T \sigma_n V_{th} N_c \exp[-(E_c - E_T) / kT] \\ r_3 &= \sigma_p V_{th} p N_T [1 - f_T] \\ r_4 &= N_T [1 - f_T] \sigma_p V_{th} N_v \exp[-(E_T - E_v) / kT] \end{aligned} \quad (2.2.42)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για την περίπτωση που έχει αποκατασταθεί η ισορροπία αλλά παραμένουν γενικά σε ισχύ με την προϋπόθεση ότι οι τιμές για τα n, p τροποποιούνται λαμβάνοντας υπόψη την διεργασία έγχυσης [δηλαδή $\Delta_p (= \Delta_n) = G^0 \cdot \tau$] και επιπλέον ο συντελεστής πληρότητας f_T δεν δίνεται από την συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac αλλά από την γενική σχέση $f_T = \frac{n_T}{N_T} = \frac{r_1 + r_4}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}$, όπου

n_T η συγκέντρωση ηλεκτρονίων που βρίσκονται παγιδευμένα στις βαθιές ενεργειακές στάθμες με ολική συγκέντρωση N_T . Επίσης στην μόνιμη κατάσταση ο συνολικός αριθμός επανασύνδεσης φορέων πρέπει να είναι $R = r_1 - r_2 = r_3 - r_4$, δεδομένου ότι οι διαφορές αυτές αντιπροσωπεύουν τον συνολικό αριθμό με τον οποίο εξαφανίζονται ηλεκτρόνια και οπές από τις αντίστοιχες ζώνες. Ακόμη επειδή $R \approx np - n_i^2$ και δεδομένου ότι στην θερμοδυναμική ισορροπία ισχύει $np = n_i^2$, το R αυξάνει καθώς απομακρυνόμαστε από την κατάσταση ισορροπίας. Επίσης αν ένας από τους όρους $(E_c - E_T)$ ή $(E_T - E_v)$ είναι μικρός συγκριτικά με την τιμή E_g τότε ο παρονομαστής αυξάνει εκθετικά μειώνοντας δραστικά το R . Αυτός είναι και ο λόγος που στάθμες του ενεργειακού διακένου που βρίσκονται κοντά στις ζώνες (αγωγιμότητας και σθένους αντίστοιχα) δεν μπορούν να δράσουν σαν αποδοτικά κέντρα για την επανασύνδεση φορέων. Τέλος να αναφερθεί ότι για υλικό τύπου n στο οποίο γίνεται επανασύνδεση φορέων μέσα από βαθιές ενεργειακές στάθμες, ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας δίνεται από την σχέση $\tau = \Delta_p / R$ και αντίστοιχα για υλικό τύπου p ισχύει $\tau = \Delta_n / R$.

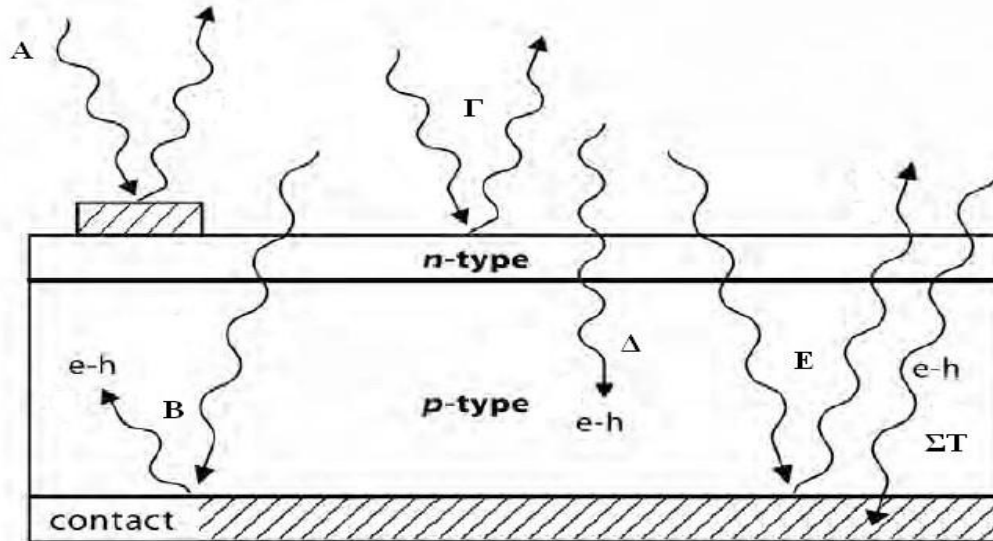
2.3 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο βασίζεται σε μία δίοδο p-n με πολύ λεπτή και έντονα νοθευμένη περιοχή επιφάνειας. Η επιφάνεια ακτινοβολίας μπορεί να είναι η περιοχή p ή η περιοχή n. Στα στοιχεία πυριτίου, η επιφάνεια ακτινοβολίας είναι η περιοχή n. Όταν το στοιχείο φωτίζεται, τότε τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μπορούν να απορροφηθούν από τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια και να προκαλέσουν τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής τα οποία διαχωρίζονται αμέσως λόγω του εσωτερικού ηλεκτροστατικού πεδίου E_0 . Τα ηλεκτρόνια έτσι ολισθαίνουν προς την επιφανειακή περιοχή και αντίστοιχα οι οπές προς την p περιοχή. Συνεπώς δημιουργείται μία τάση ανοιχτού κυκλώματος ανάμεσα στους ακροδέκτες της διάταξης και η p περιοχή είναι θετικά φορτισμένη σε σχέση με την επιφανειακή περιοχή. Χωρίς την ύπαρξη του ηλεκτροστατικού πεδίου E_0 δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν τα φωτοδιεγειρόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών και να συσσωρευτούν επιπλέον ηλεκτρόνια στην επιφανειακή περιοχή και επιπλέον οπές στην p περιοχή.



Εικόνα 2.3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΦΒ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΕ ΗΛΙΑΚΟ ΚΥΤΑΡΡΟ

Στα φ/β στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι στο περιβάλλον.



Εικόνα 2.3.2: Ανάκλαση και απορρόφηση ακτινοβολίας. Α,Ε: Ανάκλαση στους μεταλλικούς ακροδέκτες. Β: Ανάκλαση στον μεταλλικό ακροδέκτη και μετέπειτα απορρόφηση της ακτινοβολίας. Γ: Ανάκλαση στην επιφάνεια τύπου n. Δ:Απευθείας απορρόφηση της ακτινοβολίας. ΣΤ: Απορρόφηση ακτινοβολίας στον ακροδέκτη.

Ακολουθως, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος των φωτονίων που έχουν ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο. Για αυτά τα φωτόνια, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διάφανο σώμα. Τα φωτόνια που έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το E_g , απορροφούνται και δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με ενέργεια h^*v , όπου h η σταθερά του Planck και v η συχνότητά τους. Επειδή τα διεγερμένα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε θερμική ισορροπία στην ζώνη αγωγιμότητας μόνο όταν έχουν ενέργεια περίπου ίση με το E_g , το υπόλοιπο της ενέργειας που απορρόφησαν, $h^*v - E_g$ πρέπει να χαθεί. Αυτή η ποσότητα ενέργειας μεταφέρεται στις πλεγματικές ταλαντώσεις υπό μορφή θερμότητας καθώς τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται από τα ταλαντούμενα άτομα. Τα φωτόνια με κατάλληλη ενέργεια για να διεγείρουν τον ημιαγωγό, απορροφούνται πολύ πιο εύκολα κοντά στην επιφάνεια που ακτινοβολείται και λιγότερο εύκολα στο βάθος του υλικού. Η ροή των φωτονίων Φ εντός του ημιαγωγού για ένταση ακτινοβολίας H , δίνεται από τη σχέση

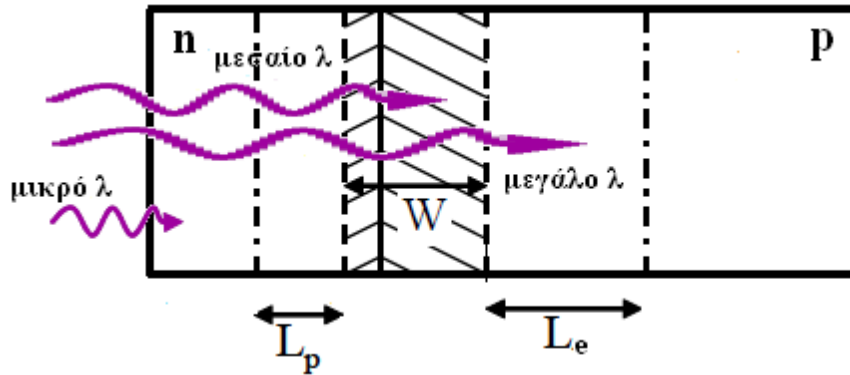
$$\Phi(\lambda) = H / hv = H\lambda / hc \quad (2.3.1)$$

ενώ η ευκολία με την οποία πραγματοποιείται η απορρόφηση των φωτονίων δίνεται από τον ρυθμό μεταβολής της Φ με την αύξηση της απόστασης x που διανύει η ακτινοβολία. Δηλαδή

$$\frac{d\Phi}{dx} = -a\Phi(x), \quad (2.3.2)$$

όπου a ο συντελεστής απορρόφησης. Δεδομένου ότι για $x=0$ $\Phi(x)=\Phi_0$ (μια αρχική τιμή), η λύση της πιο πάνω διαφορικής εξίσωσης δίνει

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-ax) \quad (2.3.3) \text{ (νόμος Beer)}$$



Εικόνα 2.3.3. Απορρόφηση φωτονίων στο φ/β στοιχείο.

Τα ΖΗΟ (ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών) που δημιουργούνται από φωτόνια μεγάλου μήκους κύματος (φωτοδιέγερση), απορροφώνται στην p περιοχή και διαχέονται στην περιοχή αυτή αφού δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Αν ο χρόνος επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων είναι τ_e τότε το ηλεκτρόνιο διαχέεται σε μία μέση απόσταση $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$, όπου: D_e είναι ο συντελεστής διάχυσης στην p περιοχή. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε απόσταση L_e από την περιοχή εξάντλησης μπορούν εύκολα να διαχυθούν μέχρι εκεί. Από την περιοχή αυτή και μετά ολισθαίνουν λόγω του πεδίου E_0 και μεταβαίνουν στην n -περιοχή. Έτσι μόνο τα φωτοδημιουργούμενα ΖΗΟ που βρίσκονται σε απόσταση μήκους διάχυσης L_e των φορέων μειονότητας από τη ζώνη εξάντλησης συνεισφέρουν στο φ/β φαινόμενο. Μόλις ένα ηλεκτρόνιο διαχυθεί μέχρι την ζώνη απογύμνωσης, σαρώνεται προς την n -περιοχή από το πεδίο E_0 , δίνοντας έτσι εκεί ένα επιπλέον αρνητικό φορτίο. Οι οπές που παραμένουν στην p -περιοχή δημιουργούν ένα συνολικό θετικό φορτίο στην περιοχή. Τα ΖΗΟ που δημιουργούνται σε απόσταση από την ζώνη εξάντλησης μεγαλύτερη του μήκους διάχυσης L_e , χάνονται λόγω επανασύνδεσης. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι το μήκος της διάχυσης L_e , είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο. Οι ίδιες αρχές ισχύουν και για τα ΖΗΟ που δημιουργούνται στην n -περιοχή, λόγω της απορρόφησης φωτονίων μικρού μήκους κύματος. Οι οπές που δημιουργούνται εντός

απόστασης μικρότερης του μήκους διάχυσης L_n , μπορούν να φτάσουν μέχρι τη ζώνη εξάντλησης όπου και σαρώνονται στην p-περιοχή. Επομένως η φωτοδιέγερση των ΖΗΟ που συνεισφέρει στο φ/β φαινόμενο λαμβάνει χώρα στην περιοχή μήκους L_n+W+L_e . Αν οι ακροδέκτες της διάταξης είναι βραχυκυκλωμένοι, τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια της n-περιοχής μπορούν να ρεύσουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και να εξουδετερώσουν τις οπές στην p-περιοχή. Το ρεύμα που οφείλεται στη ροή των φωτοδιεγερμένων φορέων, ονομάζεται φωτόρευμα I_{ph} . Το φωτόρευμα εξαρτάται από παράγοντες όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης, το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κ.α.

2.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα γνωστό ως φωτόρευμα I_{ph} που η τιμή του είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η πυκνότητα του φωτορεύματος περιγράφεται ικανοποιητικά από την σχέση

$$I_{ph}=e \cdot g(L_e+L_p) \quad (2.4.1)$$

όπου e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, g ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών ηλεκτρονίων-οπών (πλήθος ζευγών ηλεκτρονίων-οπών ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα όγκου του ημιαγωγού) και L_e, L_p τα μέσα μήκη διάχυσης ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα.

Η φασματική απόκριση S (ή απόδοση συλλογής ή κβαντική απόδοση) ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του ΦΒ στοιχείου σε σχέση με την φωτονική ροή Φ (το πλήθος φωτονίων που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου). Για ακτινοβολία με μήκος κύματος λ , η φασματική απόκριση είναι :

$$S(\lambda) = \frac{I\Phi(\lambda)}{e\Phi(\lambda+d\lambda)}, \quad (2.4.2)$$

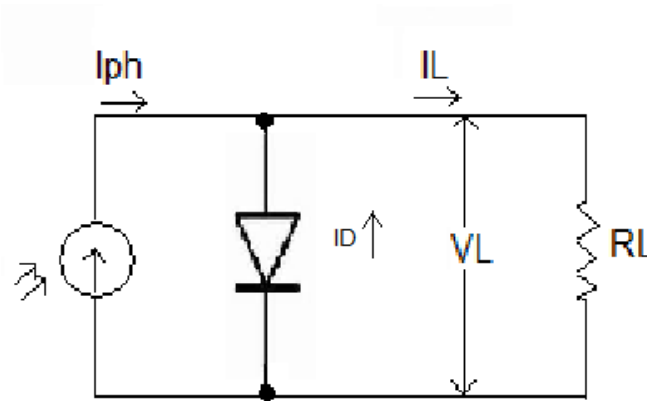
όπου $\Phi(\lambda+d\lambda)$ είναι το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$. Από τα παραπάνω εξάγουμε το συμπέρασμα ότι το συνολικό φωτόρευμα του στοιχείου όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία είναι:

$$I_{ph} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (2.4.3)$$

Η τιμή όμως της φασματικής απόκρισης και κατά συνέπεια και του φωτορεύματος εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες ,όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου ,ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος ημιαγωγού έτσι το φωτόρευμα δίνεται από:

$$I_{ph} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) [1 - R(\lambda)] \Phi(\lambda) d\lambda \quad (2.4.4)$$

Θεωρώντας τώρα ότι ένα ΦΒ στοιχείο είναι μια γεννήτρια ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο ,σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση ,που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα.



Εικόνα 2.4.1 Προσομοίωση ισοδύναμου κυκλώματος

Η περιγραφή κάθε διάταξης και η κατανόηση της λειτουργίας της, μπορεί να γίνει μέσα από το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου περιγράφεται στο σχήμα 2.4.1. Αποτελείται από μία πηγή ρεύματος ,που ελέγχεται από μία δίοδο. Εφαρμόζοντας τον νόμο του Kirchhoff στο σχήμα, προκύπτει ότι ,ισχύει η σχέση

$$I_{ph} = I_L + I_D, \quad (2.2.5)$$

όπου I_{ph} είναι το φωτόρευμα που είναι ανάλογο προς τα φωτόνια που απορροφά το ηλιακό στοιχείο, I_D το ρεύμα που διαρρέει τον κλάδο της διόδου και I_L το ρεύμα που διαρρέει το εξωτερικό φορτίο. Ισχύει

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_L}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.4.6)$$

όπου: I_0 το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

e το φορτίο του ηλεκτρονίου

k η σταθερά του Boltzmann

T η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin

V_L η τάση που δημιουργείται στα άκρα της διόδου από την πρόσπτωση φωτός

Σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος ($R_L \rightarrow \infty$) βρίσκουμε ότι η τιμή της τάσης του στοιχείου V_{oc} (από την αγγλική έκφραση open circuit) είναι :

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \quad (2.4.7)$$

Στην άλλη περίπτωση ,δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα I_{sc} (από την αγγλική έκφραση short circuit) θα ισούται με τον παράγοντα φωτόρευμα $I_{sc}=I_{ph}$.

Όταν όμως το κύκλωμα του ΦΒ στοιχείου κλείσει ,διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται από την λύση της εξίσωσης 2.4.6.

Η ηλεκτρική ισχύς που παρέχει ένα φ/β στοιχείο δίνεται από τη σχέση $P=V/I$ και μεγιστοποιείται για τις τιμές I_m και V_m . Για αυτές τις τιμές προκύπτει η βέλτιστη τιμή της αντίστασης που τροφοδοτεί το στοιχείο $R_L = \frac{V_m}{I_m}$. Ως συντελεστής απόδοσης

ενός φ/β στοιχείου, ορίζεται το πηλίκο της μέγιστης ισχύος προς την συνολική πυκνότητα ηλιακής ισχύος που αυτό λαμβάνει.

Δηλαδή

$$n = \frac{P_m}{P_s} = \frac{V_m * I_m}{H * A}, \quad (2.4.8)$$

όπου : H η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

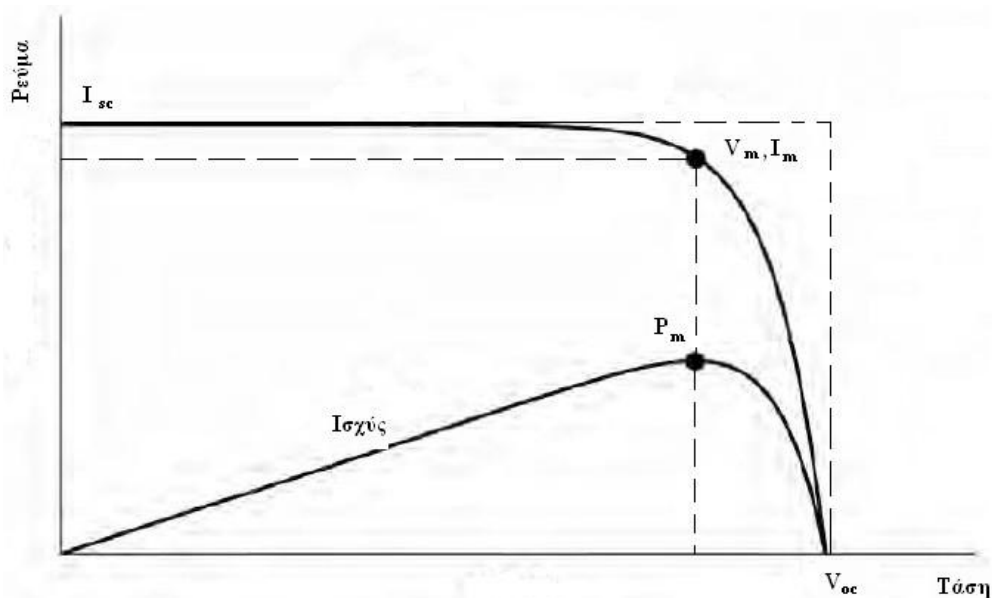
A το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας που ακτινοβολείται

Ως παράγοντας πλήρωσης (Fill Factor, FF) ορίζεται το πηλίκο του γινομένου της τάσης μέγιστης ισχύος επί το ρεύμα μέγιστης ισχύος, προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης επί το ρεύμα βραχυκύκλωσης:

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (2.4.9) .$$

Σχηματικά, στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V ο παράγοντας πλήρωσης προκύπτει ως ο λόγος του εμβαδού που ορίζεται από τις τιμές τάσης και ρεύματος για τις οποίες μεγιστοποιείται η ισχύς προς το εμβαδόν που ορίζεται από την τάση

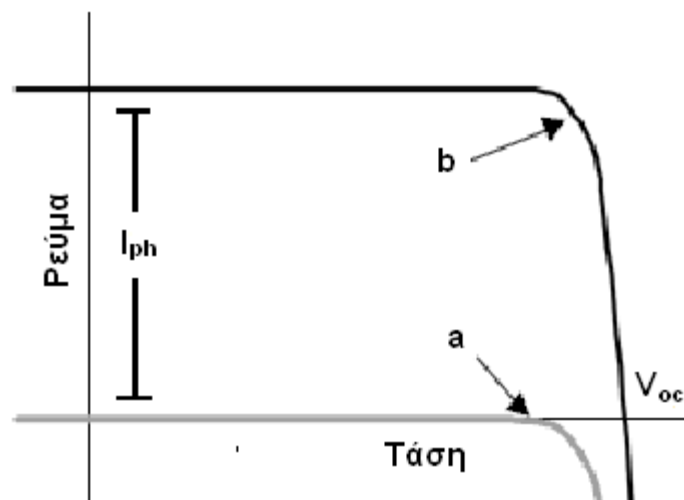
ανοιχτοκύκλωσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Δηλαδή από τον λόγο των δύο ορθογωνίων που φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα.



Εικόνα 2.4.2 Χαρακτηριστική I-V, P-V και τα μεγέθη μέγιστης ισχύος φ/β στοιχείου.

Οι τρεις παραπάνω παράμετροι P_m , το I_{sc} και η V_{oc} είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση και την συμπεριφορά της λειτουργίας και της απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων.

