



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

«ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ»

«ΤΥΠΟΙ Φ/Β ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ»

Εισηγητής:

Εμμανουήλ Σπανάκης

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟΦΟΙΤΩΝ

«ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Το πρόγραμμα συνδιοργανώνεται από:

Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Το Τμήμα Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Η ΠΡΑΞΗ ΥΛΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ (ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ – ΕΚΤ) ΚΑΙ ΑΠΟ ΕΘΝΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ ΕΣΠΑ 2007-2013

Στοιχεία επικοινωνίας

Εισηγητής: Εμμανουήλ Σπανάκης

Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών

Ίδρυμα: Πανεπιστήμιο Κρήτης

Τηλ: 2810-393053

Fax: 2810-394273 (Γραμματεία)

Email: spanakis@materials.uoc.gr

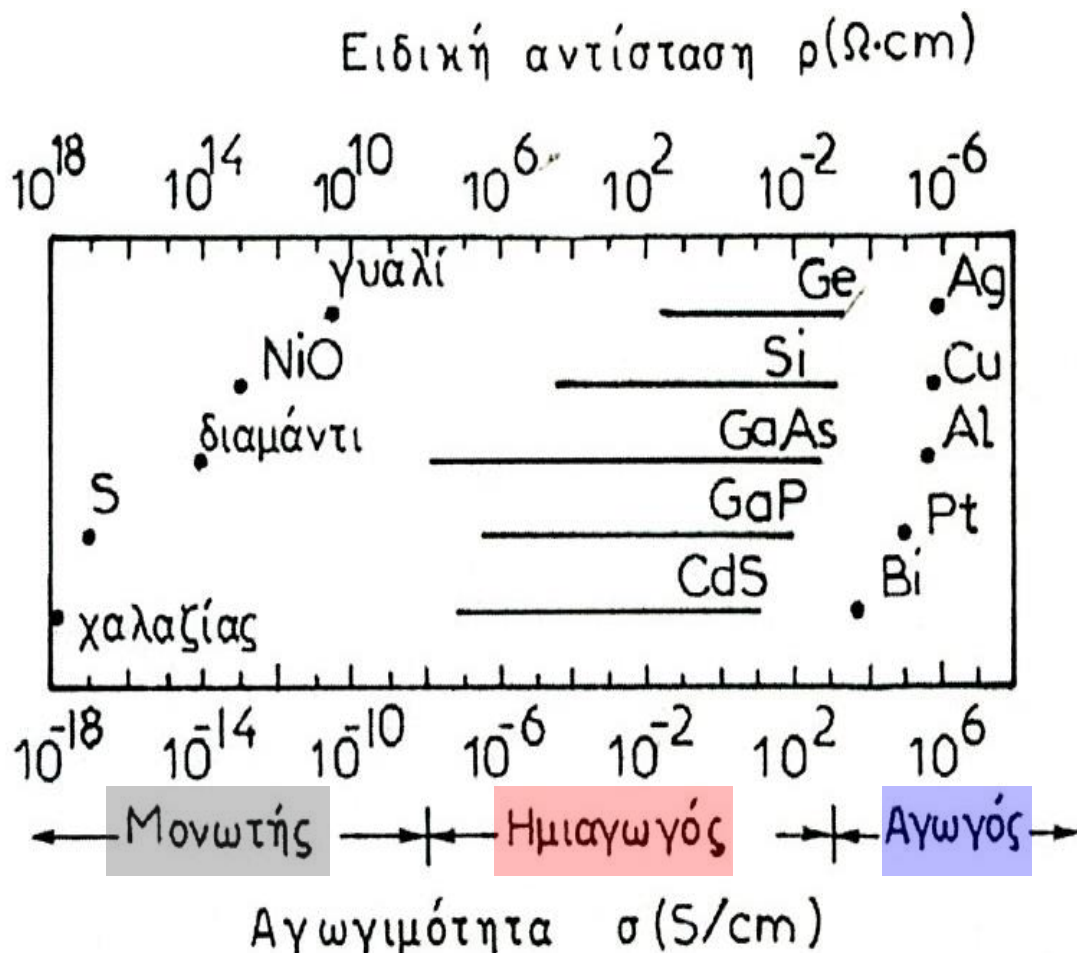
Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στους Ημιαγωγούς.....	2
Κεφάλαιο 2. Η βασική φωτοβολταϊκή διάταξη: δίοδος pn.....	7
Κεφάλαιο 3. Απορρόφηση ακτινοβολίας στη δίοδο: το φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	11
Κεφάλαιο 4. Υλικά και δομές κατασκευής Φ/Β στοιχείων.....	22