2.4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ

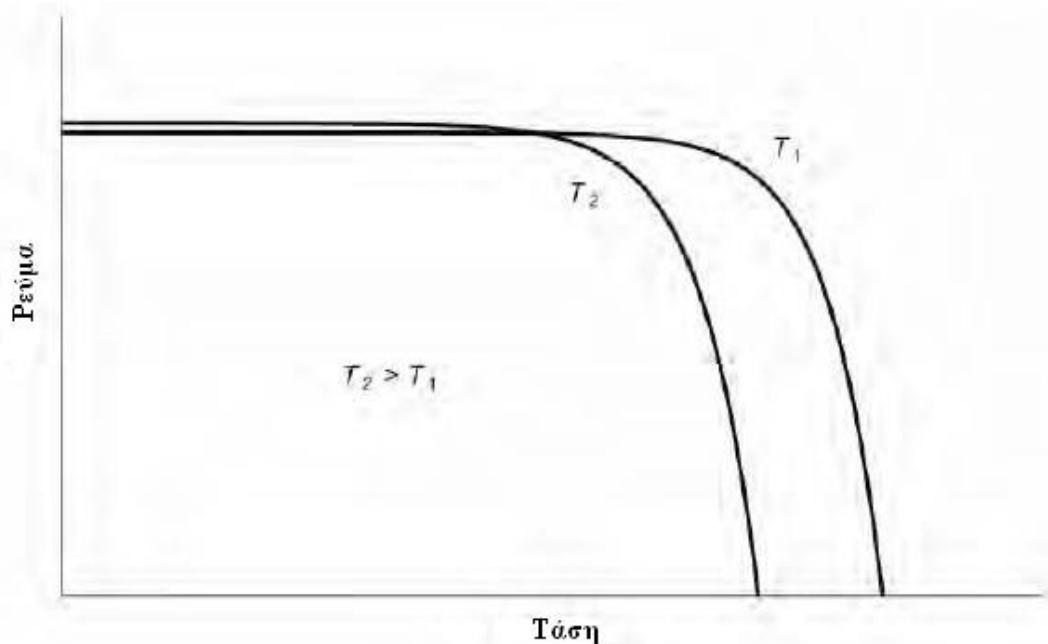


Εικόνα 2.4.3 Χαρακτηριστική I-V ΦΒ στοιχείου α) στο σκοτάδι β) όταν ακτινοβολείται

Η θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου επηρεάζει την καμπύλη I-V με δύο τρόπους. Πρώτον άμεσα από την εξίσωση

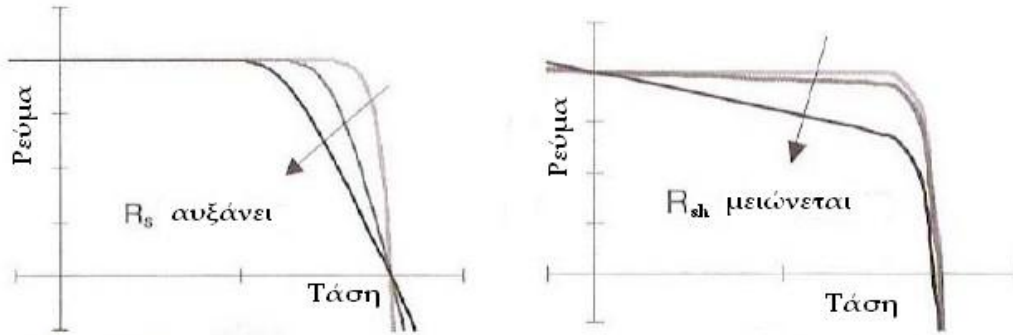
$$I_{ph} = I_0 \left[\exp\left(\frac{e^*V}{k^*T}\right) - 1 \right] \quad (2.4.10)$$

και δεύτερον έμμεσα καθώς το I_0 αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης η θερμοκρασία επηρεάζει τις αντιστάσεις των επαφών και έτσι και τις χαρακτηριστικές. Ακόμα με την αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε αύξηση των φορέων στον ημιαγωγό ,οπότε αύξηση της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων-οπών και έτσι μείωση της απόδοσης τους και μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης.

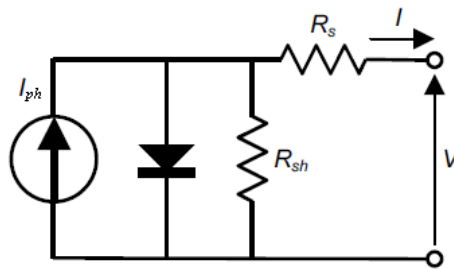


Εικόνα 2.4.4: Χαρακτηριστική I-V του ίδιου φ/β στοιχείου σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες.

Στα πραγματικά στοιχεία εμφανίζονται παρασιτικές αντιστάσεις στο ρεύμα. Η αντίσταση σειράς R_s πηγάζει από το υλικό του ημιαγωγού, τους μεταλλικούς ακροδέκτες και τις εσωτερικές διασυνδέσεις των επιμέρους υλικών. Η παράλληλη αντίσταση R_{sh} οφείλεται στην μη ιδανικότητα της διόδου και σε ανεπιθύμητες προσμίξεις. Η επιρροή τους στις I-V φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Εικόνα 2.4.5: Επίδραση της αντίστασης σειράς και παραλληλίας στην χαρακτηριστική I-V.



Εικόνα 2.4.6: Ηλεκτρικό ισοδύναμο πραγματικού φ/β στοιχείου.

Όποτε η εξίσωση του ρεύματος ενός φ/β στοιχείου γίνεται:

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{\gamma kT / q}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.4.11)$$

2.5 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα ΦΒ στοιχεία χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

1)Κρυσταλλικού πυριτίου

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 14,5-21%
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου με αποδόσεις πλαισίων 13-15%

2)Λεπτών υμενίων

- Άμορφου πυριτίου με ονομαστικής απόδοσης ~7%
- Χαλκοπυριτών CIS/CIGS με ονομαστική απόδοση 7-11%
- Οργανικών με απόδοση ~4%

Ας δούμε όμως αναλυτικότερα μερικά από τα πιο διαδεδομένα είδη ΦΒ στοιχείων:

α) Μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si)

Τα στοιχεία αυτής της τεχνολογίας αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα καθαρού κρυσταλλικού πυριτίου πάχους 300μm. Πάνω από αυτό το στρώμα τοποθετείται μεταλλικό πλέγμα το οποίο λειτουργεί ως ηλεκτρική επαφή και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λειτουργία του ως ηλιακό στοιχείο. Τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου που κατασκευάζονται από καθαρούς κρυστάλλους είναι κυλινδρικής μορφή αλλά συχνά κόβονται σε τετράγωνα για να είναι εύκολη η τοποθέτησή τους στις φωτοβολταϊκές μονάδες. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου παρουσιάζουν την υψηλότερη απόδοση (15% έως 21%) αλλά και το υψηλότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία πυριτίου.



Εικόνα 2.5.1 : Κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου

β) Πολυκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου(MultiCrystalline Silicon, mc-Si)

Η κατασκευή αυτών των στοιχείων προκύπτει από μεγάλες ορθογώνιες ράβδους καθαρού πυριτίου που βρίσκονται μέσα σε ειδικούς κλιβάνους στους οποίους ψύχεται αργά τήγμα πυριτίου για τη δημιουργία μεγάλων κρυστάλλων. Τα στοιχεία αυτά είναι εξαρχής τετράγωνης μορφής και μεγαλύτερου μεγέθους από τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία αφού προκύπτουν απευθείας από ορθογώνιες ράβδους. Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 300 μm. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ).



Εικόνα 2.5.2 : Κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου

γ) Φωτοβολταικά στοιχεία λεπτής μεμβράνης.

Τα στοιχεία που κατασκευάζονται με αυτό τον τρόπο έχουν πάχος μερικών μόνο μικρών. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 6 και 8%. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι λόγω και της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Τα στοιχεία αυτά επιδέχονται βελτιώσεων και αναμένεται ότι τα χαρακτηριστικά τους θα βελτιωθούν τα επόμενα χρόνια.



Εικόνα 2.5.3 : Κυψέλη λεπτής μεμβράνης

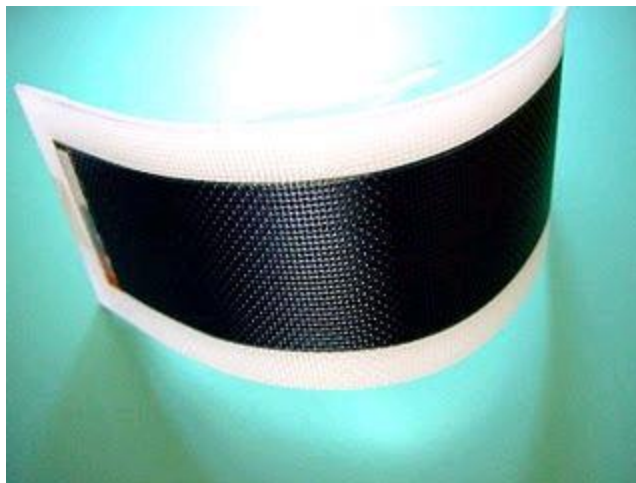
Τα πιο γνωστά υλικά που αποτελούν τις κυψέλες αυτές είναι:

- Άμορφο πυρίτιο (a-Si).
- Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂).
- Τελουριούχο κάδμιο (CdTe).
- Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Άμορφο πυρίτιο (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Ο προσδιορισμός άμορφο σημαίνει ότι ο κρύσταλλος δεν έχει συμμετρία ή περιοδικότητα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά Φ/Β,

όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 mm ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 mm.



Εικόνα 2.5.4 : Κυψέλη άμορφου πυριτίου

δ) Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω), ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου (HIT). Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 16,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 18,8%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

ε) Άλλες τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

-Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si)

-Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

Τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση (μετατρέπουν έως και το 21% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό). Τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία έχουν ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση (13%-15%), είναι όμως φθηνότερα από τα μονοκρυσταλλικά. Τα "άμορφα" έχουν χαμηλότερη απόδοση (6%-8%) αλλά είναι τα οικονομικότερα. Χρειάζονται όμως μεγαλύτερη επιφάνεια για να δώσουν την ίδια ισχύ με τα μονοκρυσταλλικά ή τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά και υπάρχουν αμφιβολίες όσο αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις. Εν κατακλείδι η επιλογή του είδους των φωτοβολταϊκών είναι συνάρτηση των αναγκών, του διαθέσιμου χώρου ή ακόμα και της οικονομικής ευχέρειας του χρήστη.

Κεφάλαιο 3 : ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ

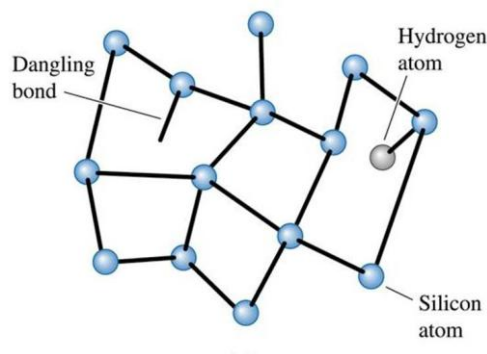
3.1 ΛΕΠΤΑ ΥΜΕΝΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Το πυρίτιο είναι το χημικό στοιχείο με χημικό σύμβολο Si, ατομικό αριθμό 14 και ατομική μάζα 28,0855 amu. Είναι ένα μεταλλοειδές που ανήκει στην ομάδα IVA του περιοδικού πίνακα μαζί με τον Άνθρακα, το Γερμάνιο, τον Κασσίτερο και τον Μόλυβδο. Αυτό σημαίνει ότι έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και είναι τετρασθενές και ηλεκτροθετικότερο από τον άνθρακα. Είναι το όγδοο στο σύμπαν και δεύτερο στο φλοιό της Γης, αποτελώντας συγκεκριμένα το 25,7% της μάζας του, όπου όμως σπάνια βρίσκεται σε ελεύθερη στοιχειακή κατάσταση. Η πιο συνηθισμένη μορφή του στη διαστρική σκόνη, σε αστεροειδείς, δορυφόρους και πλανήτες είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂).

Το πυρίτιο εμφανίζεται σε δύο αλλοτροπικές μορφές: μια άμορφη και μια κρυσταλλική. Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει μεταλλική λάμψη, είναι σκληρό και έχει σκούρο γκρι χρώμα. Είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου και δεν είναι ούτε ελατό ούτε όλκιμο. Είναι ημιαγωγός και την ιδιότητα αυτή διατηρεί ακόμη και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Δεν είναι καλός αγωγός της θερμότητας και αντιδρά με αλογόνα ή αραιά αλκάλια .

Άμορφο πυρίτιο

Το άμορφο υδρογονωμένο πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός η δομή του οποίου παρουσιάζει υψηλή αταξία. Οι οπτοηλεκτρονικές του ιδιότητες εξαρτώνται από το μεγάλο αριθμό ατελειών της δομής του. Οι ομοιοπολικοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων του πυριτίου είναι παρόμοιοι με τους δεσμούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Τα άτομα του πυριτίου έχουν τον ίδιο αριθμό γειτονικών ατόμων και κατά μέσο όρο το ίδιο μήκος και γωνία δεσμού. Πιο συγκεκριμένα τα άτομα Si είναι τοποθετημένα στις κορυφές ενός τετράεδρου και το μέσο μήκος δεσμού Si-Si είναι 2.35 Å ενώ οι γωνίες δεσμών αποκλίνουν από την τιμή των 109.5°, για την τετραεδρική δομή. Εξαιτίας της τάξης μικρής εμβέλειας που παρουσιάζει (<3 nm) οι ιδιότητες του είναι παρόμοιες με αυτές του κρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 3.1: Δομή a-Si:H όπου διακρίνεται και ένας αιωρούμενος δεσμός.

Στο a-Si:H η κυριότερη ατέλεια στο πλέγμα είναι τα άτομα του πυριτίου που είναι ενωμένα με τρία άτομα αντί για τέσσερα. Έτσι στο άτομο του πυριτίου παραμένει ένα αδέσμευτο ηλεκτρόνιο σε ένα ανπιδεσμικό τροχιακό, υπάρχει δηλαδή ένας αιωρούμενος δεσμός στο πλέγμα (dangling bond). Το καθαρό άμορφο πυρίτιο έχει πυκνότητα ατελειών της τάξης του 10^{20} cm^{-3} . Με την προσθήκη του υδρογόνου παθητικοποιούνται οι ελεύθεροι δεσμοί. Λεπτά υμένια a-Si:H τα οποία περιέχουν ~10% υδρογόνου στο πλέγμα παρουσιάζουν μια πυκνότητα ατελειών ελαττωμένη κατά τέσσερις ή πέντε τάξεις μεγέθους (περίπου ένας ελεύθερος δεσμός για κάθε ένα εκατομμύριο άτομα πυριτίου). Το άμορφο πυρίτιο εμφανίστηκε πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 70 και αποτέλεσε το υλικό για το πρώτο φωτοβολταϊκό κελί λεπτών υμενίων που παρασκευάστηκε σε μεγάλη κλίμακα. Απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία 40 φορές πιο αποτελεσματικά απ' ότι ένας μονοκρυσταλλός πυριτίου στην περιοχή του ορατού φάσματος και συνεπώς απαιτείται πολύ μικρότερο πάχος υλικού (~ 1 μm) για την παρασκευή ενός φωτοβολταϊκού κελιού. Αυτός είναι ένας από τους κυριότερους λόγους για την ανάπτυξη της βιομηχανίας των λεπτών υμενίων τις τελευταίες δεκαετίες, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Το κυριότερο μειονέκτημα του είναι οι χαμηλοί ρυθμοί εναπόθεσης (~1 $\text{\AA}/\text{s}$) όταν απαιτείται υλικό κατάλληλο για εφαρμογή σε φωτοβολταϊκά κύτταρα. Φωτοβολταϊκά κελιά με απόδοση ίση με 13% έχουν παρασκευασθεί στο εργαστήριο ενώ τα εμπορικής κλίμακας έχουν απόδοση ~8%. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι το η υποβάθμιση της απόδοσης τους κατά την έκθεση τους στο φως (light induced degradation: Staebler-Wronski effect) η οποία αντιμετωπίζεται εν μέρη με την προσθήκη του υδρογόνου στο πλέγμα, λόγω κορεσμού των ελεύθερων δεσμών οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την επανασύνδεση των φορέων φορτίου.

Μικροκρυσταλλικό Υδρογονωμένο Πυρίτιο ($\mu\text{-Si:H}$)

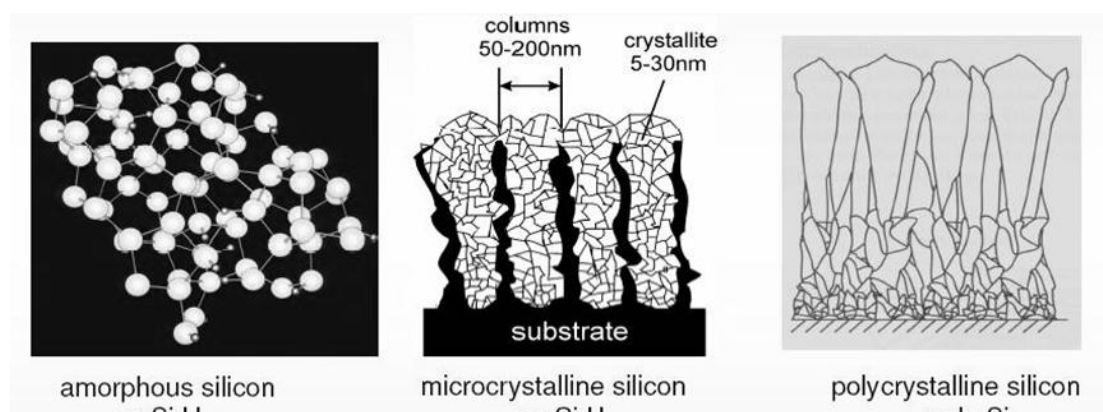
Το $\mu\text{-Si:H}$ είναι ένα πολύπλοκο υλικό το οποίο αποτελείται από κρυστάλλους οι οποίοι αναπτύσσονται μέσα σε μια άμορφη δομή. Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να γίνει ένας διαχωρισμός του πολυκρυσταλλικού πυριτίου το οποίο παρασκευάζεται σε υψηλές θερμοκρασίες ($>600^\circ\text{C}$) με το μικροκρυσταλλικό πυρίτιο το οποίο περιγράφεται εδώ. Πιο συγκεκριμένα το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι ένα κρυσταλλικό υλικό με μέγεθος κρυστάλλων μεγαλύτερο των 100 nm το οποίο δεν περιέχει καθόλου άμορφη φάση. Το μικροκρυσταλλικό υδρογονωμένο πυρίτιο αποτελείται από μικρότερους κρυσταλλικούς κόκκους, οι οποίοι συνήθως κυμαίνονται από 20-30 nm. Περιέχει επιπλέον άμορφη φάση καθώς και τα όρια των κόκκων. Το $\mu\text{-Si:H}$ παρουσιάζει μια ποικιλία δομών οι οποίες εξαρτώνται τόσο από τις συνθήκες εναπόθεσης όσο και από το υπόστρωμα εναπόθεσης. Εξαιτίας αυτής της ποικιλίας δομών στη βιβλιογραφία αναφέρεται επίσης ως νανοκρυσταλλικό πυρίτιο, αλλά και ως πολύμορφο πυρίτιο όταν έχει παρασκευασθεί κοντά στο σημείο μετάβασης προς άμορφο υλικό όπου το μέγεθος των κρυστάλλων είναι μικρότερο από 10 nm. Μικρή μεταβολή των παραμέτρων εναπόθεσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μεταβολές στο ποσοστό κρυσταλλικότητας των υμενίων, στο μέγεθος των κόκκων καθώς και στη διεύθυνση των κρυστάλλων σε στήλες. Κάτω από συνθήκες που ευνοούν το σχηματισμό υλικού με υψηλό ποσοστό κρυσταλλικότητας, σχηματίζονται κρύσταλλοι πυριτίου με καθ' ύψος ανάπτυξη (columnar growth). Οι κρύσταλλοι αυτοί περιέχουν ατέλειες όπως αιωρούμενους δεσμούς (dangling bonds), τους οποίους συναντάμε μόνο στα όρια των κρυστάλλων (grain boundaries). Ο χώρος ανάμεσα στις στήλες των κρυστάλλων συμπληρώνεται από άμορφο πυρίτιο ή από κενά (voids). Στα όρια των κρυστάλλων, όπου όπως είδαμε είναι περιοχές με υψηλή πυκνότητα ατελειών, μπορούν να εισχωρήσουν προσμείξεις, όπως το οξυγόνο. Αυτές οι προσμείξεις επιδρούν σημαντικά στις οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες του υλικού. Η παθητικοποίηση των αιωρούμενων δεσμών, που περιέχονται στα όρια των κόκκων, με υδρογόνο έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση της ποιότητας του υλικού.

Το μικροκρυσταλλικό υδρογονωμένο πυρίτιο παρασκευάστηκε για πρώτη φορά από τους Verrek και Marecek το 1968 με εναπόθεση μέσω εκκενώσεων μίγματος υδρογόνου με σιλάνιο στη θερμοκρασία των 600°C . Το 1979 αποδείχθηκε ότι το $\mu\text{-Si:H}$ παρουσιάζει υψηλή ικανότητα εμπλουτισμού (doping efficiency) και εμπλουτίζεται πιο εύκολα από το $\alpha\text{-Si:H}$. Εξαιτίας της χαμηλής ποιότητας των πρώτων εναποτιθέμενων υμενίων $\mu\text{-Si:H}$ (λόγω της μεγάλης πυκνότητας ατελειών στο πλέγμα) και του γεγονότος ότι τα υμένια ήταν ημιαγωγοί n-τύπου, υπήρχε η πεποίθηση ότι το υλικό αυτό δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ενδογενής

στιβάδα στα φωτοβολταϊκά κελιά. Το 1996 οι Meier et al παρασκεύασαν ένα πλήρες μικροκρυσταλλικό κελί με απόδοση 7.7%. Το πέτυχαν αυτό χρησιμοποιώντας αέρια υψηλής καθαρότητας, για να εναποθέσουν υλικό με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Σήμερα το $\mu\text{-Si:H}$ αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για την εφαρμογή του σε φωτοβολταϊκές ιδιοσκευές και αυτό γιατί παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα σε σχέση με το a-Si:H :

1. Υψηλότερη ικανότητα εμπλουτισμού
2. Μεγαλύτερη απορρόφηση στο υπέρυθρο
3. Τα υμένια δεν παρουσιάζουν υποβάθμιση τους κατά την έκθεση τους στο φως.
4. Οι φορείς φορτίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκινησία

Παρόλο που οι κρύσταλλοι του είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότεροι από αυτούς του πολυκρυσταλλικού πυριτίου το οποίο ήδη χρησιμοποιείται για τη βιομηχανική παρασκευή των φωτοβολταϊκών κελιών ικανοποιητικές αποδόσεις μετατροπής πάνω από 9% μπορούν να επιτευχθούν. Και αυτό διότι οι επιφάνειες των κρυστάλλων είναι παθητικοποιημένες με υδρογόνο και συνεπώς το πλέγμα παρουσιάζει μικρότερη πυκνότητα ατελειών και μικρότερη πιθανότητα επανασύνδεσης των φωτοδιεγερμένων φορέων φορτίου.



Εικόνα 3.2: Δομές άμορφου, μικροκρυσταλλικού υδρογονωμένου πυριτίου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Επιπρόσθετα, το $\mu\text{-Si:H}$ μπορεί να συνδυασθεί με το a-Si:H για την παρασκευή φωτοβολταϊκών κελιών διπλής συνδεσμολογίας (microcrystalline/amorphous tandem solar cells). Τα πρώτα κελιά με αυτή τη συνδεσμολογία παρασκευάστηκαν για πρώτη φορά το 1994 στο IMT Neuchâtel και σήμερα μελετώνται ευρέως και από άλλες ερευνητικές ομάδες. Σε σύγκριση με το a-Si:H το $\mu\text{-Si:H}$ απορροφά φωτόνια σε ευρύτερη φασματική περιοχή. Από την άλλη πλευρά,

εντός της περιοχής απορρόφησης, η απορρόφηση του a-Si:H είναι υψηλότερη σε σχέση με του μc-Si:H, καθώς το a-Si:H έχει το άμεσο ενεργειακό χάσμα. Με το συνδυασμό αυτών των δύο υλικών είναι δυνατή η εκμετάλλευση μεγαλύτερου μέρους του ηλιακού φάσματος και κατά συνέπεια η απόδοση μετατροπής του εισερχόμενου φωτός σε ηλεκτρισμό είναι μεγαλύτερη.

3.2 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ

Γενικά πρόκειται για την εναπόθεση ενός στερεού πάνω σε μια θερμαινόμενη επιφάνεια, ως ένα από τα αποτελέσματα της αντίδρασης υλικών σε αέρια φάση. Το άμορφο και το μικροκρυσταλλικό υδρογονωμένο πυρίτιο παρασκευάζονται κυρίως με τη χημική εναπόθεση ενισχυμένη με πλάσμα (PECVD) καθώς η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων:

1. Είναι δυνατή η ομοιόμορφη εναπόθεση σε μεγάλης επιφάνειας υποστρώματα (έως 1 m^2).
2. Παρέχει τη δυνατότητα εναπόθεσης υμενίων σε χαμηλές θερμοκρασίες και έτσι είναι δυνατή η εφαρμογή φθηνών υποστρωμάτων (γυαλιού ή πολυμερών).
3. Απαιτείται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και
4. Μικρή κατανάλωση πρώτων υλών.

Επιπρόσθετα, οι υψηλότερες αποδόσεις μέχρι σήμερα έχουν επιτευχθεί για φωτοβολταϊκά κύτταρα τα οποία έχουν παρασκευασθεί με τη μέθοδο PECVD. Εναλλακτικές τεχνικές εναπόθεσης μc-Si:H με υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης είναι η μέθοδος θερμού νήματος (HWCVD) και η μέθοδος expanding thermal plasma (ETP). Το μc-Si:H παρασκευάζεται συνήθως με τη μέθοδο χημικής εναπόθεσης ενισχυμένης με πλάσμα (PECVD). Για την εναπόθεση λεπτών υμενίων με μικρή πυκνότητα ατελειών ($\sim 10^{16}/\text{cm}^3$), κατάλληλων για εφαρμογή σε φωτοβολταϊκές ιδιοσκευές, απαιτείται υψηλή αραίωση του σιλανίου με υδρογόνο ενώ παράλληλα η συνολική πίεση της διεργασίας κυμαίνεται από 200 mTorr έως 1 Torr. Το σημαντικότερο μειονέκτημα από την εφαρμογή αυτών των συνθηκών είναι οι χαμηλοί ρυθμοί εναπόθεσης ($\sim 1 \text{ \AA/s}$). Οι χαμηλοί αυτοί ρυθμοί ανάπτυξης έχουν ως αποτέλεσμα τους μεγάλους χρόνους εναπόθεσης (πχ περίπου 5h για ένα φιλμ πάχους $1,8 \mu\text{m}$) καθιστώντας έτσι ασύμφορη την βιομηχανική παραγωγή των υμενίων. Επιπλέον, σε σύγκριση με το a-Si:H, το μc-Si:H παρουσιάζει χαμηλότερη απορρόφηση στο ορατό, συνεπώς απαιτείται μεγαλύτερο πάχος υμενίων ($1.5\text{-}3 \mu\text{m}$) για ικανοποιητική οπτική απορρόφηση. Έτσι γίνεται αντιληπτή η σημερινή απαίτηση για την επίτευξη υψηλών

ρυθμών εναπόθεσης. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα θα ήταν η αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος στην εκκένωση η οποία οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης αλλά παράλληλα τα υμένια τα οποία εναποτίθενται είναι χαμηλότερης ποιότητας, παρουσιάζουν δηλαδή υψηλότερη πυκνότητα ατελειών στο πλέγμα. Οι υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης χωρίς ταυτόχρονη υποβίβαση των ιδιοτήτων του υλικού είναι σήμερα μια μεγάλη πρόκληση για την έρευνα. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι απαιτήσεις της σύγχρονης βιομηχανίας λεπτών υμενίων, για την παραγωγή φωτοβολταϊκών κελιών, λαμβάνει υπόψη και την οικονομική άποψη και όχι μόνο την απόδοση των φωτοβολταϊκών κελιών. Με την εφαρμογή άλλων τεχνικών, όπως με τη μέθοδο θερμού νήματος (Hot Wire CVD), έχουν επιτευχθεί αρκετά υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης (στο εργαστήριο). Η μέθοδος αυτή όμως παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι οι θερμοκρασίες εναπόθεσης είναι συνήθως υψηλότερες κατά 100-150 °C σε σχέση με την PECVD ενώ εξαιτίας της θερμικής ακτινοβολίας του νήματος είναι δύσκολη η επίτευξη θερμοκρασιών μικρότερων των 200 °C και συνεπώς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυμερή υλικά ως υποστρώματα. Επιπρόσθετα, η PECVD πλεονεκτεί σε σχέση με άλλες τεχνικές καθώς ήδη εφαρμόζεται για τη βιομηχανική παρασκευή λεπτών υμενίων aSi:H.

Η μέθοδος Plasma-Enhanced CVD (PECVD) έχει ως θετικό ότι πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες σχετικά με την κλασική μέθοδο CVD, όπου η ενέργεια που προσφέρεται για την αντίδραση είναι θερμική. Το πλάσμα δημιουργείται από εναλλασσόμενο πεδίο υψηλής συχνότητας που ιονίζει τα άτομα του αερίου και παράγει ιόντα και ηλεκτρόνια. Τα τελευταία επιταχύνονται από το πεδίο και προσδίδουν την κινητική τους ενέργεια στην πρόσκρουση με τα βαρύτερα ιόντα, οπότε η θερμοκρασία του plasma αυξάνει ακόμη περισσότερο. Η μέθοδος χρησιμοποιείται ειδικά σε περιπτώσεις που πρέπει να αποφευχθούν υψηλές θερμοκρασίες εναπόθεσης, οι οποίες προκαλούν διάχυση προσμίξεων σε ετερογενείς επαφές των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αλλά και εξαχνωση στοιχείων με χαμηλό σημείο τήξης.

3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ

Το πυρίτιο, ανάλογα με την επεξεργασία του, είναι σε μονοκρυσταλλική, πολυκρυσταλλική ή άμορφη κατάσταση, από την οποία παράγονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα λεπτά υμένια (Thin Films) έχουν ως αποτέλεσμα να μειωθεί η κατανάλωση υλικού και επομένως το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Εκτός από τη χρήση μικρότερης ποσότητας υλικού, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι, ότι μπορούν να κατασκευαστούν μονολιθικά πλαίσια ήδη κατά τη διαδικασία απόθεσης.

Αυτό είναι συμφέρον οικονομικά, αλλά επίσης πολύ απαιτητικό τεχνικά, επειδή η επεξεργασία χωρίς ατέλειες αφορά μεγαλύτερη επιφάνεια. Μπορούν να παρασκευασθούν σε μεγάλες επιφάνειες ομοιόμορφα, οι ενεργειακές απαιτήσεις για την παρασκευή τους είναι μικρότερες σε σύγκριση με την παρασκευή του κρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου ενώ παράλληλα απαιτούνται λιγότερες πρώτες ύλες για την παρασκευή τους καθώς το απαιτούμενο πάχος υμενίων είναι πολύ μικρό (πχ. απαιτείται μια στιβάδα πάχους μόλις 1 μm). Τέλος είναι δυνατή η εναπόθεση των υμενίων σε φθηνά υποστρώματα όπως γυαλί και πλαστικό εξαιτίας των χαμηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται κατά την εναπόθεση.

Στα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων Πυριτίου (thin films solar cells TFSCs), τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να αντιπαρατεθεί η χαμηλότερη ως τώρα απόδοσή τους, η οποία περιορίζεται στο 10.1% , ανάλογα με το υλικό. Πάντως, η τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film) είναι σε φάση ανάπτυξης, αφού με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας και χρήση διαφορετικών υλικών αναμένεται αύξηση της απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα, αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Κεφάλαιο 4 : ΜΕΘΟΔΟΣ SCLC

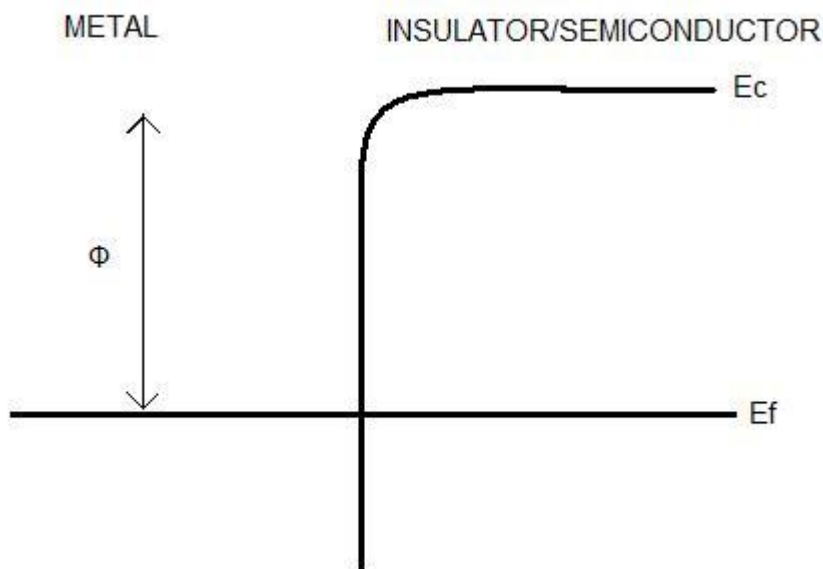
Αγωγιμότητα περιοριζόμενη από φορτία χώρου (SCLC) παρουσιάζεται σε ένα υλικό όταν ο ρυθμός εκπομπής των φορτίων από το ηλεκτρόδιο είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό διάδοσης του φορτίου στο υλικό. Τότε αναπτύσσεται στο εσωτερικό του υλικού μία περιοχή φορτίων χώρου εμποδίζοντας την περαιτέρω διάδοση του φορτίου. Σε χαμηλές τιμές εφαρμοζόμενης τάσης η χαρακτηριστική I-V είναι γραμμική ενώ καθώς η τάση αυξάνεται οι φορείς παγιδεύονται σε παγίδες του υλικού και η ένταση του ρεύματος αποκτά μια πολυωνυμική εξάρτηση από την εφαρμοζόμενη τάση. Υπάρχουν δύο βασικές απαιτήσεις για να παρατηρήσουμε φαινόμενα περιορισμού από φορτία χώρου σε μετρήσιμες τάξεις μεγέθους: α) ένα τουλάχιστον από τα ηλεκτρόδια πρέπει να έχει καλή ωμική επαφή με το μονωτή ώστε να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη τροφοδοσία του μονωτή με πλεονάζοντα ηλεκτρόνια και β) ο μονωτής/ημιαγωγός πρέπει να είναι σχετικά ελεύθερος από ατέλειες που παγιδεύουν τους φορείς μειώνοντας τους την ταχύτητα ολίσθησης και κατά συνέπεια την ένταση του αντίστοιχου ρεύματος.

4.1 Η SCLC ΘΕΩΡΙΑ

Το 1940 οι Mott-Gurney έκαναν μια σημαντική παρατήρηση πάνω στο θέμα των ενεργειακών καταστάσεων ενός μονωτή κατά την επιβολή πεδίου. Συγκεκριμένα παρατήρησαν ότι μπορεί να υπάρξει έγχυση φορέων από κατάλληλη επαφή (ωμική) μέσα σε έναν μονωτή ή ημιαγωγό, κατά ανάλογο τρόπο όπως από μια θερμαινόμενη κάθοδο στο κενό. Στην περίπτωση των ημιαγωγών υπάρχει μια περιοχή φορτίων χώρου που αποτελείται από ακίνητες ιονισμένες προσμίξεις και συγκεντρώσεις ελεύθερων φορέων. Στην συνθήκες ουδετερότητας (χωρίς επιβολή κάποιας τάσης) όπως είναι γνωστό, ισχύει $p=N_a$ και $n=N_d$, όπου p, n οι συγκεντρώσεις ελεύθερων φορέων και N_d, N_a οι συγκεντρώσεις δοτών, αποδεκτών λόγω προσμίξεων. Μετά την επιβολή τάσης στο σύστημα, η συγκέντρωση ελεύθερων φορέων μπορεί να αυξηθεί λόγω της έγχυσης φορέων στην περιοχή κοντά στην επαφή των δύο υλικών. Όταν η συγκέντρωση της έγχυσης αυτής γίνει μεγαλύτερη από την τιμή των ελεύθερων φορέων σε θερμοδυναμική ισορροπία, τα φαινόμενα λόγω φορτίων χώρου συμβαίνουν και μπορούν να παρατηρηθούν. Οι φορείς που εγχέονται επηρεάζουν τα φορτία χώρου αλλάζουν την ισορροπία τους και το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται. Είναι μια αμφίδρομη σχέση όπου το πεδίο που διαμορφώθηκε «οδηγεί» το ρεύμα και το ρεύμα διαμορφώνει το πεδίο. Το ρεύμα που παράγεται λόγω της παρουσίας φορτίων χώρου λέγεται «ρεύμα περιορισμένο λόγω φορτίων χώρου» και από εδώ

και στο εξής θα αναφερόμαστε σε αυτό (και σε όλο τον μηχανισμό) λόγω των αρχικών του στην αγγλική (Space Charge Limited Current), ως SCLC.

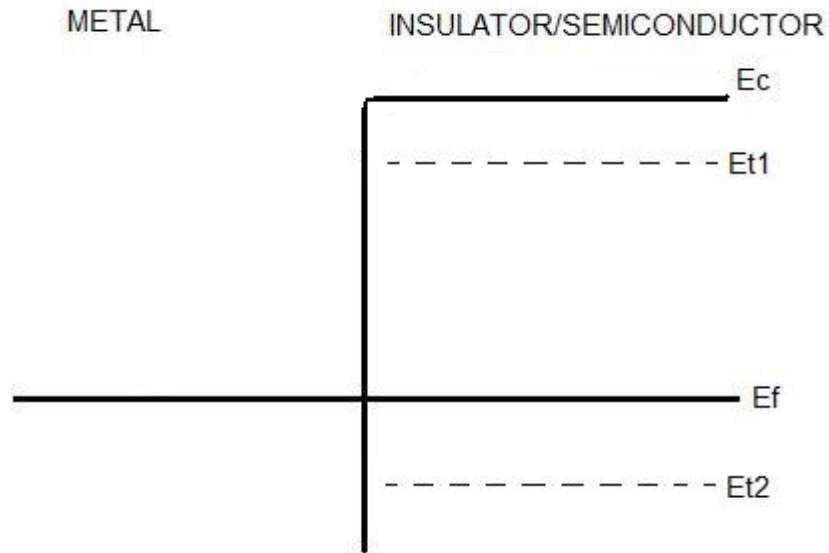
Παρακάτω φαίνεται το ενεργειακό διάγραμμα για μία επαφή μετάλλου ημιαγωγού :



Εικόνα 4.1.1: Ενεργειακό σκαλοπάτι στην επαφή μετάλλου-ημιαγωγού

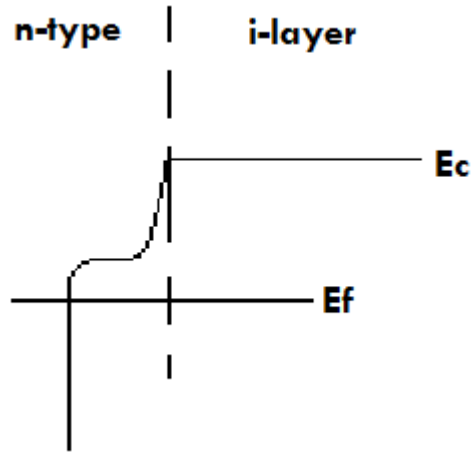
Όταν τα ηλεκτρόνια αποκτήσουν ενέργεια ικανή να ώστε να υπερπηδήσουν το δυναμικό Φ στην ένωση, εγχέονται από το μέταλλο στην ζώνη αγωγιμότητας του υλικού. Οι Mott-Gurney διαπίστωσαν ότι το δυναμικό αυτό Φ δεν είναι μεγάλο και ακόμα ότι και στην θερμοκρασία δωματίου αλλά και σε χαμηλότερη μπορούν να υπάρξουν επαρκή διαθέσιμα ηλεκτρόνια στην επαφή που θα προάγουν την ροή SCLC ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό. Οι συχνές συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τις θερμικές δονήσεις του πλέγματος του υλικού (φωνόνια) αλλά και με τις χημικές προσμίξεις ή τις ατέλειες του υλικού, είναι παράγοντες που επηρεάζουν και ελέγχουν την ροή ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας. Ο κυριότερος όμως παράγοντας που επηρεάζει τον μηχανισμό που περιγράφουμε είναι η παρουσία παγίδων (αλλιώς, βαθιές ενεργειακές στάθμες) που δημιουργούνται από προσμίξεις και ατέλειες στο υλικό και είναι ικανές να δεσμεύσουν φορτία και έτσι να επηρεάσουν το SCLC. Μάλιστα οι Mott-Gurney παρατήρησαν ότι οι παγίδες αυτές που βρίσκονται στο απαγορευμένο ενεργειακό διάκενο ενός υλικού μπορούσαν να παρέμβουν δραστικά στην ροή του ρεύματος ειδικά στις χαμηλές θερμοκρασίες όπου τα ηλεκτρόνια που συλλαμβάνονται μένουν πιο εύκολα «σταθερά». Η εργασία των Mott-Gurney

συμπληρώθηκε από αυτή του A.Rose που προσπάθησε μέσα από πειράματα να προσδιορίσει το μέγεθος της μείωσης του ρεύματος λόγω των παγίδων που αναφέραμε. Στο σχήμα φαίνονται δύο παγίδες (μία ρηχή E_{t1} και μια βαθιά E_{t2}) μέσα στο ενεργειακό διάκενο:

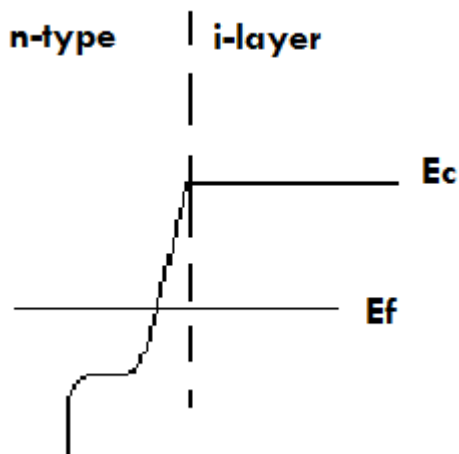


Εικόνα 4.1.2 : Ενεργειακές στάθμες «παγίδες» E_{t1}, E_{t2} σε ημιαγωγό

Πιο κάτω φαίνονται πιθανά ενεργειακά διαγράμματα για τις επαφές που εγχέουν ηλεκτρόνια σε έναν ημιαγωγό. Πιο συγκεκριμένα γίνεται έγχυση ηλεκτρονίων από την ισχυρά νοθευμένη n-περιοχή προς τον ενδογενή ημιαγωγό (i-layer).

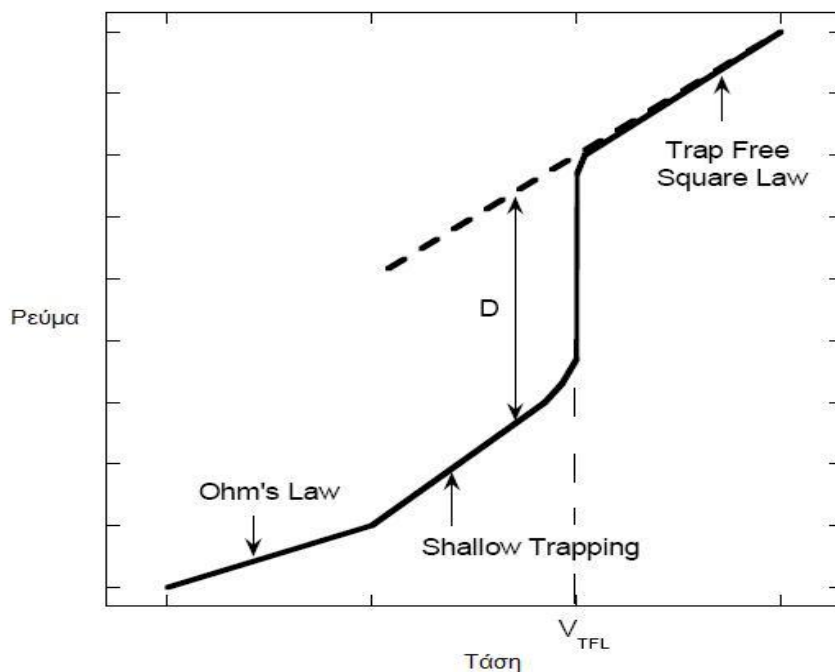


Εικόνα 4.1.3 : Στο ενεργειακό αυτό διάγραμμα η n-περιοχή είναι μη εκφυλισμένη επειδή η στάθμη Fermi είναι κάτω από την ζώνη αγωγιμότητας της πρώτης περιοχής. Οι επαφές αυτές δεν είναι αποδοτικές σε χαμηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 4.1.4: Στο ενεργειακό αυτό διάγραμμα η n-περιοχή είναι εκφυλισμένη επειδή η στάθμη Fermi είναι πάνω από την ζώνη αγωγιμότητας της πρώτης περιοχής. Η επαφή είναι αποδοτική και σε χαμηλές θερμοκρασίες και μπορεί να εγχέει συνεχώς ηλεκτρόνια.

Οι «παγίδες» είναι το σημαντικότερο φαινόμενο που μας επηρεάζει κατά την μελέτη του SCLC μηχανισμού και μόνο με αυτό θα ασχοληθούμε στα επόμενα κεφάλαια, καθώς δεν επηρεάζουν μόνο την τιμή του ρεύματος αλλά και την μορφή της I-V χαρακτηριστικής. Η παρακάτω εικόνα δείχνει μια τυπική I-V για υλικό με βαθιά ενεργειακή στάθμη.



Εικόνα 4.1.5: Λογαριθμική χαρακτηριστική I-V για υλικό με βαθιά ενεργειακή στάθμη

Δηλαδή σε χαμηλές τάσεις το SCLC είναι αμελητέο και έτσι παρατηρείται ο κλασσικός νόμος του Ohm. Αφού η τάση αυξηθεί επαρκώς το SCLC γίνεται αξιόλογο και εισερχόμαστε στην περίπτωση ρηχών παγίδων (Shallow trapping). Καθώς η τάση αυξάνεται και άλλο περισσότερα ηλεκτρόνια εγχέονται και τελικά αυτά τα ηλεκτρόνια «γεμίζουν» όλες τις παγίδες στο υλικό (αυτό συμβαίνει για την σημειωμένη τάση V_{TFL} όπου το ρεύμα αυξάνεται κατακόρυφα γιατί πλέον ότι ηλεκτρόνιο εγχέεται πάει στην ζώνη αγωγιμότητας). Στην συνέχεια το υλικό λειτουργεί σαν ελεύθερο από παγίδες και έτσι ακολουθεί τον τετραγωνικό νόμο (trap free square law). Για λόγους απλότητας θα αναφερθούμε σε όλη την εργασία σε ομοιόμορφες διατάξεις με παράλληλα ηλεκτρόδια και ροή συνεχών ρευμάτων που προκαλούνται από ένα φορέα (δηλαδή θα απορρίψουμε φαινόμενα που εμφανίζονται σε υψηλά πεδία).

4.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μια πρώτη φαινομενολογική ανάλυση εισήχθη από τον A.Rose. Η θεώρηση του ρεύματος από ένα φορέα λαμβάνει υπόψη την συγκέντρωση ελεύθερων και παγιδευμένων φορέων καθώς και την ταχύτητα ολίσθησης των ελεύθερων φορέων ενός τύπου. Ακόμα λαμβάνεται υπόψη η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Στην ανάλυση αυτή η χωρική μεταβολή αυτών των μεγεθών αγνοείται για λόγους απλότητας και θα εξετασθεί σε επόμενη ενότητα. Μόνο οι ενεργές τιμές αυτών των μεγεθών θα μας απασχολήσουν προς το παρόν. Αυτή η προσέγγιση φαίνεται μάλιστα να «δουλεύει» καλά καθώς για επίπεδη ροή ρεύματος (όπως την θεωρήσαμε) η μεταβολή αυτών των μεγεθών περιορίζεται μόνο στο επίπεδο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σίγουρα θα υπάρχει ένα σφάλμα λοιπόν αλλά έχει υπολογιστεί ότι είναι μικρότερο από ένα παράγοντα 2.

4.2.1 ΤΕΛΕΙΟΣ ΜΟΝΩΤΗΣ

Ο όρος «τέλειος» αναφέρεται στην απουσία παγίδων αλλά και ελεύθερων φορέων στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η πυκνότητα του ρεύματος μπορεί να γραφεί ως

$$J = \rho_{inj} v \text{ ή } J = Q_{inj} / t \quad (4.2.1)$$

,όπου ρ_{inj} η συγκέντρωση ελεύθερων εγγεόμενων φορέων, v η ταχύτητα ολίσθησης των ελεύθερων φορέων και Q_{inj} το συνολικό εγγεόμενο φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας και t ο χρόνος μεταφοράς ενός ηλεκτρονίου (ή οπής σε άλλη περίπτωση) μεταξύ καθόδου και ανόδου. Ισχύει :

$$t = L / v \text{ και } Q_{inj} = \rho_{inj} L \quad (4.2.2).$$

Όπως βλέπουμε το ρεύμα J είναι ρεύμα ολίσθησης καθώς το ρεύμα διάχυσης αγνοείται. Είναι εξάλλου αισθητό μόνο στις περιοχές γύρω από την επαφή. Από τις βασικές αρχές ηλεκτροστατικής ξέρουμε ότι το φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας στην μία πλάκα παραλληλεπίπεδου πυκνωτή Q_o είναι

$$Q_o = C_o V \text{ και } C_o = \epsilon / L \quad (4.2.3)$$

, όπου ϵ η διηλεκτρική σταθερά μεταξύ των πλακών πυκνωτή και C_o η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας. Προσομοιάζοντας λοιπόν την διάταξη της διόδου μας με έναν πυκνωτή (όπου η περιοχή φορτίων χώρου είναι η περιοχή μεταξύ των πλακών) μπορούμε να γράψουμε

$$Q_{inj} = CV = (\varepsilon / L)V \quad (4.2.4).$$

Από σχέσεις 4.2.1, 4.2.2 και 4.2.4 έχουμε

$$J = C v V / L = \varepsilon v V / L^2 \quad (4.2.5).$$

Για μικρά εφαρμοζόμενα πεδία έχουμε

$$v = \mu E = \mu(V / L) \quad \text{και} \quad t = L^2 / \mu V \quad (4.2.6).$$

Από (4.2.5) και (4.2.6) προκύπτει

$$J = \frac{\varepsilon \mu V^2}{L^3} \quad (4.2.7)$$

όπου αν προσθέσουμε ένα συντελεστή 9/8 καταλήγουμε στον τύπο του Mott-Gurney

$$J = \frac{9 \varepsilon \mu V^2}{8 L^3} \quad (4.2.8).$$

4.2.2 ΜΟΝΩΤΗΣ/ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΣ ΠΑΓΙΔΩΝ ΑΛΛΑ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Αυτοί οι ελεύθεροι φορείς που δεχόμαστε τώρα ότι υπάρχουν ,με συγκέντρωση n_0 , μπορεί να προέρχονται από μία ομάδα δοτών-παγίδων που έχουν τόσο χαμηλές ενέργειες ιονισμού ώστε να θεωρούνται πρακτικά ελεύθεροι. Σε χαμηλές τάσεις ο νόμος του Ohm κυριαρχεί και μπορούμε να γράψουμε :

$$J = q n_0 \mu (V / L) \quad (4.2.9).$$

Όμως πρακτικά για οποιαδήποτε τάση εφαρμοστεί ,κάποιο πλεονάζον φορτίο εγχέεται στο υλικό ακόμα και αν είναι μικρό. Όπως μάλιστα αναφέραμε στην αρχή ,όταν αυτή η συγκέντρωση των εγχεόμενων φορέων φτάσει να είναι συγκρίσιμη ή μεγαλύτερη από την συγκέντρωση των ελεύθερων φορέων σε θερμοδυναμική ισορροπία ,τότε ο μηχανισμός SCLC παρατηρείται στο υλικό. Η τάση για την οποία συμβαίνει αυτή μετάβαση από την περιοχή Ohm στην περιοχή SCLC ονομάζεται τάση μετάβασης και θα την συμβολίζουμε V_x . Η συνολική πυκνότητα εγχεόμενου φορτίου στον μονωτή/ημιαγωγό είναι

$$Q_{inj} = \rho_{inj} L = q n_{inj} L \quad (4.2.10)$$

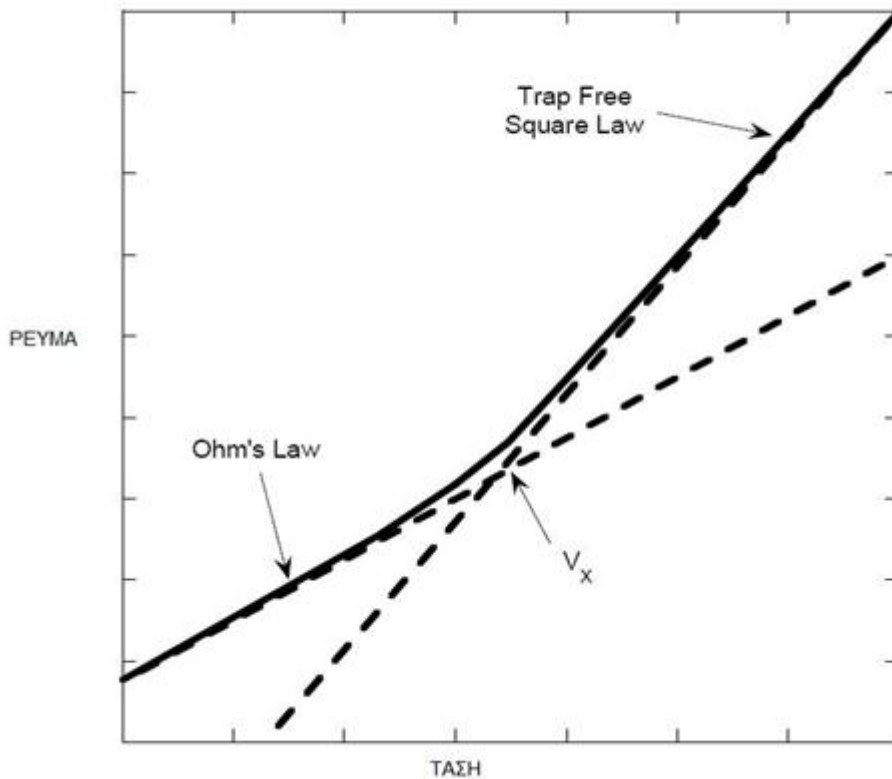
και υποθέτοντας ότι για τάση $V_x \rightarrow n_{inj} = n_0$, γράφουμε

$$Q_{inj} = qn_o L = CV_x \approx (\epsilon / L)V_x \quad (4.2.11)$$

ή

$$V_x = qn_o L^2 / \epsilon \quad (4.2.12).$$

Σχηματικά :



Εικόνα 4.2.1 : Τμήματα I-V χαρακτηριστικής για υλικό ελεύθερο παγίδων ,παρουσία όμως ελεύθερων φορέων στην κατάσταση ισορροπίας

4.2.3 ΜΟΝΩΤΗΣ/ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥΣ ΚΑΙ ΠΑΓΙΔΕΥΜΕΝΟΥΣ ΦΟΡΕΙΣ

Η παρουσία παγιδευμένων φορέων σε ένα πραγματικό υλικό είναι αναπόφευκτη. Γενικά, το ρεύμα σε ποσοστά χαμηλής έγχυσης μειώνεται επειδή οι παγίδες συλλαμβάνουν τα περισσότερα ηλεκτρόνια. Ωστόσο ενώ το ρεύμα μειώνεται ,το συνολικό πλεονάζον φορτίο $Q_{inj}=C*V$ είναι το ίδιο ασχέτως από το πόσο φορείς παγιδεύονται ή όχι. Οπότε μπορούμε να γράψουμε :

$$Q_{inj} = (\rho_{inj} + \rho_{tr,inj})L \approx CV = (\epsilon / L)V \quad (4.2.13)$$

, όπου $\rho_{tr,inj}$ είναι η συγκέντρωση του φορτίου που μετά την έγχυση παγιδεύτηκε . Να σημειώσουμε ότι επειδή ακριβώς οι παγιδευμένοι φορείς δεν συμμετέχουν στην αγωγιμότητα ,το ρεύμα θα είναι $J = \rho_{inj}v$ και όχι $J=Q_{inj}/t$. Γνωρίζοντας ότι σε θερμική ισορροπία η συγκέντρωση ελεύθερων φορέων είναι :

$$n_o = N_c \exp\left[\frac{E_f - E_c}{kT}\right] \quad (4.2.14)$$

, όπου N_c η ενεργός πυκνότητα καταστάσεων στην ζώνη αγωγιμότητας και E_c η ενέργεια στον πάτο της ζώνης αγωγιμότητας, η συγκέντρωση παγιδευμένων φορέων σε θερμοδυναμική ισορροπία θα είναι

$$n_{tr,0} = \frac{N_t}{1 + (1/g) \exp\left[\frac{E_t - E_f}{kT}\right]} \quad \text{ή} \quad n_{tr,0} = \frac{N_t}{1 + (1/g)(N/n_o)} \quad (4.2.15)$$

,όπου $N = N_c \exp\left[\frac{E_t - E_c}{kT}\right]$, N_t η συγκέντρωση παγίδων και g ένας εκφυλιστικός παράγοντας των παγίδων. Όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο η στάθμη Fermi E_f της θερμοδυναμικής ισορροπίας γίνεται η στάθμη quasi-Fermi E_{fi} και τώρα η συγκέντρωση ελεύθερων φορέων θα δίνεται από την εξίσωση :

$$n = n_{inj} + n_o = N_c \exp\left[\frac{E_{fi} - E_c}{kT}\right] \quad (4.2.16).$$

Άρα η συγκέντρωση των παγιδευμένων φορέων θα είναι τώρα

$$n_{tr} = n_{tr,inj} + n_{tr,0} = \frac{N_t}{1 + (1/g)(N/n)} \quad (4.2.17).$$

4.2.4 ΜΟΝΩΤΗΣ/ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΡΗΧΕΣ ΠΑΓΙΔΕΣ

«Ρηχές» λέγονται οι παγίδες οι ενέργειες των οποίων E_t βρίσκονται πάνω από την στάθμη quasi-Fermi E_{fi} και άρα κοντά στην ζώνη αγωγιμότητας E_c ώστε να ισχύει $(E_t - E_{fi})/kT > 1$. Από τις σχέσεις 4.2.16 και 4.2.17 για $(E_t - E_{fi})/kT > 1$ θέτουμε

$$\theta \equiv \frac{n}{n_{tr}} = \frac{\rho}{\rho_{tr}} = \frac{N_c}{gNt} \exp\left[\frac{E_t - E_{fi}}{kT}\right] \quad (4.2.18).$$

Το θ είναι λοιπόν μια σταθερά η οποία μένει αμετάβλητη και ανεξάρτητη από το επίπεδο έγχυσης ,όσο οι παγίδες βέβαια παραμένουν ρηχές. Σε μια περιοχή πεδίου

όπου το SCLC κυριαρχεί , η συγκέντρωση των παγιδευμένων φορέων είναι μεγαλύτερη από αυτή των ελεύθερων , δηλαδή $\theta \ll 1$ και η εξίσωση 4.2.13 γίνεται $Q_{inj} = (\rho_{inj} + \rho_{tr,inj})L \approx \rho_{tr,inj}L$. Επίσης σε μια τέτοια περιοχή η εγχεόμενη πυκνότητα φορτίου θα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή σε θερμοδυναμική ισορροπία και άρα $\rho = \rho_{inj} + \rho_o \approx \rho_{inj}$ και $\rho_{tr} = \rho_{tr,inj} + \rho_{tr,0} \approx \rho_{tr,inj}$. Οπότε η σχέση 4.2.18 γίνεται

$$\theta = \frac{\rho}{\rho_{tr}} = \frac{\rho_{inj}}{\rho_{tr,inj}} \Rightarrow \rho_{tr,inj} = \frac{\rho_{inj}}{\theta} \text{ και από την 4.2.13 θα έχουμε}$$

$$Q_{inj} \approx \frac{\rho_{inj}L}{\theta} \quad (4.2.19).$$

Από τον συνδυασμό 4.2.4 και 4.2.19 προκύπτει

$$Q_{inj} \approx \frac{\rho_{inj}L}{\theta} = \frac{\varepsilon V}{L} \quad (4.2.20).$$

Λύνοντας ως προς ρ_{inj} και συνδυάζοντας τις 4.2.1,4.2.6 και 4.2.20 έχουμε την πυκνότητα του ρεύματος SCLC για την περίπτωση ρηχών παγίδων

$$J = \frac{\theta \varepsilon \mu V^2}{L^3} \quad (4.2.21).$$

Η εξίσωση 4.2.21 όπως βλέπουμε διαφέρει κα αυτή κατά ένα συντελεστή 9/8 από τον προβλεπόμενο τύπο του Mott-Gurney. Και πάλι θυμίζουμε ότι το αποτέλεσμα αυτό ισχύει μόνο για περίπτωση ρηχών ενεργειακών σταθμών. Η στάθμη Fermi «ανεβαίνει» καθώς μεγαλώνει η έγχυση φορέων υπό την επιβολή τάσης και όταν υπερβεί την στάθμη E_t (που έχουμε συμβολίσει την ενεργειακή παγίδα) τότε χρειάζεται να γίνει μια διαφορετική ανάλυση από αυτή που κάναμε προκειμένου να προβλεφθεί το SCLC. Όταν η συγκέντρωση φορέων εξισωθεί με την συγκέντρωση των ελεύθερων φορέων σε θερμοδυναμική ισορροπία ,δηλαδή $n = n_{inj} + n_o = 2n_o$,από την σχέση 4.2.11 και 4.2.21 προκύπτει

$$V_x \approx \frac{qn_o L^2}{\theta \varepsilon} \quad (4.2.22).$$

Δηλαδή στην περίπτωση ρηχών παγίδων η τάση μετάβασης θα είναι 1/θ φορές η τάση μετάβασης για υλικό ελεύθερο από παγίδες.

4.2.5 ΜΟΝΩΤΗΣ/ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΒΑΘΙΕΣ ΠΑΓΙΔΕΣ

Μία παγίδα ηλεκτρονίων θεωρείται βαθιά όταν η ενέργεια της E_t βρίσκεται κάτω από την στάθμη quasi-Fermi E_{fi} και έτσι $(E_{fi}-E_t)/kT > 1$. Σε θερμοδυναμική ισορροπία η πυκνότητα των παγίδων που είναι κενές θα είναι :

$$p_{tr,0} = Nt - n_{tr,0} \quad \text{ή} \quad p_{tr,0} = \frac{Nt}{1 + g \exp\left[\frac{E_f - E_t}{kT}\right]} \approx \frac{Nt}{g} \exp\left[\frac{E_t - E_f}{kT}\right] \quad (4.2.23)$$

,όπου η τελευταία σχέση ισχύει για $(E_{fi}-E_t)/kT > 1$. Όπως ξέρουμε η αύξηση των εγχεόμενων ηλεκτρονίων επιφέρει αύξηση («ανέβασμα») στην στάθμη quasi-Fermi , το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να γεμίζουν όλο και περισσότερες βαθιές παγίδες. Οι παγίδες μάλιστα θα καταληφθούν πλήρως όταν παγιδεύσουν τον συνολικό αριθμό εγχεόμενων φορέων που είναι $n_{tot,inj} = n_{inj} + n_{tr,inj}$,δηλαδή όταν η πυκνότητα τους γίνει ίση με αυτήν των κενών παγίδων στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ($p_{tr,0}$). Η τάση μετάβασης γράφεται

$$V_x \approx \frac{Q_x}{C_0} = \frac{q p_{tr,0} L}{C_0} \Rightarrow V_x = \frac{q p_{tr,0} L^2}{\varepsilon} \quad (4.2.24)$$

όπου Q_x η συνολική πυκνότητα φορτίου μόλις οι βαθιές παγίδες γεμίσουν ηλεκτρόνια.

Έστω ότι διπλασιάζαμε την τάση $V_x = 2V_x$, τότε λόγω του ότι το φορτίο που εγχέεται είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης, θα είναι $Q_{inj}(2V_x) = 2Q_x$, και από την στιγμή που όλες οι παγίδες είναι κατειλημμένες για V_x , τώρα όλο το επιπλέον φορτίο θα πάει στην ζώνη αγωγιμότητας του υλικού. Ο λόγος των ρευμάτων στις δύο τιμές τις τάσεις μπορεί να γραφτεί ως

$$\frac{J(2V_x)}{J(V_x)} = \frac{2n(2V_x)}{n(V_x)} \approx \frac{2p_{tr,0}}{2n_0} \approx \frac{p_{tr,0}}{n_0} \quad (4.2.25)$$

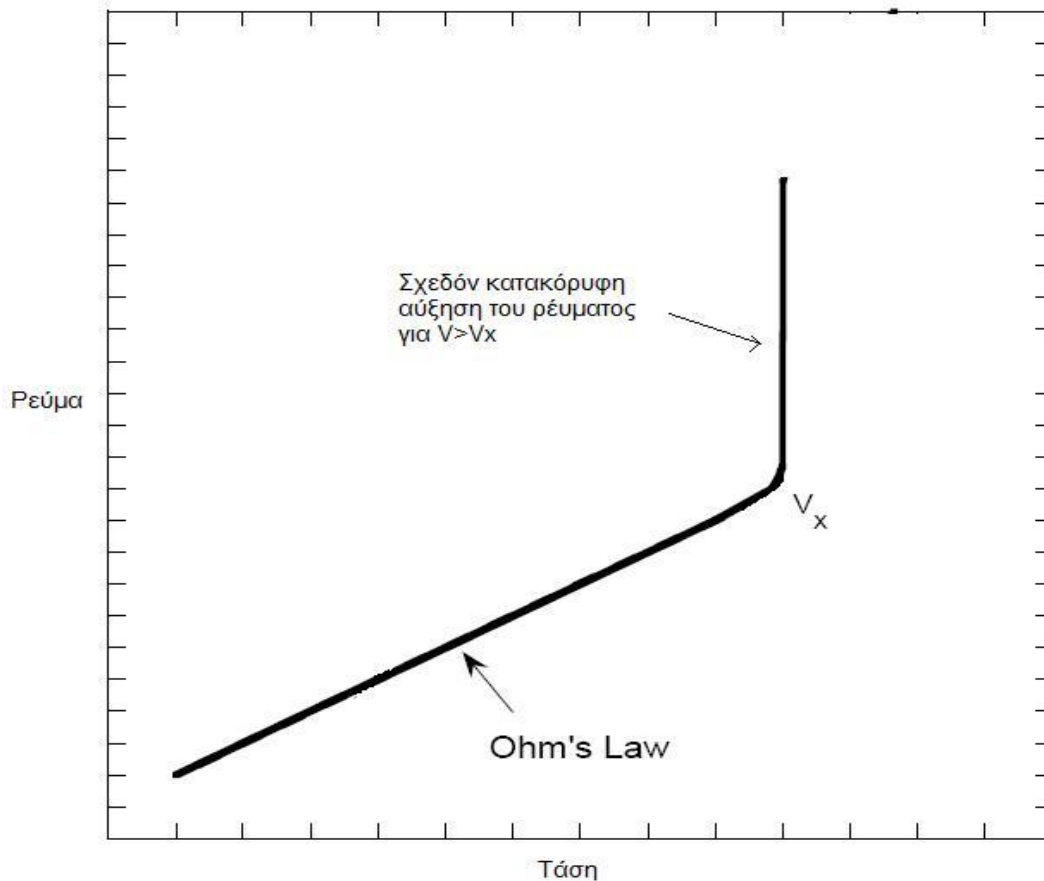
, όπου υποθέσαμε ότι $n(V_x) = 2n_0$. Επιπλέον ,θεωρούμε ότι $n(2V_x) = p_{tr,0}$ επειδή όλοι οι επιπλέον φορείς θα βρίσκονται στην ζώνη αγωγιμότητας. Δηλαδή ,ισχύει

$$Q_{inj}(2V_x) - Q_x = Q_x = q p_{tr,0} L \quad (4.2.26)$$

και

$$n_{inj}(2V_x) - n_{inj}(V_x) = n_{inj}(V_x) = p_{tr,0} \quad (4.2.27).$$

Ακόμα λοιπόν και αν η τάση V_x αυξηθεί λίγο (καθώς ο διπλασιασμός σε λογαριθμική κλίμακα δεν είναι μεγάλη αύξηση), ο λόγος $\frac{J(2V_x)}{J(V_x)} = \frac{p_{tr,0}}{n_o}$ μπορεί να είναι πολλών τάξεων μεγέθους. Επομένως, η αύξηση του ρεύματος για μικρή αύξηση της τάσης, είναι σημαντική για τάσεις που είναι από την V_x και πάνω. Σχηματικά



Εικόνα 4.2.2 : Τμήματα I-V χαρακτηριστικής για υλικό με βαθιές ενεργειακές στάθμες

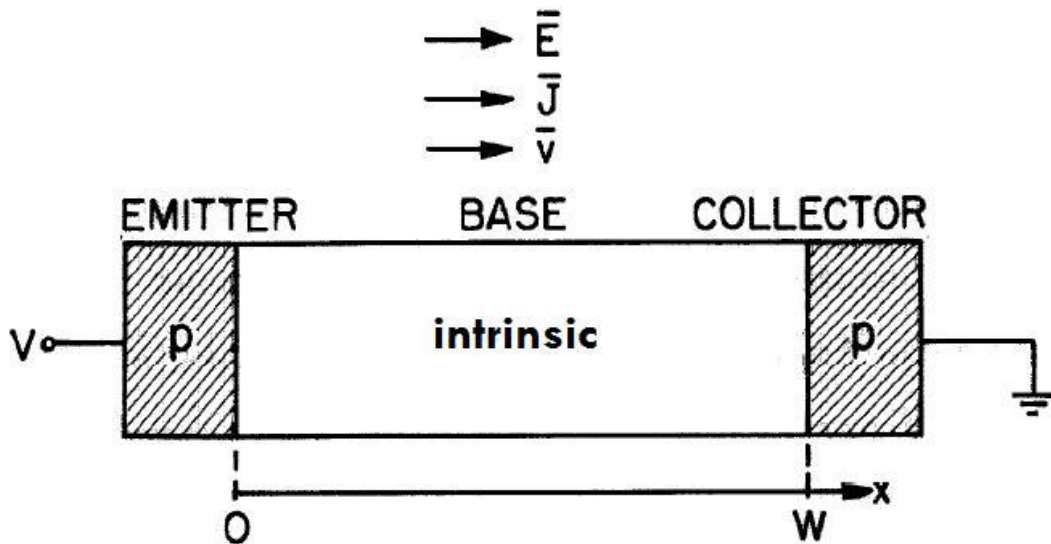
4.3 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΘΕΩΡΙΑ SCLC

Στην απλοποιημένη θεωρία γίνονται οι εξής δύο παραδοχές:

- α) τα ρεύματα διάχυσης αμελούνται καθώς είναι σημαντικά μόνο στις περιοχές γύρω από την επαφή
- β) ένας άπειρος αριθμός ηλεκτρονίων είναι διαθέσιμος να εγχυθεί από το ηλεκτρόδιο στο υλικό

Οι δύο αυτές υποθέσεις αλληλοσυμπληρώνονται, καθώς αν ένας άπειρος αριθμός ηλεκτρονίων εγχέεται από το ηλεκτρόδιο αυτό οδηγεί σε άπειρο ρεύμα

διάχυσης και πρέπει να παραληφθεί ως μη ρεαλιστικό. Σχηματικά ο μηχανισμός για την απλοποιημένη θεωρία :



Εικόνα 4.3.1 : Ένας τυπικός μηχανισμός SCLC

Η εξίσωση ρεύματος αφού αγνοείται το ρεύμα διάχυσης θα είναι :

$$J = q\mu n(x) \vec{E}(x) \quad (4.3.1).$$

Βλέπουμε δηλαδή 'ότι σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις το n και το E εξαρτώνται από την απόσταση x . Η εξίσωση Poisson που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του SCLC φαινομένου είναι :

$$\frac{\epsilon}{q} \frac{d \vec{E}(x)}{dx} = n_{inj}(x) + n_{r,inj}(x) = [n(x) - n_o] + [n_r(x) - n_{r,0}] \quad (4.3.2)$$

,όπου

$$n(x) = Nc \exp\left[\frac{Ef(x) - Ec(x)}{kT}\right] \quad (4.3.3)$$

και

$$n_r(x) = \frac{Nt}{1 + (1/g) \exp\left[\frac{Et(x) - Ef(x)}{kT}\right]} \quad (4.3.4).$$

Τέλος ,για να συμπληρωθεί το «σετ» των εξισώσεων που επιλύουν την εξίσωση Poisson για το πρόβλημα μας ,είναι απαραίτητη μια συνοριακή συνθήκη η οποία για την απλοποιημένη θεωρία που μελετάμε ,είναι :

$$\vec{E} = 0 \text{ στο } x=0 \text{ (4.3.5).}$$

Οι ιδιότητες των $n(x)$ και $\vec{E}(x)$ έχουν προσδιοριστεί ότι είναι οι εξής :

-το $n(x)$ είναι γνησίως φθίνουσα συνάρτηση και πλησιάζει το n_0 καθώς το x μειώνεται

-το $\vec{E}(x)$ είναι γνησίως αύξουσα συνάρτηση και το dE/dx μειώνεται καθώς το x αυξάνει. Η $\vec{E}(x)$ δηλαδή είναι κυρτή.

4.3.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

Λύνοντας αναλυτικά το πρόβλημα μας υποθέτουμε μονωτή χωρίς παγίδες και ότι ισχύουν όλες οι υποθέσεις της απλοποιημένης θεωρίας. Έτσι οι ποσότητες $n_{tr}(x)$ και $n_{tr,0}$ αγνοούνται (αφού υποθέσαμε ότι δεν έχουμε παγίδες). Η εξίσωση λοιπόν Poisson θα γράφεται

$$\frac{\varepsilon}{q} \frac{dE(x)}{dx} = n(x) \text{ (4.3.6).}$$

Συνδυάζοντας την (4.3.1) με την (4.3.6) βρίσκουμε

$$E(x) \left(\frac{dE}{dx} \right) = \frac{J}{\varepsilon \mu} \text{ (4.3.7)}$$

και λύνοντας έπειτα για την συνοριακή συνθήκη $\vec{E} = 0$ στο $x=0$ έχουμε

$$E(x) = \left(\frac{2J}{\varepsilon \mu} \right)^{1/2} x^{1/2} \text{ (4.3.8).}$$

Ολοκληρώνοντας στην συνέχεια την (4.3.8) βρίσκουμε για την τάση

$$V(x) = \int_0^x \vec{E}(x) dx = \left(\frac{8J}{9\varepsilon \mu} \right)^{1/2} x^{3/2} \text{ όπου για } x=L \text{ προκύπτει}$$

$$J = \frac{9}{8} \frac{\varepsilon \mu V^2}{L^3} \text{ (4.3.9).}$$

Δηλαδή καταλήξαμε (ακριβώς αυτή την φορά) στον τύπο του Mott-Gurney.

Κεφάλαιο 5 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή ΦΒ από λεπτά υμένια καθιστά την τεχνολογία αυτή πιο οικονομική καθώς χρειάζεται πλέον λιγότερο υλικό σε σχέση με την κατασκευή ενός wafer για παράδειγμα το οποίο θα ήταν περίπου 500μm παχύ. Επιπρόσθετα το μικροκρυσταλλικό πυρίτιο ως υλικό κερδίζει έδαφος στην τεχνολογία κατασκευής τρανζίστορ και ΦΒ στοιχείων λεπτών υμενίων. Το υλικό αυτό δεν είναι ένα απλό υλικό αλλά θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι μια οικογένεια υλικών από διαφορετικά grain sizes ,grain orientations and interfacial layers. Γ αυτό και ακόμα μελετούνται και γίνεται προσπάθεια ηλεκτρικού χαρακτηρισμού τέτοιων υλικών.

Οι επαφές μας είναι κατασκευασμένες από ZnO ,ένα ημιαγώγιμο υλικό τύπου n με πολύ καλές ιδιότητες ανάμεσα στις οποίες είναι η υψηλή διαπερατότητα ,η υψηλή κινητικότητα των ηλεκτρονίων, το μεγάλο ενεργειακό διάκενο ,η ισχυρή φωταύγεια σε θερμοκρασία δωματίου κ.α. Οι ιδιότητες αυτές το καθιστούν ιδανικό υλικό για χρήση του ως ωμική επαφή και διαπερατό παράθυρο σε φωτοβολταϊκές διατάξεις.

Η εξαγωγή της κινητικότητας τώρα με την μέθοδο SCLC και όχι με «κλασσικές» μετρήσεις Hall δίνει μια ενεργό κινητικότητα στο ενδογενές στρώμα στην κάθετη διεύθυνση, σε αντίθεση με την Hall κινητικότητα που μετριέται στην οριζόντια. Η ενεργός κινητικότητα από τις SCLC μετρήσεις θα είναι η ελάχιστη για το μικροκρυσταλλικό ενδογενές στρώμα μας καθώς η τιμή της μπορεί να μειωθεί από παράγοντες όπως πιθανή παρουσία οξειδίου ή άμορφου στρώματος πυριτίου στην διάταξη μας. Ακόμη αν η κρυσταλλικότητα του φιλμ δεν είναι καλή ,η κινητικότητα μπορεί να μειωθεί λόγω της αύξησης του αριθμού των φραγμάτων δυναμικού μέσα στο υλικό μας.

5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα. Στο πρώτο πείραμα μελετήθηκαν δομές p-i-p καθώς και Φ/Β στοιχεία τόσο μικροκρυσταλλικού όσο και άμορφου πυριτίου ,υπό σκοτεινές συνθήκες κενού και για μεταβλητές θερμοκρασίες από 80 έως 350K. Στο δεύτερο πείραμα οι ίδιες δομές μελετήθηκαν σε περιβάλλον τεχνητού φωτός. Σκοπός των δύο πειραμάτων ήταν να μπορέσουμε μέσω των μετρήσεων να χαράξουμε τις χαρακτηριστικές I-V

καμπύλες και έτσι να προσδιορίσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των δομών αυτών και κυρίως της ευκινησίας των οπών του πυριτίου.

Ο χαρακτηρισμός γίνεται εφαρμόζοντας διαφορετικές τιμές τάσης στους ακροδέκτες της δομής και καταγράφοντας το ρεύμα που τη διαρρέει, μέσω μιας πηγής Keithley 2400. Η επαφή με τους ακροδέκτες της δομής γίνεται μέσω ακίδων ενός Probe Station τοποθετημένου σε σκοτεινό θάλαμο. Έτσι, μπορούμε να καταγράψουμε τις χαρακτηριστικές τόσο σε συνθήκες σκότους όσο και φωτός. Επίσης, με τη χρήση του probe station χαμηλών θερμοκρασιών μπορούμε να καταγράψουμε και τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές για διαφορετικές θερμοκρασίες, βλέποντας τη διακύμανση των διαφόρων ηλεκτρικών παραμέτρων με τη θερμοκρασία.

Να σημειώσουμε ότι για να πραγματοποιηθούν οι ηλεκτρικές μετρήσεις καταρχήν δημιουργήσαμε κατάλληλες ηλεκτρικές επαφές στα δείγματα. Οι επαφές αυτές γίνονται από πάστα αργύρου (silver paste), στις άκρες των δειγμάτων. Ο άργυρος είναι ένα υλικό που έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά γνωρίσματα:

- υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- χαμηλή ειδική αντίσταση
- άριστη προσκόλληση στο ευρύ φάσμα των υλικών.

5.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια απλοποιημένη εκδοχή της θεωρίας SCLC. Όπως ξέρουμε ήδη το SCLC προκύπτει από το γεγονός ότι καθώς η συγκέντρωση των εγχεόμενων φορέων (από το ηλεκτρόδιο της διάταξης) υπερβαίνει την συγκέντρωση των θερμικών φορέων, το ηλεκτρικό πεδίο στο δείγμα γίνεται ανομοιόμορφο και το ρεύμα ακολουθεί πλέον όχι ωμικό χαρακτήρα αλλά μια τετραγωνική εξάρτηση από την τάση. Η απλοποιημένη αυτή θεωρία που θα παρουσιαστεί προϋποθέτει ότι η εφαρμοζόμενη τάση V είναι αρκετά μεγαλύτερη από την θερμική τάση

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (5.3.1)$$

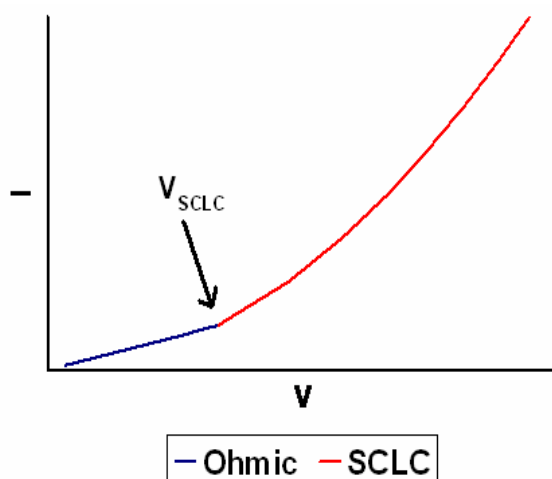
έτσι ώστε το ρεύμα ολίσθησης

$$J_{drift} = q\mu pV / L \quad (5.3.2)$$

να είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ρεύμα διάχυσης

$$J_{dif} = (-)qV_T \mu dp / dx \approx (-)qV_T \mu p_{average} / L \quad (5.3.3)$$

και το τελευταίο να αγνοείται. Η τάση όταν όλες οι παγίδες στο υλικό είναι γεμάτες ή όταν το εγχεόμενο φορτίο υπερβεί το μόνιμο είναι γνωστή ως V_{SCLC} . Σε μια χαρακτηριστική I-V



Σχήμα 5.3.1

οι τάσεις κάτω από την V_{SCLC} ακολουθούν ωμικό χαρακτήρα. Όταν όλη η εφαρμοζόμενη τάση απορροφάται από τον όγκο της διάταξης, ο νόμος του Ohm είναι εμφανής. Μαθηματικά ισχύει

$$I = qp_o A \mu V / t = V / R \quad (5.3.4)$$

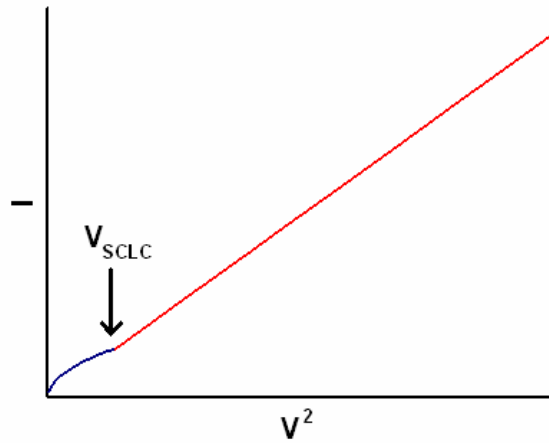
,όπου p_o η συγκέντρωση φορέων, A η επιφάνεια της επαφής, μ η κινητικότητα των φορέων, t το πάχος του ενδογενούς στρώματος και R η συνολική αντίσταση της του δείγματος. Η τάση V_{SCLC} προκύπτει όταν τα εγχεόμενο φορτίο είναι συγκρίσιμο σε μέγεθος με το θεμρικό φορτίο στον ημιαγωγό και υπολογίζεται από την εξίσωση

$$V_{SCLC} = qp_o t^2 / \epsilon \quad (5.3.5).$$

Αφού επιτευχθεί η V_{SCLC} το δείγμα εισέρχεται στην SCLC περιοχή λειτουργίας και μαθηματικά ισχύει

$$I = 9\epsilon A \mu V^2 / 8t^3 \quad (5.3.6).$$

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3.1 το ρεύμα για μεγάλα εφαρμοζόμενα πεδία (περιοχή SCLC) από γραμμικό στην συνέχεια ακολουθεί μια τετραγωνική εξάρτηση από την τάση. Για να προσδιοριστεί λοιπόν η κινητικότητα των οπών στην περίπτωση μας, σχεδιάζεται η $I-V^2$ καμπύλη, η μορφή της οποίας φαίνεται στο σχήμα 5.3.2



Σχήμα 5.3.2

Δηλαδή τώρα η SCLC περιοχή είναι γραμμική ενώ η ωμική μοιάζει με συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας. Με κατάλληλο fit στην γραμμική περιοχή βρίσκουμε την κλίση της ευθείας και θεωρώντας $Slope=I/V^2$ από την εξίσωση (5.3.6) προκύπτει η κινητικότητα

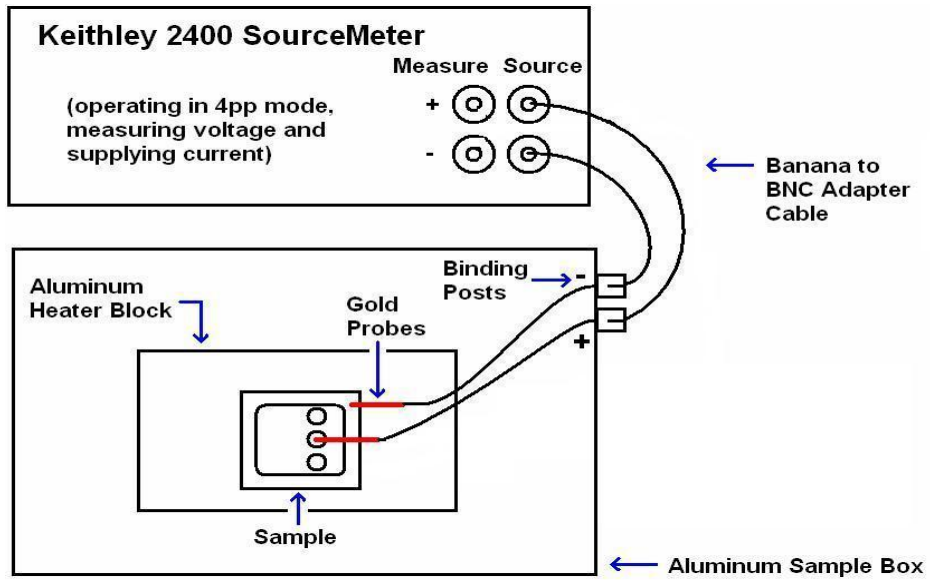
$$\mu = \frac{8t^3 Slope}{9\varepsilon A} \quad (5.3.7)$$

,όπου t είναι το πάχος του ενδογενούς στρώματος, ε η διηλεκτρική σταθερά του πυριτίου και A η επιφάνεια της διάταξης. Αφού υπολογίσουμε την ευκινησία του υλικού μας από τις δομές p-i-p, μπορούμε να προχωρήσουμε στο χαρακτηρισμό φωτοβολταϊκών δομών p-i-n.

5.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

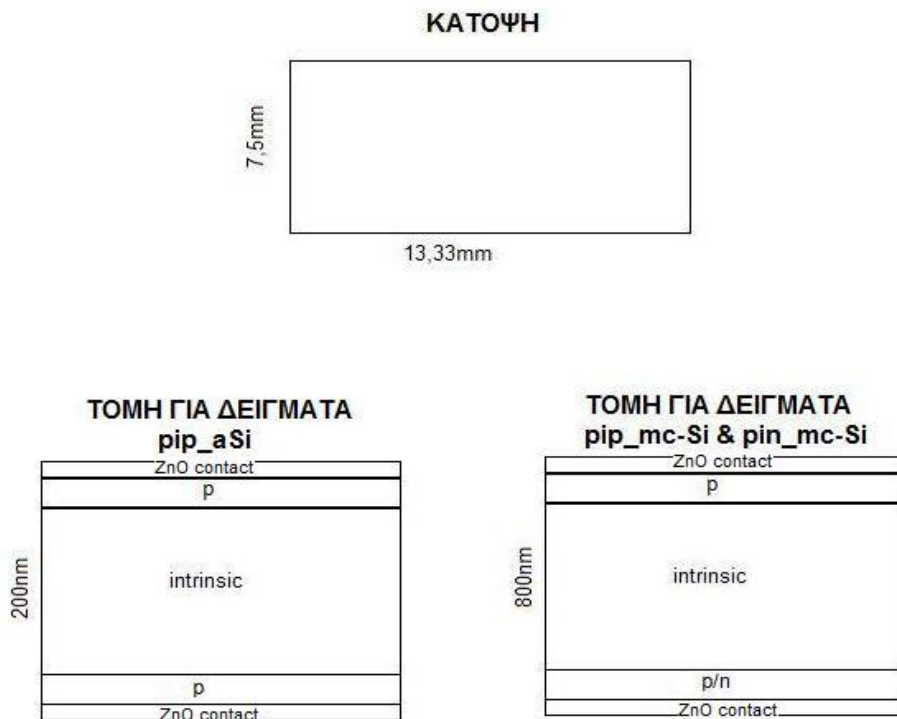
Τα δύο πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο χρονικό διάστημα Μάρτιος-Ιούνιος 2012 και σε εσωτερικό χώρο εργαστηρίου.

Σχηματικά, η διάταξη και η συνδεσμολογία για το πείραμα φαίνονται στην εικόνα 5.4.1



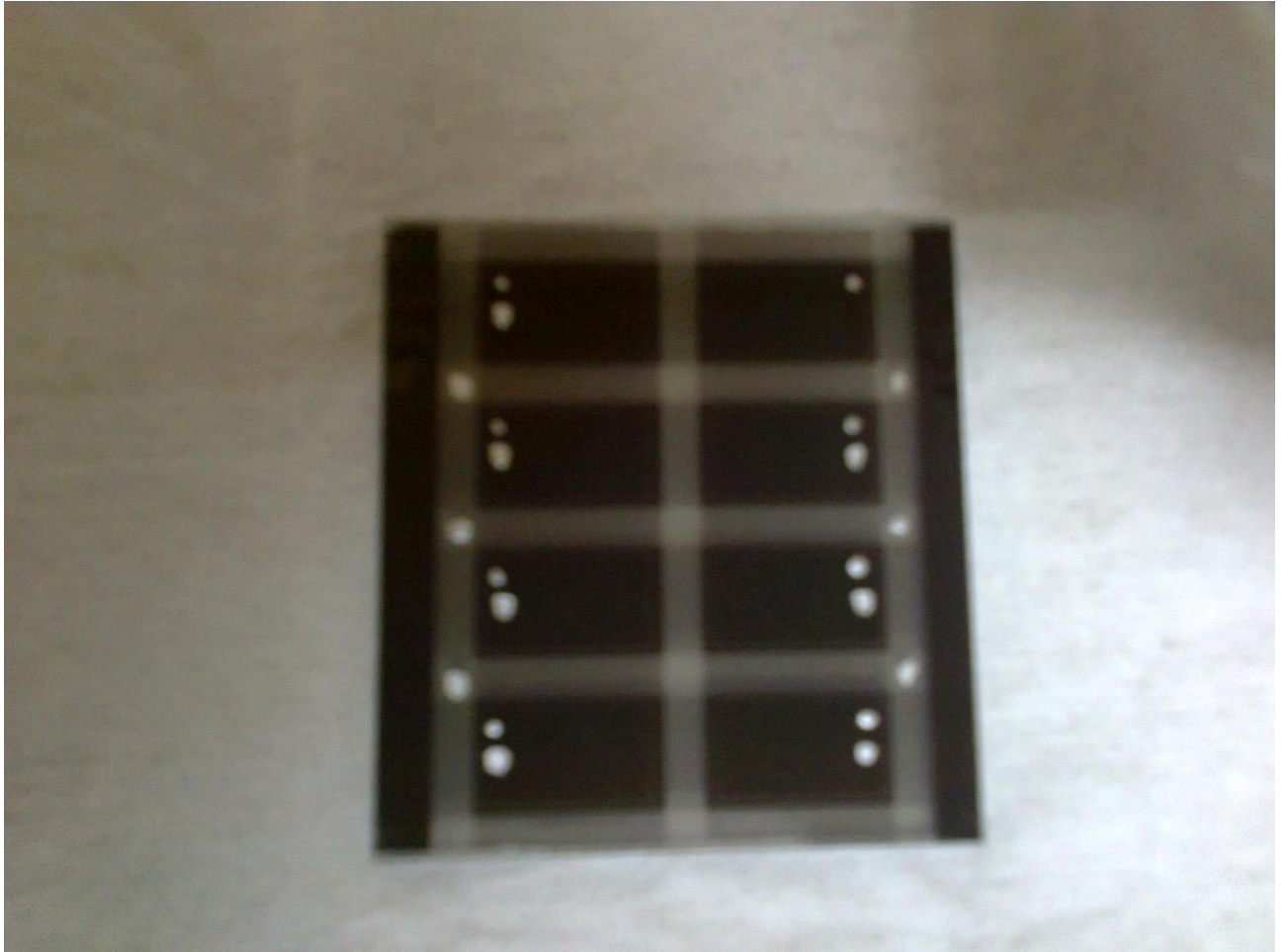
Εικόνα 5.4.1: Συνδεσμολογία πειράματος

Η δομή τόσο των p-i-p όσο και των p-i-n δειγμάτων μας παρουσιάζεται στην εικόνα 5.4.2

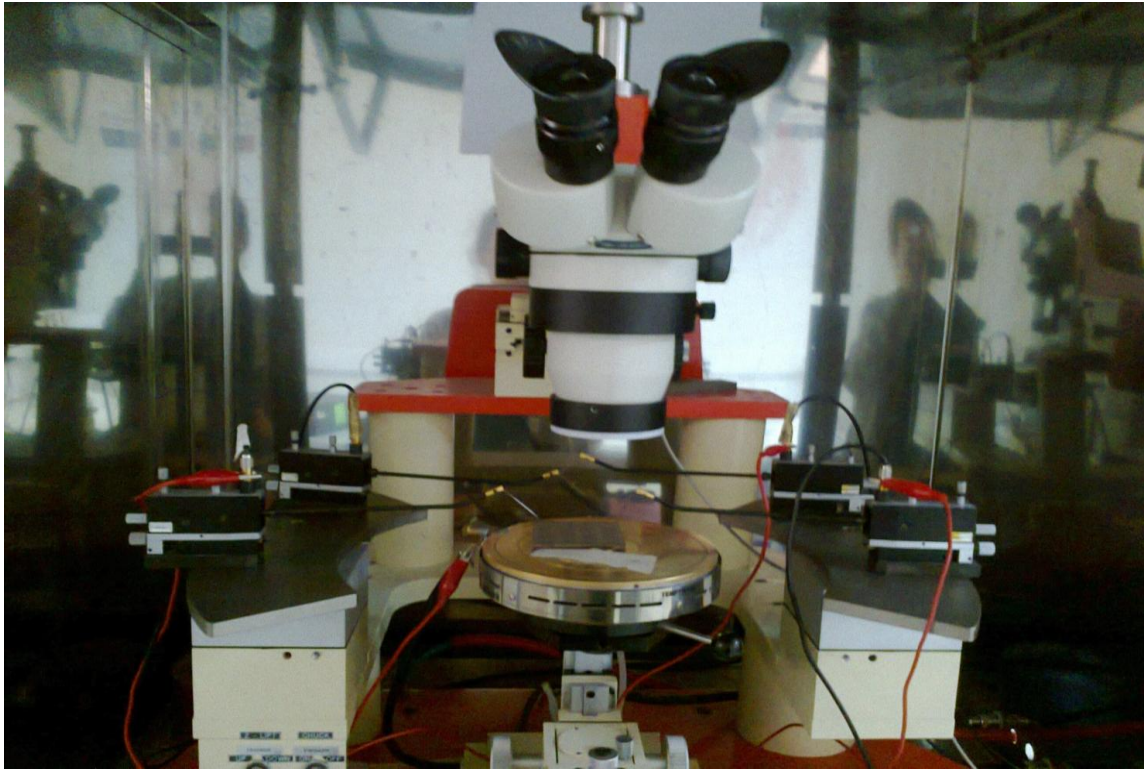


Εικόνα 5.4.2 : Δομές των προς μελέτη δειγμάτων μας

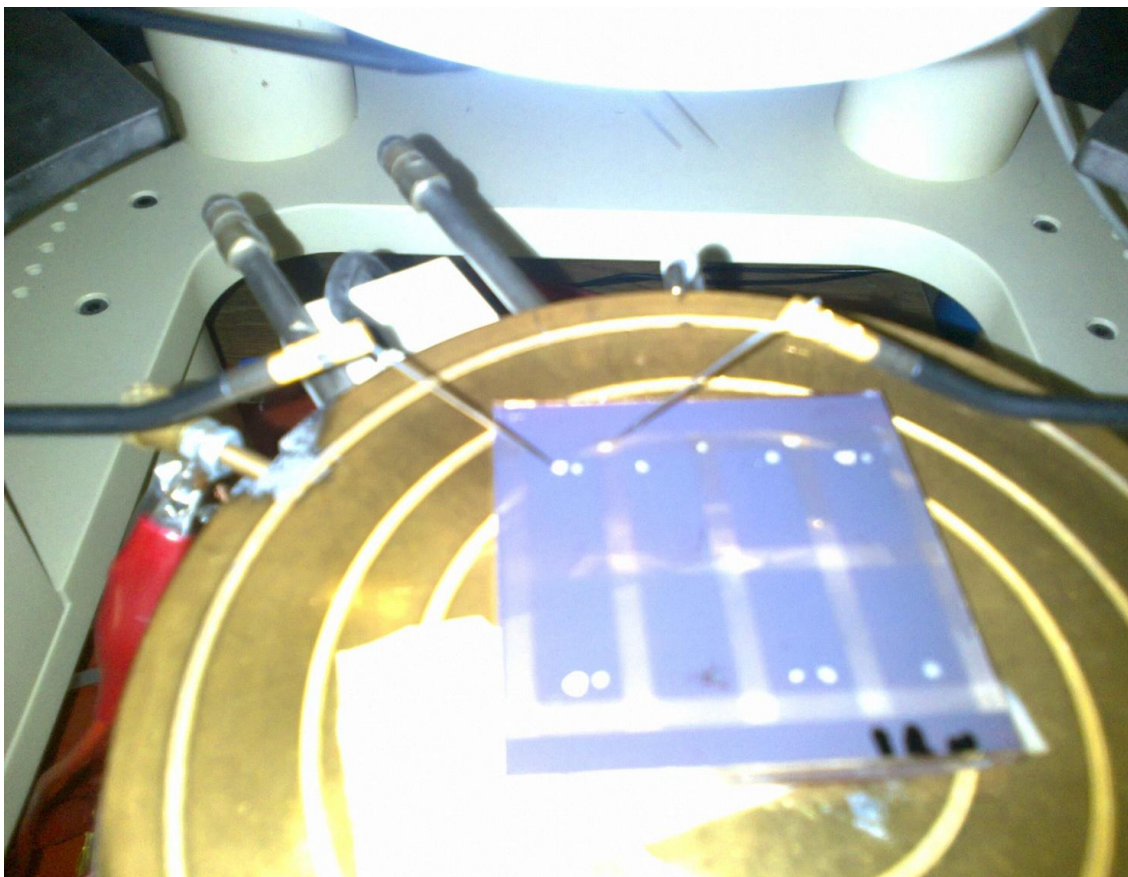
Εικόνες από το εργαστήριο και την διαδικασία των ηλεκτρικών μετρήσεων φαίνονται στις πιο κάτω εικόνες:



Εικόνα 5.4.3 : Κάτοψη των δειγμάτων μας μετά την επικάλυψη με silver paste(λευκά σημάδια)



Εικόνα 5.4.4 : Διάταξη ηλεκτρικών μετρήσεων σε συνθήκες δωματίου



Εικόνα 5.4.5 : Τρόπος τοποθέτησης των ακίδων πάνω στο δείγμα



Εικόνα 5.4.6 : Διάταξη για ηλεκτρικές μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες και συνθήκες κενού



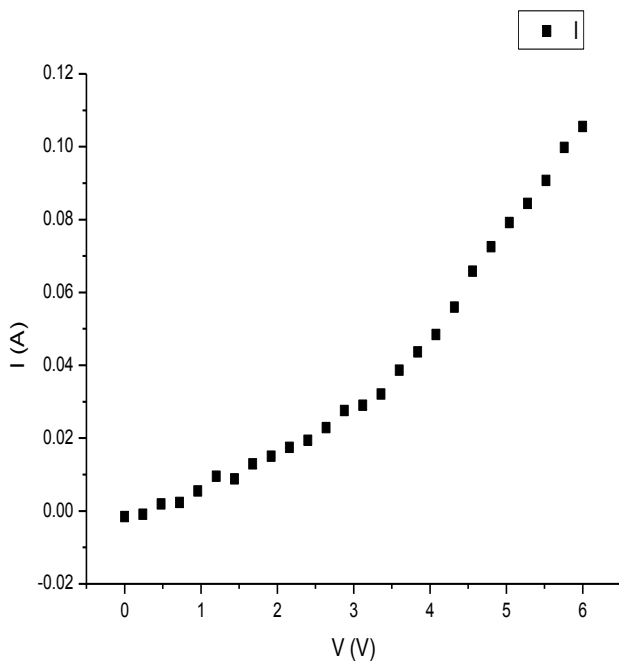
Εικόνα 5.4.7 : Θάλαμος χαμηλών θερμοκρασιών

5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

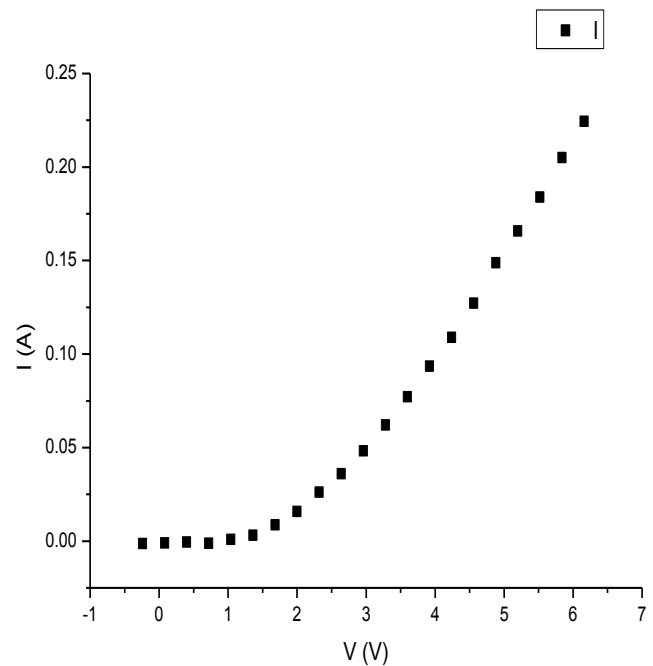
Ως σφάλμα ορίζουμε ένα σφάλμα ανάγνωσης της ψηφιακής μέτρησης για το ρεύμα ,οπότε θεωρούμε ότι στον τύπο (5.3.6) ισχύει $I = x \pm \delta I, \delta I = 0.00005$ επειδή η μέτρηση για το ρεύμα μας δίνεται με ακρίβεια πέντε δεκαδικών ψηφίων. Από την θεώρηση αυτή προκύπτει λόγω της διάδοσης σφαλμάτων ότι $\mu = x \pm \delta \mu, \delta \mu = \kappa * \delta I = 0.18 * 10^{-5}$ για τα δείγματα μικροκρυσταλλικού πυριτίου και $\mu = x \pm \delta \mu, \delta \mu = \kappa * \delta I = 0.29 * 10^{-7}$ για τα δείγματα άμορφου πυριτίου, όπου έθεσα για ευκολία $\kappa = \frac{8t^3}{9\varepsilon AV^2}$. Τα σφάλματα αυτά ισχύουν για όλες τις παρακάτω μετρήσεις αλλά δεν απεικονίζονται στα γραφήματα λόγω της μικρής τιμής τους.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ I-V

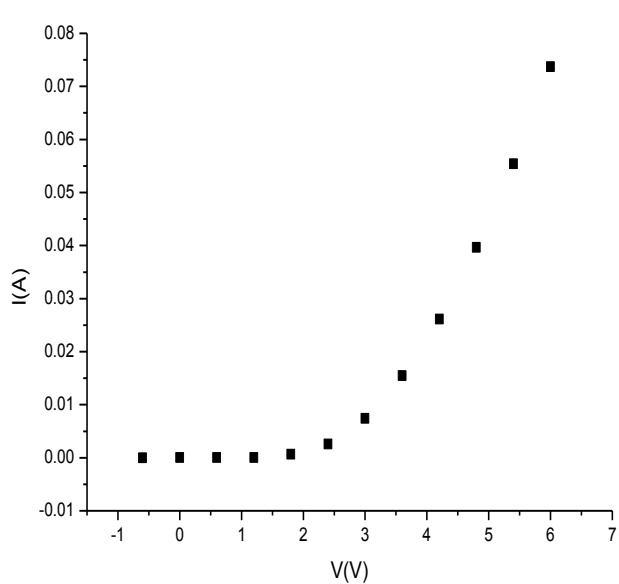
1. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται πιο κάτω είναι μετά την επικάλυψη των δειγμάτων με silver paste ούτως ώστε να μειώσουμε την αντίσταση επαφής. Οι μετρήσεις λαμβάνονται υπό θερμοκρασία δωματίου και σκοτάδι.



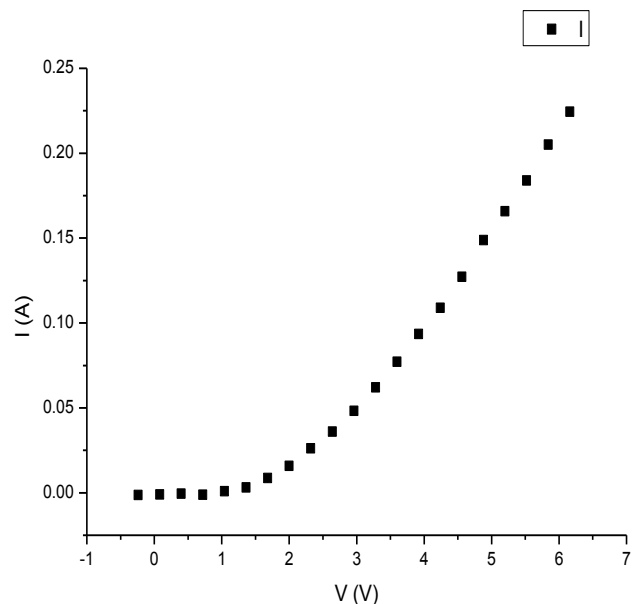
Εικόνα 1: Δείγμα *rip_15b_mc-Si*, $T=300K$



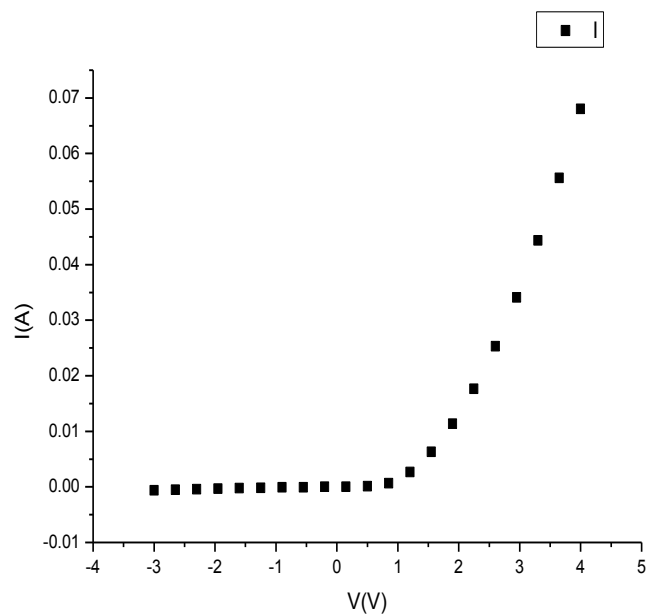
Εικόνα 2: Δείγμα *rip_15b_aSi*, $T=300K$



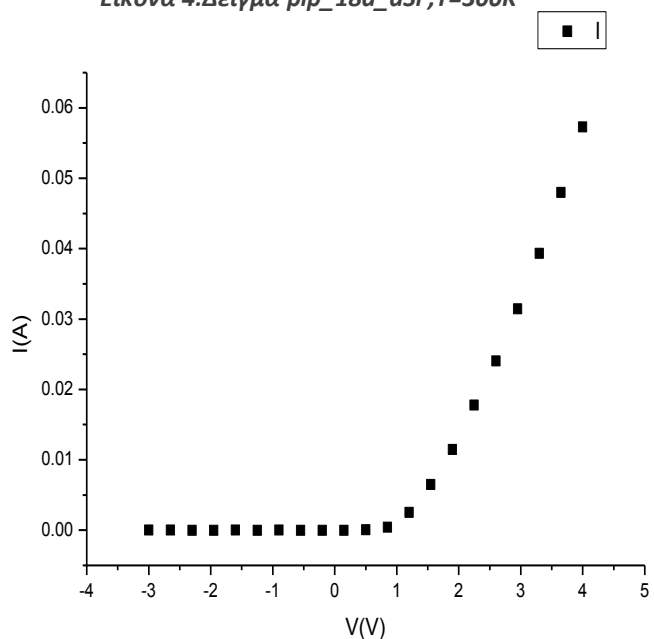
Εικόνα 3: Δείγμα pip_18a_mc-Si, T=300K



Εικόνα 4: Δείγμα pip_18a_aSi, T=300K



Εικόνα 5: Δείγμα pip_15b, ορθή πόλωση, T=300K



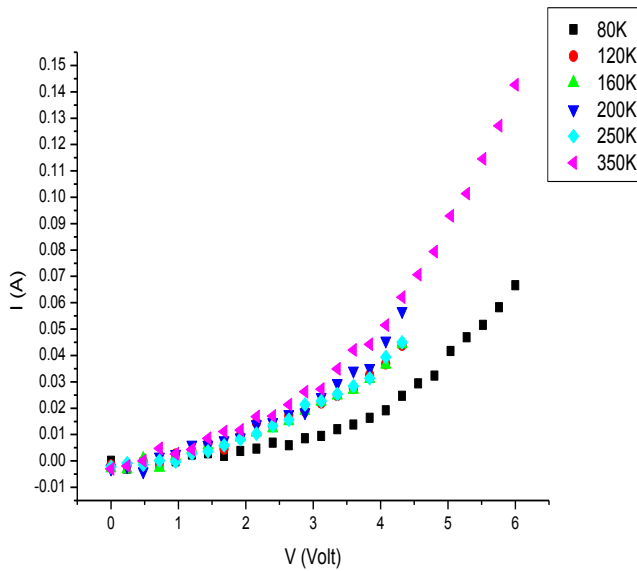
Εικόνα 6: Δείγμα pip_18a, ορθή πόλωση, T=300K

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΥΚΙΝΗΣΙΕΣ ΤΩΝ ΟΠΩΝ ΑΝΑ ΔΕΙΓΜΑ

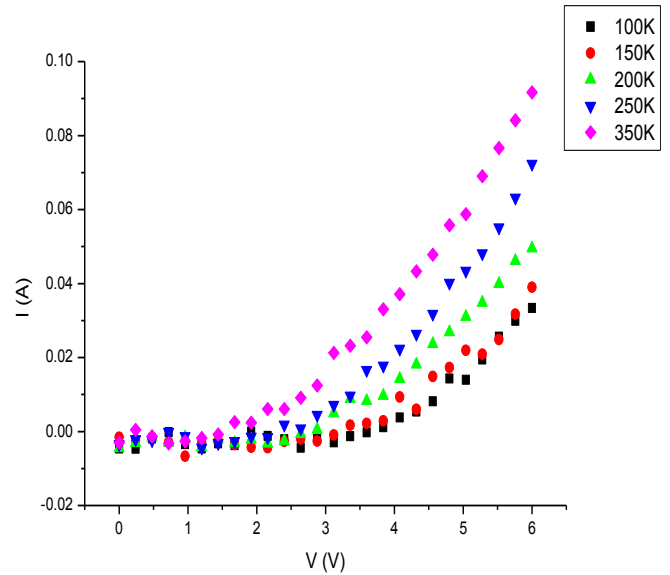
ΚΑΙ ΓΙΑ ΜΙΑ ΤΥΧΑΙΑ ΚΥΨΕΛΙΔΑ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΩΜΑΤΙΟΥ

ΔΕΙΓΜΑ:	pip_15b_mc-Si	pip_15b_aSi	pip_18a_mc-Si	pip_18a_aSi
CELL	μ(cm ² /V*s)	μ(cm ² /V*s)	μ(cm ² /V*s)	μ(cm ² /V*s)
cell_4c	3.12E-03	1.14E-04	2.60E-03	1.14E-04

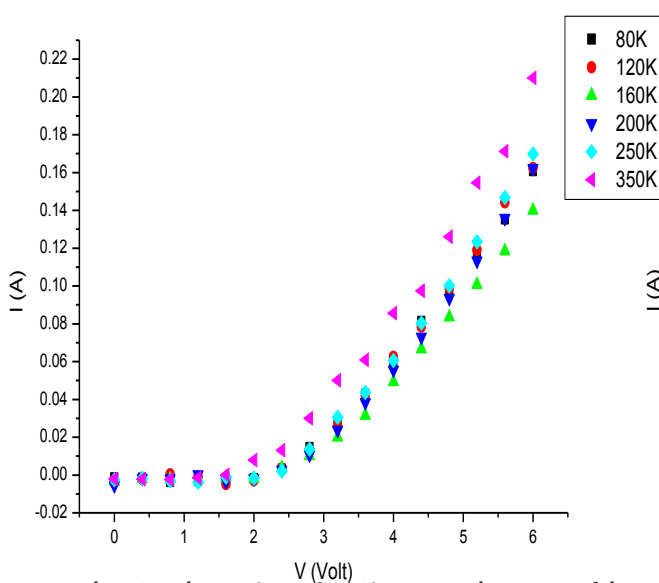
2. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται πιο κάτω αφορούν τα δείγματα μας με silver paste ενώ τα αποτελέσματα για το ρεύμα λήφθηκαν υπό συνθήκες κενού, σκότους και μεταβλητής θερμοκρασίας από 80K έως 350K, με την βοήθεια αερίου αζώτου.



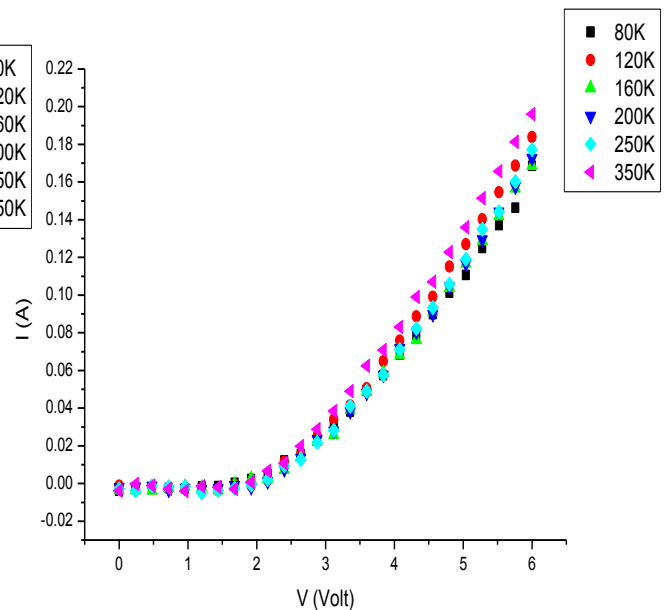
Εικόνα 7: Δείγμα rip_15b_mc-Si, σε κενό και χαμηλές T



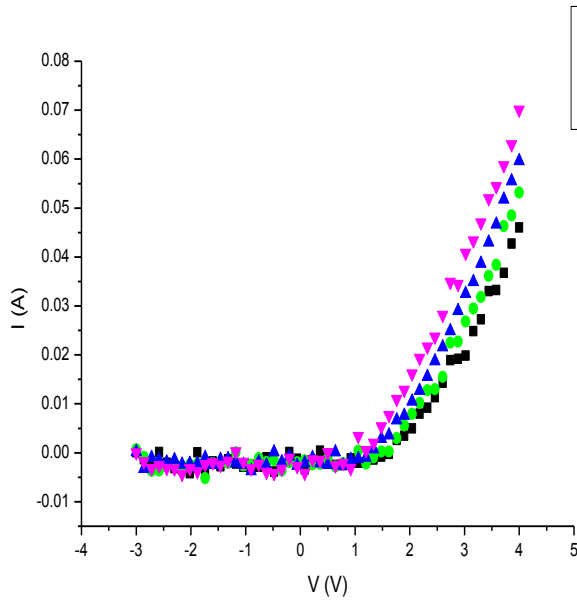
Εικόνα 8: Δείγμα rip_18a_mcSi, σε κενό και χαμηλές T



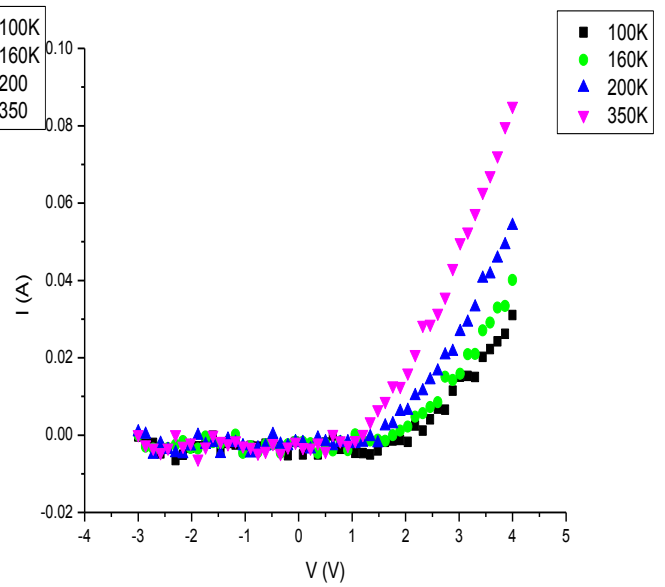
Εικόνα 9: Δείγμα rip_15b_alphaSi, σε κενό και χαμηλές T



Εικόνα 10: Δείγμα rip_18a_alphaSi, σε κενό και χαμηλές T



Εικόνα 11: Δείγμα *pip_15b*, σε κενό και χαμηλές *T*

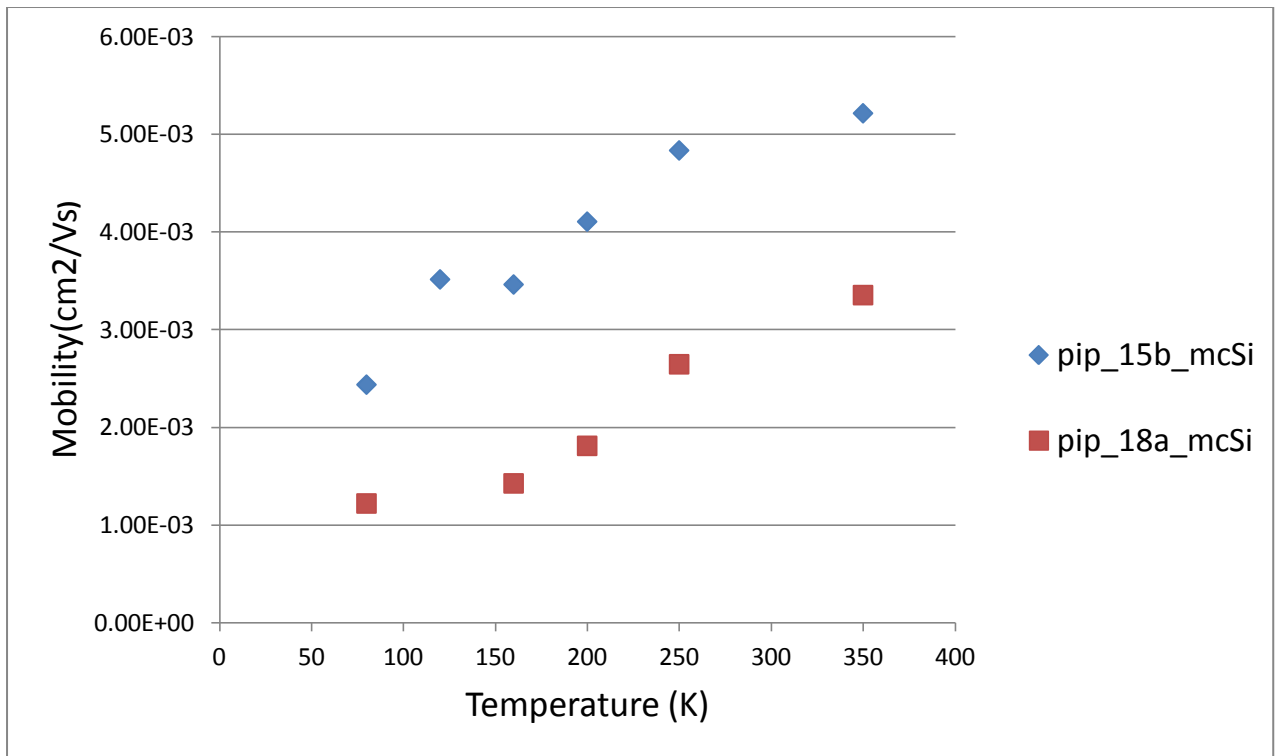


Εικόνα 12: Δείγμα *pip_18*, σε κενό και χαμηλές *T*

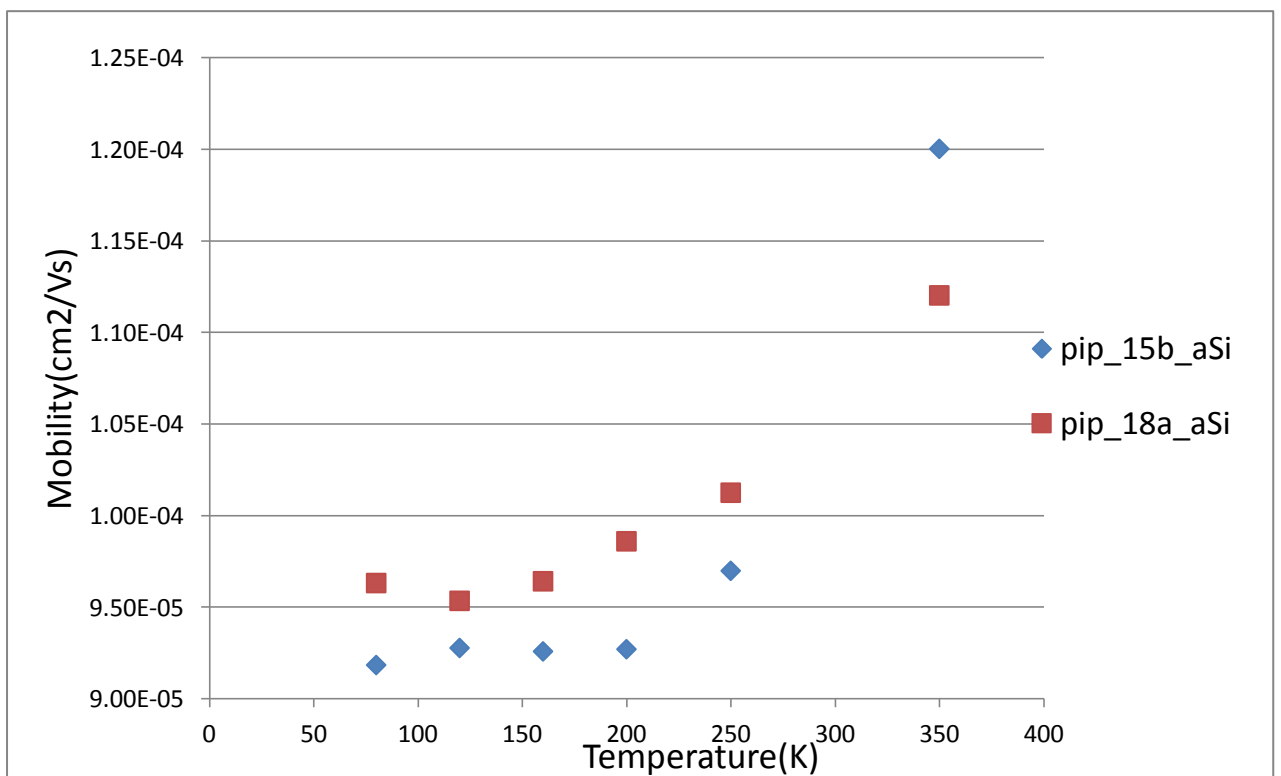
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΥΚΙΝΗΣΙΕΣ ΤΩΝ ΟΠΩΝ ΑΝΑ ΔΕΙΓΜΑ

ΣΤΟ ΚΕΝΟ ΚΑΙ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

ΔΕΙΓΜΑ	<i>pip_15b_mcSi</i>	<i>pip_15b_aSi</i>	<i>pip_18a_mcSi</i>	<i>pip_18a_aSi</i>
ΚΥΨΕΛΙΔΑ	cell 3c	cell 2b	cell 2b	cell 2b
	$\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$
T=80K	2.44E-03	9.19E-05	1.22E-03	9.63E-05
T=120K	3.51E-03	9.28E-05	--	9.54E-05
T=160K	3.46E-03	9.26E-05	1.43E-03	9.64E-05
T=200K	4.11E-03	9.27E-05	1.81E-03	9.86E-05
T=250K	4.83E-03	9.70E-05	2.65E-03	1.01E-04
T=350K	5.22E-03	1.20E-04	3.35E-03	1.12E-04



Εικόνα 13: Η κινητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας για δύο δείγματα p-i-p μικροκρυσταλλικού πυριτίου στο σκοτάδι



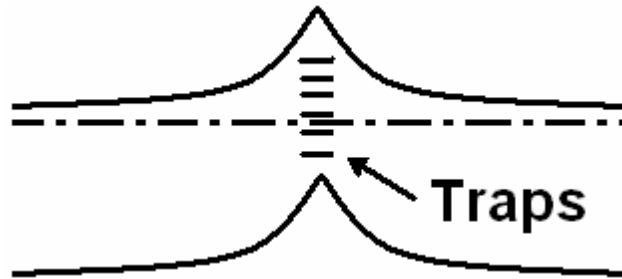
Εικόνα 14: Η κινητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας για δύο δείγματα p-i-p άμορφου πυριτίου στο σκοτάδι

5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως παρατηρούμε οι χαρακτηριστικές I-V μοιάζουν με τις θεωρητικές και όπως αναμενόταν, το ρεύμα είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης για μικρά πεδία ενώ ακολουθεί μια τετραγωνική εξάρτηση από την τάση για μεγαλύτερα πεδία. Το ρεύμα μεταβαίνει από την ωμική στην SCLC περιοχή λειτουργίας όταν η πυκνότητα των εγχεόμενων φορέων πλειονότητας υπερβεί αυτή των φορέων που δημιουργούνται θερμικά. Αυτό συμβαίνει λόγω της εξάρτησης της ευκινησίας των φορέων από το πεδίο για μεγάλα ηλεκτρικά πεδία.

- ❖ Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι τα δείγματα άμορφου πυριτίου για τις ίδιες τάσεις ,εμφανίζουν διπλάσιες σχεδόν τιμές ρεύματος σε σχέση με τα μικροκρυσταλλικά. Αυτό όμως είναι αναμενόμενο αφού το πάχος t του ενδογενούς τμήματος στα άμορφα δείγματα είναι μόλις 200nm ενώ στα δείγματα mc-Si είναι 800nm. Από την εξίσωση (5.3.6) για το ρεύμα είναι φανερό ότι εφόσον η τιμή του είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τρίτη δύναμη του πάχους t ,καθώς το πάχος μειώνεται ,το ρεύμα θα αυξάνεται.
- ❖ Παρατηρούμε μεγαλύτερες ευκινησίες στο μικροκρυσταλλικό πυρίτιο από ότι στο άμορφο. Αυτό συμβαίνει γιατί στον μικροκρυσταλλικό ημιαγωγό οι φορείς μπορούν να κινηθούν πιο εύκολα λόγω των κρυστάλλων. Μπορούν να περάσουν μέσα από αυτούς ή περιμετρικά των ορίων τους και έτσι τα πιθανά μονοπάτια διέλευσης αυξάνονται.
- ❖ Παρατηρούμε ότι καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται από τους 80K στους 350K, το ρεύμα αυξάνεται. Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός φ/β στοιχείου καθορίζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντός του, από την ένταση της ακτινοβολίας που το διεγείρει και από άλλες παραμέτρους όπως η ένταση του ανέμου. Το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας σύμφωνα με τη σχέση $Eg(T) = Eg(0) - a \cdot T^2 / T + b$, όπου a , b είναι εμπειρικοί συντελεστές που εξαρτώνται από το υλικό. Έτσι τα ηλεκτρόνια μπορούν μετά την επιβολή τάσης να το διασχίσουν πιο εύκολα και το ρεύμα αυξάνεται.
- ❖ Με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται επίσης αύξηση της ευκινησίας των φορέων η οποία είναι σημαντικότερη στο μικροκρυσταλλικό από ότι στο άμορφο πυρίτιο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στα όρια των κρυστάλλων στο μικροκρυσταλλικό υλικό. Μεταξύ των κρυστάλλων υπάρχουν πολλές

«παγίδες» (βαθείς ενεργειακές στάθμες) που προκαλούν μια αύξηση στην ζώνη αγωγιμότητας και σθένους όπως φαίνεται στο σχήμα :



Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται βελτιώνεται η θερμιονική μεταφορά κατά μήκος των φραγμάτων σε κάθε όριο κρυστάλλου. Αυτή η μείωση στα ύψη των φραγμάτων διευκολύνει τις οπές (στην περίπτωση μας) να διασχίσουν τα φράγματα και να κινηθούν μεταξύ των κρυστάλλων αυξάνοντας έτσι την ευκινησία τους. Οι παγίδες λοιπόν στα όρια των κρυστάλλων παίζουν σημαντικό ρόλο στην ενεργό ευκινησία των φορέων του υλικού.

- ❖ Η τάση μετάβασης V_{SCLC} από την ωμική στην SCLC περιοχή λειτουργίας είναι σχεδόν σταθερή κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας από 80-350K και αυτό φανερώνει ότι η συγκέντρωση των φορέων είναι σταθερή με την θερμοκρασία.

Κεφάλαιο 6 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.1 Sentaurus Synopsys

Το Sentaurus Synopsys είναι ένας προηγμένος 1D,2D και 3D προσομοιωτής για την ανάπτυξη και την βελτίωση τεχνολογικών διαδικασιών ημιαγωγικών δομών πυριτίου και άλλων υλικών. Είναι ένας προσομοιωτής νέας γενιάς που φτιάχτηκε για να αντιμετωπίζει προκλήσεις της σύγχρονης αλλά και της μελλοντικής τεχνολογίας.

Το Sentaurus Process περιλαμβάνει κάποιες καθορισμένες παραμέτρους (default parameters) και έτσι παρέχει ένα εργαλείο πρόβλεψης για την προσομοίωση ενός ευρέος φάσματος τεχνολογικών εφαρμογών ,από νανοτεχνολογίες CMOS μέχρι μεγάλης κλίμακας διατάξεις υψηλών τάσεων. Το Sentaurus Process είναι κομμάτι μια ολοκληρωμένης «σουίτας» από βασικά TCAD προϊόντα φτιαγμένα για πολυδιάστατες διαδικασίες προσομοίωσης ,ενσωματωμένα σε ένα ισχυρό περιβάλλον εργασίας. Το Sentaurus Process δέχεται ως input μία ακολουθία από εντολές που είτε εισάγονται στην γραμμή εντολών ,είτε αποτελείται από ένα αρχείο εντολών. Οι ρυθμίσεις των παραμέτρων πρέπει να βρίσκονται σε ένα ξεχωριστό αρχείο το οποίο δηλώνεται στην αρχή των αρχείων εισόδου (input files). Υπάρχει ωστόσο μία πληθώρα εντολών για την επιλογή του κατάλληλου φυσικού μοντέλου, των παραμέτρων καθώς και της εξαγωγής των γραφικών δεδομένων.

Το Sentaurus Device προσομοιώνει με την σειρά του αριθμητικά την ηλεκτρική συμπεριφορά απομονωμένων ημιαγωγικών διατάξεων ή πολλών μαζί συνδεδεμένων σε ένα κύκλωμα. Τα ρεύματα ,οι τάσεις και τα φορτία υπολογίζονται με βάση μια σειρά από φυσικές εξισώσεις που περιγράφουν την κατανομή των φορέων και τους μηχανισμούς αγωγιμότητας. Μια ημιαγωγική διάταξη όπως ένα τρανζίστορ παρουσιάζεται στον προσομοιωτή ως μία εικονική συσκευή της οποίας οι φυσικές ιδιότητες διακριτοποιούνται σε ένα ανομοιόμορφο δίκτυο (ή πλέγμα) από κόμβους (grid ή mesh). Ως εκ τούτου μια εικονική συσκευή γίνεται η προσέγγιση μίας πραγματικής. Συνεχείς ιδιότητες του ημιαγωγού όπως η νόθευση (doping) αντιπροσωπεύονται στην προσομοίωση από διακριτά σημεία στο πλέγμα και έτσι μπορούν να καθοριστούν από την μέθοδο της αναγωγής. Κάθε εικονική δομή περιγράφεται στην Synopsys TCAD σουίτα από ένα αρχείο .tdr το οποίο περιλαμβάνει τις ακόλουθες πληροφορίες:

1)Την γεωμετρία την διάταξης παρέχοντας μια περιγραφή των διάφορων περιοχών της ,δηλαδή τα διαχωριστικά όρια ,τους τύπους των υλικών που χρησιμοποιούνται

καθώς και τις θέσεις όλων των ηλεκτρικών επαφών. Περιέχει επίσης το πλέγμα και τα σημεία του.

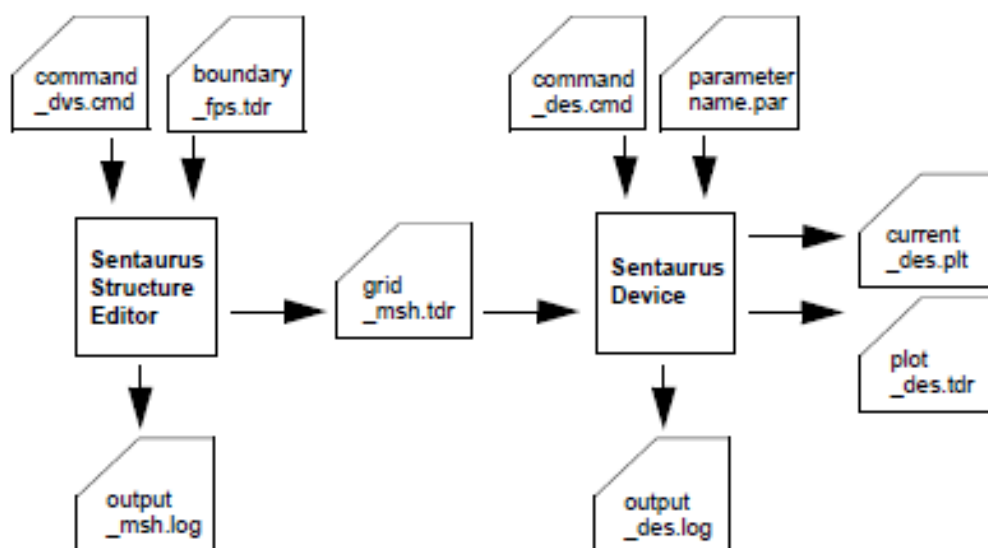
2) Τα πεδία δεδομένων περιλαμβάνουν ιδιότητες της ημιαγωγικής δομής όπως την νόθευση και την σχέση της με τα διακριτά σημεία του πλέγματος. Επίσης για 2D προσομοίωση το Sentaurus υποθέτει μία τρίτη διάσταση 1μm η οποία λειτουργεί σαν πολλαπλασιαστής για το ρεύμα.

Τα χαρακτηριστικά του Sentaurus Device είναι πολλά και μπορούν να παρουσιαστούν συνοπτικά ως εξής:

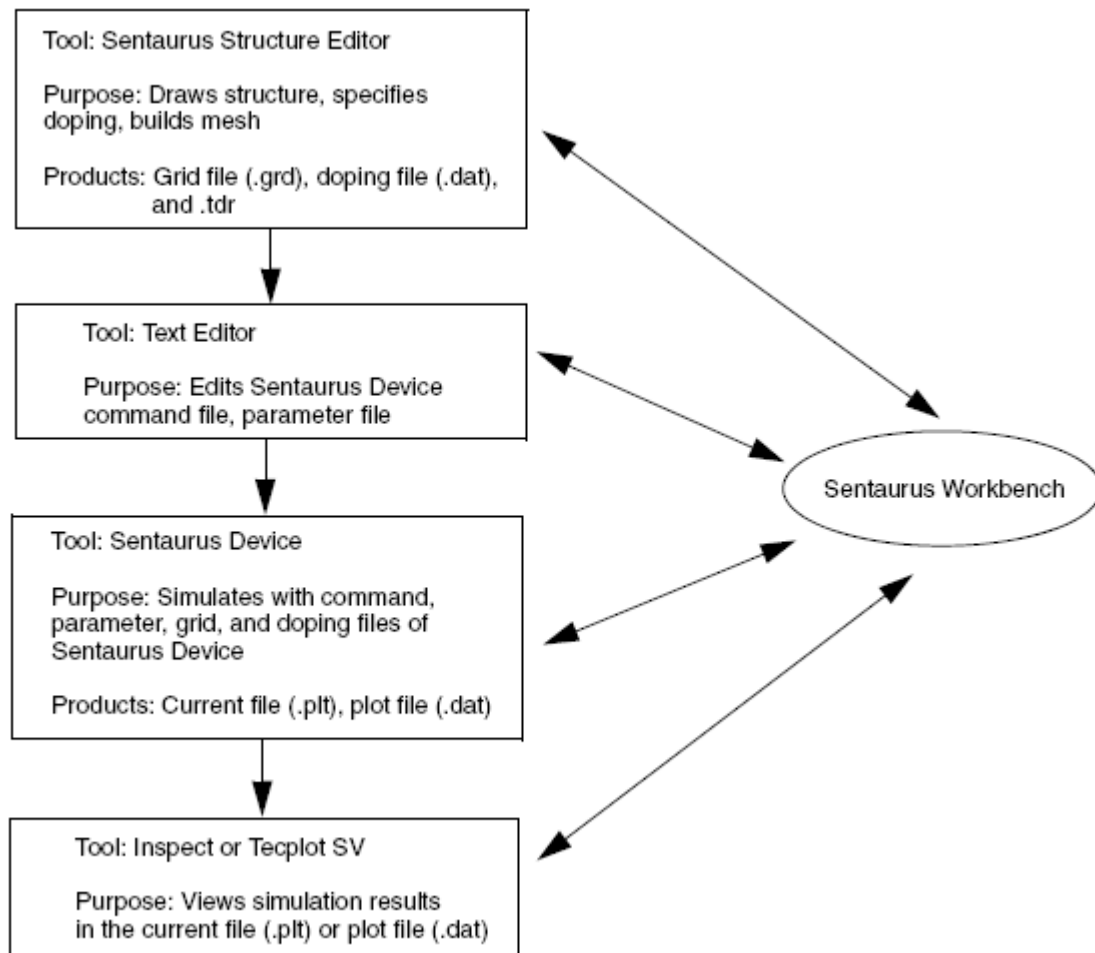
- 1) Ένα εκτεταμένο σετ φυσικών μοντέλων που διέπουν την εκάστοτε ημιαγωγική δομή (όπως μοντέλα διάχυσης, θερμοδυναμικής και υδροδυναμικής)
- 2) Γενική υποστήριξη για διάφορες δομές διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών(1D,2D,3D)

Συσχέτιση αρχείων- Ροή προσομοίωσης

Μια τυπική διαδικασία προσομοίωσης από το Sentaurus Device ακολουθείται από περαιτέρω χρήση πλεγμάτων (re-meshing) χρησιμοποιώντας το Sentaurus Structure Editor ή το Sentaurus Mesh. Με τον τρόπο αυτό ο έλεγχος για το καθορισμό του πλέγματος γίνεται αυτόματα μέσω του αρχείου file_dvs.cmd. Το Sentaurus Device χρησιμοποιείται για την ηλεκτρική προσομοίωση της διάταξης. Ενώ ,τέλος, το Tecplot SV και το Inspect απεικονίζουν τα αποτελέσματα της 2D,3D προσομοίωσης και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αντίστοιχα.



Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται σχηματικά η ροή των διαδικασιών σε μια τυπική προσομοίωση μιας ημιαγωγίμης διάταξης.



Για την εκκίνηση του Sentaurus Device από την γραμμή εντολών χρησιμοποιείται η εντολή `sdevice <command_filename>` .

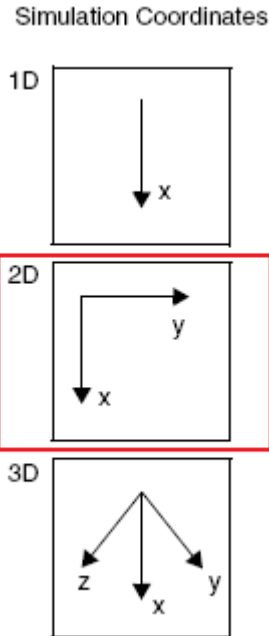
Το αρχείο εντολών του Sentaurus Device οργανώνεται σε έξι βασικά μέρη :

1. File Section
2. Electrode Section
3. Physics Section
4. Plot Section
5. Math Section
6. Solve Section

6.2 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ SENTAURUS DEVICE

Σύστημα συντεταγμένων

Για μία 2D προσομοίωση όπως την δική μας το sentaurus αντιλαμβάνεται τους άξονες συντεταγμένων όπως είναι σημειωμένοι στο παρακάτω σχήμα :



File Section

```
File {
*-Input
  Grid= "pin_sde_output_msh.tdr"
  Parameter= "Silicon.par"

*-Output
  Current= "pin_out_des.plt"
  Plot= "pin_out_des.tdr"
  Output= "pin_out_des.log"
}
```

όπου ως input files δίνουμε το “Grid” που είναι στην ουσία το αρχείο που καθορίζει το πλέγμα mesh και στο “Parameter” δηλώνουμε το υλικό που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωση και στην δική μας περίπτωση είναι το πυρίτιο. Ως output files

Electrode Section

```
Electrode {  
  { Name= "upContact" Voltage= 0.0 }  
  { Name= "downContact" Voltage= 0.0 }  
}
```

Στο μέρος αυτό δηλώνονται και αρχικοποιούνται οι δύο επαφές (ηλεκτρόδια) της διάταξης μας τα οποία ονομάζομαι κατά βούληση upContact και downContact. Η αρχική τιμή της τάσης πριν εφαρμόσουμε κάποιο πεδίο ,καθορίζεται ως μηδενική .

Physics Section

```
Physics {  
  AreaFactor=8e3  
  Recombination (SRH(DopingDepedence) Auger)  
  Mobility (DopingDepedence(PhuMob2) )  
  EffectiveIntrinsicDensity (BandGapNarrowing (TableBGN))  
  Traps(Donor Level EnergyMid=0 fromMidBandGap Conc=1e15 eXsection=1e-14 hXsection=1e-14)  
} * end Physics
```

Στο κομμάτι αυτό ,όπως δηλώνει και το όνομα του ,επιλέγονται τα κατάλληλα φυσικά μοντέλα που θα προσομοιώσουν με τον βέλτιστο προσεγγιστικό τρόπο την φυσικά χαρακτηριστικά του προβλήματος μας. Στην δικά μας περίπτωση όπου ρεύμα διαπερνά μια p-i-p δίοδο γίνεται χρήση ενός μοντέλου για την επανασύνδεση των φορέων και συγκεκριμένα το μοντέλο που περιγράφει την θεωρία Shockley-Read (η οποία εξαρτάται και από την συγκέντρωση της νόθευσης) και την θεωρία επανασύνδεσης Auger. Για την ευκινησία των φορέων επιλέχθηκε ένα μοντέλο το οποίο να δίνει την εξάρτηση της ευκινησίας από την συγκέντρωση των προσμίξεων (καθώς όπως ξέρουμε οι προσμίξεις είναι κέντρα σκέδασης) και επιπρόσθετα το μοντέλο "PhuMob2" προκειμένου να περιγράψει την θερμοκρασιακή εξάρτηση της ευκινησίας των φορέων λαμβάνει υπόψη του την σκέδαση ηλεκτρονίων-οπών καθώς και τις ατέλειες λόγω ιονισμένων προσμίξεων . Δηλαδή το "PhuMob2" μοντέλο για την ευκινησία των φορέων λαμβάνει υπόψη του τις σκεδάσεις και μεταξύ των φορέων και τις σκεδάσεις μεταξύ φορέων και προσμίξεων. Επίσης δηλώνεται ένα μοντέλο για την κατανομή των παγίδων "Traps".

Plot Section

```
Plot {
*- Doping Profiles
   Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
*- Band structure
   BandGap BandGapNarrowing ElectronAffinity
   ConductionBandEnergy ValenceBandEnergy
   eQuasiFermiEnergy hQuasiFermiEnergy
*- Carrier Densities:
   eDensity hDensity
   EffectiveIntrinsicDensity IntrinsicDensity
*- Fields, Potentials and Charge distributions
   ElectricField/Vector
   Potential
   SpaceCharge
*- Currents
   Current/Vector eCurrent/Vector hCurrent/Vector
   CurrentPotential * for visualizing current lines
   eMobility hMobility
   eCurrentDensity
   hCurrentDensity
   ConductionCurrentDensity
   TotalCurrentDensity * eCurrent + hCurrent + DisplacementCurrent
*- Generation/Recombination
   SRHRecombination AugerRecombination TotalRecombination SurfaceRecombination
   eLifeTime hLifeTime
}
```

Στο συγκεκριμένο μέρος δηλώνονται μεγέθη τα οποία μπορούμε να εξάγουμε και να απεικονίσουμε μετά την προσομοίωση είτε με χρήση του `tecplot` είτε με χρήση του `inspect`. Τα κυριότερα και αυτά που μας απασχόλησαν στην δική μας περίπτωση ήταν το συνολικό ρεύμα “`TotalCurrentDensity`” που διαπερνούσε την διάταξη μας.

Math Section

Το Setaurus Device λύνει τις εξισώσεις για το πρόβλημα (που στην ουσία είναι ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων), πάνω σε σημεία του πλέγματος και με επαναληπτικό τρόπο. Για κάθε επανάληψη υπολογίζεται ένα σφάλμα ώστε τελικά το πρόγραμμα να συγκλίνει σε μία λύση με μικρό σφάλμα.

```
Math {
   Traps (Damping=100)
   -CheckUndefinedModels
   Method= ILS
   WallClock
   Extrapolate
   RelErrControl
   Derivatives
   Digits= 5
   Iterations= 150
   ExitOnFailure
}
```

Solve Section

Το τμήμα αυτό δίνει μια σειρά από λύσεις που θα προκύψουν από τις εξισώσεις. Όπως έχει σημειωθεί και στα σχόλια του κώδικα η τάση στα δύο ηλεκτρόδια ορίζεται από -2V έως 7V και με ένα σταθερό βήμα το Sentaurus λύνει για τα σημεία του mesh. Τα αποτελέσματα μπορούν να σχεδιαστούν και να προβληθούν με την βοήθεια του Inspect εφόσον σώζονται στα αρχεία I_V_CURVE_positive.plt και I_V_CURVE_negative.plt για θετικές και αρνητικές τάσεις αντίστοιχα.

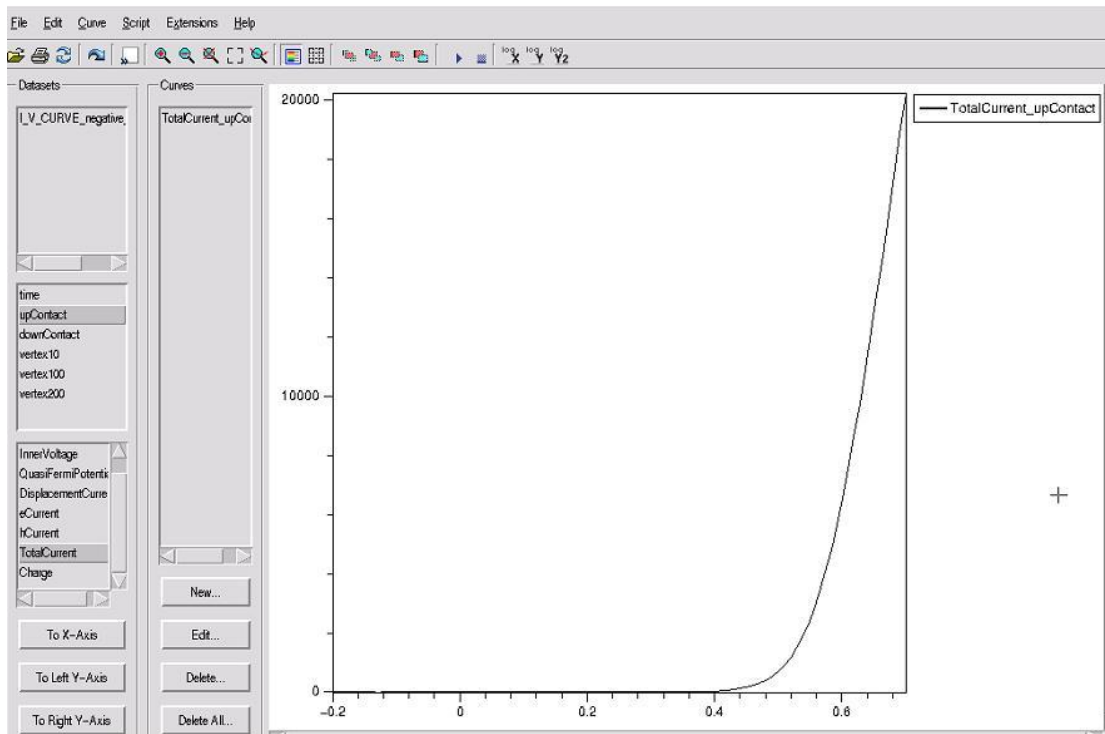
```
Solve{
  NewCurrentPrefix= "init"
  Poisson
    Coupled { Poisson Electron }
    Coupled { Poisson Electron Hole }
  NewCurrentPrefix= ""
  ## Coupled (Iterations= 100){ Poisson Electron Hole }
  Plot (FilePrefix= "PoissonElectronHole_zeroV")

  * voltage controlled ramping until 0.7V
  NewCurrentPrefix="I_V_CURVE_positive_"
  Quasistationary (InitialStep=0.05 MaxStep=0.1 MinStep=0.001 Goal{ Name="upContact" Voltage=0.7
    { Coupled { Poisson Electron Hole }
      CurrentPlot (time= (range= (0 1.0) intervals=100))}
      Save(FilePrefix="rampedupregion")
      Plot (FilePrefix= "PoissonElectronHole_plus_5V_Plot")

  * voltage controlled ramping until -0.2V
  NewCurrentPrefix="I_V_CURVE_negative_"
  Quasistationary (InitialStep=0.05 MaxStep=0.1 MinStep=0.001 Goal{ Name="upContact" Voltage=-0.2
    { Coupled { Poisson Electron Hole }
      CurrentPlot (time= (range= (0 1.0) intervals=100))}
      Save(FilePrefix="rampeddownregion")
      Plot (FilePrefix= "PoissonElectronHole minus 5V Plot")
}
```

6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στην παρούσα διαδικασία έγινε προσομοίωση μιας διάταξης p-i-n πυριτίου σχεδόν άμορφου στο οποίο είχαμε προσδιορίσει μία πυκνότητα παγίδων 10^{15} παγίδες/cm³. Στην συνέχεια με την βοήθεια του Inspect σχεδιάστηκε η χαρακτηριστική I-V όπως βλέπουμε στην πιο κάτω εικόνα. Η τάση δίνεται σε Volt και το συνολικό ρεύμα (TotalCurrent) σε Ampere.



Εικόνα 6.3.1 : Χαρακτηριστική I-V που προκύπτει από την προσομοίωση για p-i-n δίοδο.

Όπως είναι φανερό η τιμή του ρεύματος προκύπτει υπερβολικά μεγάλη σε σχέση με τα πειραματικά μας αποτελέσματα (10000mA έναντι ~100mA πειραματικά) και αυτό σημαίνει ότι κατά την προσομοίωση κάτι δεν πήγε καλά. Ίσως φταίει η επιλογή κάποιου φυσικού μοντέλου σε συνδυασμό με κάποια άλλη γεωμετρική ίσως παράμετρο η οποία δεν προσδιορίστηκε σωστά. Η βασικότερη όμως αδυναμία ήταν ο ορισμός της πειραματικής τιμής της ευκινησίας των οπών στο υλικό του προγράμματος το οποίο έκανε χρήση μίας πολύ μεγαλύτερης τιμής για την ευκινησία (περίπου $4 \cdot 10^2$ cm²/Vs). Θα πρέπει λοιπόν να γίνει περαιτέρω ανάλυση για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του πυριτίου που χρησιμοποιούμε.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η μέθοδος SCLC είναι μια καλή και εύχρηστη μέθοδος προσδιορισμού ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και κυρίως της ευκινησίας των φορέων πλειονότητας ενός υλικού σε μια διάταξη p-i-p ή n-i-n. Τα υλικά αυτά έπειτα ,όντας προσδιορισμένα ως προς τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πληθώρα τεχνολογικών εφαρμογών όπως στην περίπτωση μας για κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Σαν ένα γενικό συμπέρασμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι από το πείραμα επαληθεύτηκε ότι η κινητικότητα των φορέων σε άμορφο πυρίτιο είναι πολύ μικρότερη από αυτή στο μικροκρυσταλλικό καθώς και ότι η αύξηση της θερμοκρασίας βελτιώνει την κίνηση των φορέων μέσα στο υλικό ,ειδικά στην περίπτωση του μικροκρυσταλλικού πυριτίου.

Όσον αφορά τώρα την φωτοβολταϊκή τεχνολογία φαίνεται από τα βιβλιογραφικά δεδομένα που παρατέθηκαν στα κεφάλαια 2 και 3 πως υπάρχει συνεχής εξέλιξη καθώς και εξαιρετικές προοπτικές του συγκεκριμένου τομέα ανανεώσιμης ενέργειας. Πιο ειδικά τα λεπτά υμένια (Thin Films) είναι ένας τύπος φωτοβολταϊκού στοιχείου που χρησιμοποιεί όπως δηλώνει και το όνομα του μικρό πάχους υλικού το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η κατανάλωση υλικού και επομένως το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στο πλεονέκτημα όμως αυτό θα πρέπει να αντιπαρατεθεί η χαμηλότερη απόδοσή τους, η οποία κυμαίνεται περίπου στο 10%.

Τα ειδικότερα συμπεράσματα που αφορούν την εργασία αυτή καθώς και η περεταίρω ανάλυση τους παρατίθεται στα αντίστοιχα αντίστοιχα κεφάλαια.

Βιβλιογραφία

- [1] Microcrystalline Silicon Solar Cells, S. Guha and J. Yang United Solar Ovonic Corporation Troy, Michigan, Subcontract Report NREL/SR-520-38355 ,(August 2005)
- [2] The electrical properties of polycrystalline silicon films ,John Y. W. Seto, J. Appl. Phys. 46, 5247 (1975)
- [3] Hole drift mobility in $\mu\text{-Si:H}$, G. Juška, M. Viliūnas, K. Arlauskas, N. Nekrašas, N. Wyrsh et al. , J. Appl. Phys. 89, 4971 (2001)
- [4] Simplified Theory of Space-Charge-Limited Currents in an Insulator with Traps ,MURRAY A. LAMPERT ,RCA Laboratories, Radio CorPoratiort of America, Pritcetots, New Jersey (1956)
- [5] Field-dependent mobility from space-charge-limited current–voltage curves, Dario Natali and Marco Sampietro, J. Appl. Phys. 92, 5310 (2002)
- [6] Space charge limited current in a Film, Anatoly A.Grinberg ,Serge Luryi, fellow,IEEE, Mark R. Pinto and Norman L. Schryer, IEEE Transactions of Electron Devices, VOL 36, No 6., (JUNE 1989)
- [7] Space-Charge-Limited Currents in Solids ,A. ROSE ,Physical Review VOLU'ME 97, NUM BER 6 , (MARCH 1955)
- [8] SPACE-CHARGE-LIMITED CURRENT IN SILICON ,U. BUGET and G. T, WRIGHT, Electronic and Electrical Engineering Department, University of Birmingham, England, Solid-State Electronics Pergamon Press 1967. Vol. 10, pp. 199-207 (1966)
- [9] ON THE ADDITIVITY OF OHMIC AND SPACE CHARGE LIMITED CURRENTS, WILLIAM P. DUMKE, IBM Thomas J. Watson Research Centre, Yorktown Heights, NY 10598, U.S.A. , Solid State Electronics Vol 25. No. 2. pp. 101-103. (1982)
- [10] .S. Veprek and V. Marecek, Solid-State Electron. 11, 683 (1968)
- [11] Hole-mobility limit of amorphous silicon solar cells, Jianjun Liang, E. A. Schiff, S. Guha, Baojie Yan, and J. Yang, Appl. Phys. Lett. 88, 063512 (2006)
- [12] Complete microcrystalline pin solar cell—Crystalline or amorphous cell behavior, J. Meier, R. Flückiger, H. Keppner, and A. Shah, Appl. Phys. Lett. 65, 860 (1994)
- [13] Solar-grade silicon, B. R. BATHEY, M. C. CRETILLA, Journal of Materials Science 17 (1982)

- [14] IMPURITY DIFFUSION EFFECT ON P/I INTERFACE PROPERTIES OF P-I-N JUNCTION MICROCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS ,Takuya Matsui', Takashi Fujibayashi', Yoshiyuki Nasuno', Hitoshi Fukuhori', Yoshihiko Kanemitsu', Michio Kondo' and Akihisa Matsuda', 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18, 2003 Osaka, Japan
- [15] Intrinsic carrier concentration and minority carrier mobility of silicon from 77 to 300 K ,A. B. Sproul and M. A. Green, J. Appl. Phys. 73, 1214 (1993)
- [16] OBSERVATIONS OF SPACE-CHARGE-LIMITED CURRENTS IN p-TYPE SILICON, S. OKAZAKI and M. HIRAMATSU, Pergamon Press 1967. Vol. 10, pp. 273-279, (1966)
- [17] Electrical Properties of Silicon Containing Arsenic and Boron ,P. J. MORIN AND J. P. MAITA , Bell Telephone Laboratories, MNrray Hill, New Jersey , VOLUME 96, NUMBER 8 (1954)
- [18] On the Temperature Dependence of Hole Mobility in Silicon BY ASCHE and J. VON BORZESZKOWSKI , phys. stat. sol. 37, 433 (1970)
- [19] Hole drift-mobility measurements in microcrystalline silicon ,T. Dylla, F. Finger, and E. A. Schiff, Appl. Phys. Lett. 87, 032103 (2005)
- [20] Electron and hole drift mobility in amorphous silicon ,A. R. Moore, Appl. Phys. Lett. 31, 762 (1977)
- [21] Temperature dependence of minority hole mobility in heavily doped silicon ,Chih Hsin Wang, Konstantinos Misiakos, and Arnost Neugroschel, Appl. Phys. Lett. 57, 159 (1990)
- [22] The electrical properties of polycrystalline silicon films, John Y. W. Seto, J. Appl. Phys. 46, 5247 (1975)
- [23] Hole drift mobility in $\mu\text{-Si:H}$, G. Juška, M. Viliūnas, K. Arlauskas, N. Nekrašas, N. Wyršch et al., J. Appl. Phys. 89, 4971 (2001)
- [24] Microstructural dependence of electron and hole transport in lowtemperature-grown polycrystalline-silicon thin-film solar cells, Takuya Matsui, Riza Muhida, Tomohiro Kawamura, Toshihiko Toyama, Hiroaki Okamoto et al., Appl. Phys. Lett. 81, 4751 (2002)
- [25] Μικροαισθητήρες Αρχές και Εφαρμογές, J. W. Gardner, Εκδόσεις Τζιόλα, (2000)
- [26] Τεχνολογία Μικροσυστημάτων ,Δ. Τσουκαλάς, ΕΜΠ, ΣΕΜΦΕ,Τομέας Φυσικής (2007)
- [27] Φυσική των Ηλεκτρονικών Διατάξεων, Δ.Τσουκαλάς, ΕΜΠ,ΣΕΜΦΕ (2008)
- [28] Τεχνολογία Υλικών, Ηλεκτροτεχνικών και Ηλεκτρονικών ,Τόμος Β' ,Θεωρία και Τεχνολογία Ημιαγωγών, Αντώνης Κ. Θαναηλάκης (1990)

- [29] Τεχνολογία Υλικών, Ηλεκτροτεχνικών και Ηλεκτρονικών ,Τόμος Α', Θεωρία και Τεχνολογία Στερεάς Κατάστασης, Αντώνης Κ. Θαναηλάκης (1989)
- [30] Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και φωτοβολταϊκές Διατάξεις, Κ. Θ. Δερβός, ΕΜΠ, ΣΗΜΜΥ (2010)
- [31] Ανάπτυξη Τεχνολογίας κατασκευής τρανζίστορς λεπτών υμενίων βελτιστοποιημένων ως προς την δομή των υμενίων πυριτίου που προκύπτει από την κρυσταλλοποίηση, Διδακτορική Διατριβή, Δέσποινα Μόσχου, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών ,Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (2009)
- [32] Measurement of mobility in nanocrystalline semiconductor materials using space charge limited current, Daniel Paul Stieler, Thesis, MASTER OF SCIENCE, Iowa State University ,Ames Iowa (2005)
- [33] Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications, Edited by Jef Poortmans, Vladimir Arkhipov, Willey Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications ,2006

Ιστογραφία

<http://www.allaboutenergy.gr>

<http://www.wikipedia.org>

<http://www.iene.gr>