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στους Ημιαγωγούς

1.1 Ενδογενείς Ημιαγωγοί

Η ειδική αντίσταση, ρ , ενός υλικού ορίζεται με απλό τρόπο ως εξής: αν πάρει κανείς ένα κύλινδρο μήκους, L , και επιφάνειας βάσης, S , φτιαγμένο από ομογενές και ισότροπο υλικό και εφαρμόσει διαφορά δυναμικού, U , μεταξύ των δύο επιπέδων επιφανειών του τότε θα διαρρέυσει από αυτόν ρεύμα, I , τέτοιο ώστε η αντίσταση του $R = U/I$ να ισούται ακριβώς με $R = \rho \cdot L/S$. Αν το σύστημα υπακούει το νόμο του Ohm τότε το R δεν εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζεται και η αντίσταση λέγεται ωμική. Η συμπεκνωμένη ύλη ή αλλιώς τα στερεά υλικά διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής τους αντίστασης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (σχήμα 1.1) και της συμπεριφοράς που αυτή παρουσιάζει με την θερμοκρασία: α) τους αγωγούς (μέταλλα) που έχουν μεγάλη συγκέντρωση ελευθέρων ηλεκτρονίων στο εσωτερικό τους και άρα μπορούν να οδηγήσουν ηλεκτρικό ρεύμα με πολύ μικρή αντίσταση ρ , κάτω από $10^{-2} \Omega\text{cm}$, β) τους ενδογενείς ημιαγωγούς που έχουν μικρή μεν συγκέντρωση φορέων αλλά διαμορφώσιμη προς μεγαλύτερες τιμές (όπως θα δούμε στη συνέχεια) καταλαμβάνοντας ενδιάμεσες τιμές του ρ σε εύρος $10^8 - 10^{-2} \Omega\text{cm}$ και τους γ) μονωτές που πρακτικά δεν έχουν ελεύθερους φορείς παρουσιάζοντας τιμές του $\rho > 10^8 \Omega\text{cm}$



Σχήμα 1.1: Κατάταξη συμπεκνωμένης ύλης ανάλογα με την ηλεκτρική αντίσταση

Στα μέταλλα το ρ ανεβαίνει αναλογικά με τη θερμοκρασία σύμφωνα με την:

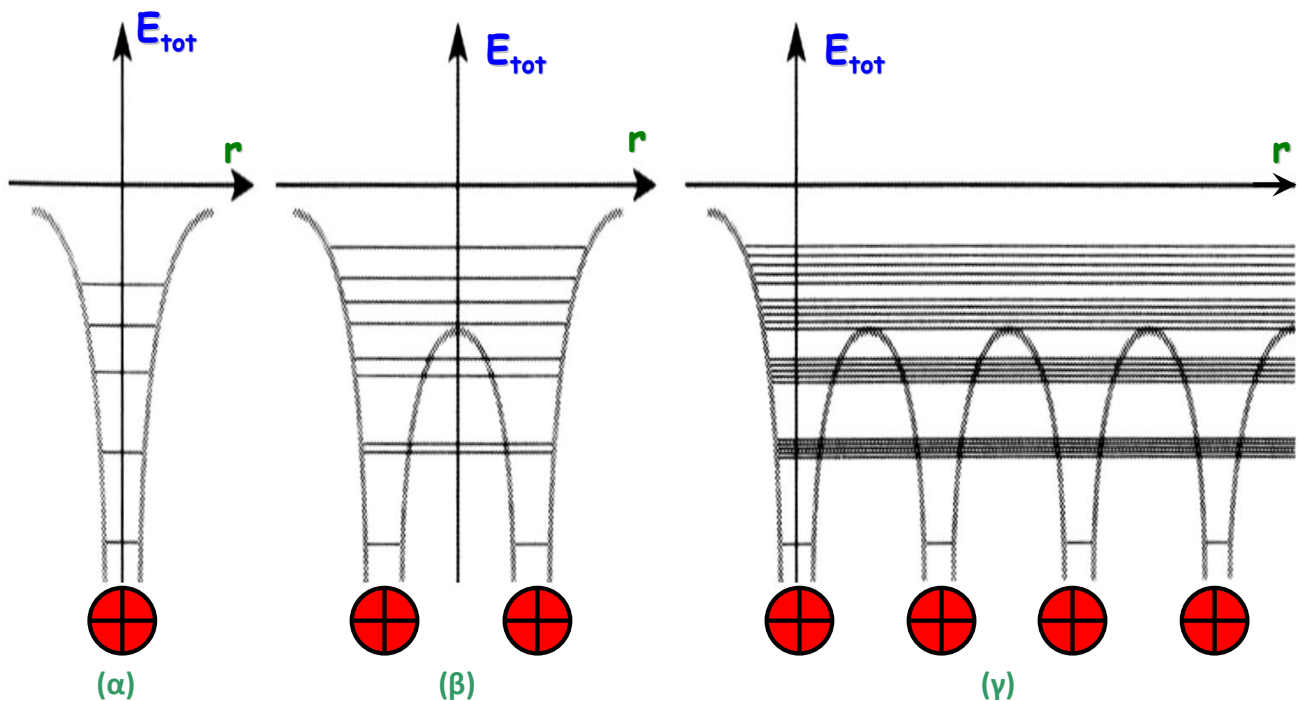
$$\rho = [\rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0))] \tag{1.1}$$

όπου ρ_0 , T_0 σταθερές. Αντίθετα στους ενδογενείς ημιαγωγούς η αντίσταση μειώνεται εκθετικά (δηλαδή πολύ γρήγορα) με αύξηση της θερμοκρασίας:

$$\rho = b \cdot e^{c/T} \quad (1.2)$$

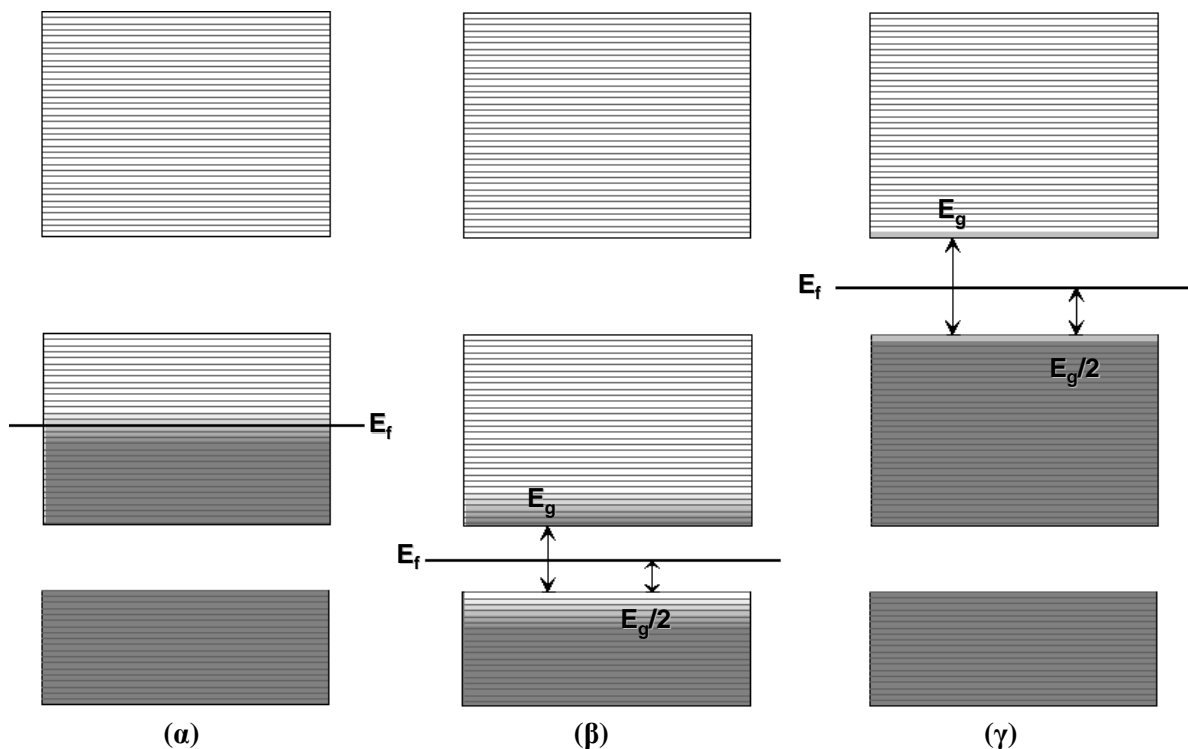
όπου b , c σταθερές, επειδή αυξάνεται αντίστοιχα γρήγορα η πυκνότητα φορέων αγωγιμότητας. Η λέξη ενδογενής αναφέρεται στην απουσία ξένων ατόμων μέσα στο πλέγμα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την πυκνότητα των φορέων αγωγιμότητας. Τι σημαίνει όμως φορέας αγωγιμότητας;

Το μεμονωμένο άτομο ενός υλικού έχει τον πυρήνα του και τα ηλεκτρόνια σε στοιβάδες/κελύφη που τον περιβάλλουν. Οι στοιβάδες/κελύφη αποτελούνται από ηλεκτρόνια με διαφορετικές ενέργειες και αποστάσεις από τον πυρήνα. Ενεργειακά αυτό επιδεικνύεται από την παρουσία διακριτών ενεργειακών σταθμών σε ένα πηγάδι ελκτικού δυναμικού που προκαλεί ο πυρήνας (σχήμα 1.2α). Τα ηλεκτρόνια γεμίζουν ανά δύο κάθε στάθμη από κάτω προς τα πάνω μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός τους. Όταν πλησιάσουν δύο άτομα σε ικανή απόσταση μεταξύ τους τότε ηλεκτρόνια από τις ανώτερες στοιβάδες, μπορούν να αλληλεπιδράσουν προσπαθώντας να ελαττώσουν τη συνολική ενέργεια του συστήματος. Αυτή η αλληλεπίδραση σημαίνει σχίσμο κάθε μιας από τις στάθμες αυτές σε δύο (μικρότερης και μεγαλύτερης ενέργειας της αρχικής) (σχήμα 1.2β). Όταν αυτή η αλληλεπίδραση γίνεται μεταξύ N ατόμων το σχίσμο κάθε στάθμης του ατόμου γίνεται σε N στάθμες. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται μια σειρά από ενεργειακές ζώνες. Κάθε ζώνη αποτελείται από πυκνές αλλά διακριτές στάθμες στις οποίες κατανέμονται, πάντα 2 ανά στάθμη από κάτω προς τα πάνω, τα ηλεκτρόνια των ατόμων που συμμετέχουν στους δεσμούς που τα συγκρατούν μεταξύ τους στο στερεό (ηλεκτρόνια σθένους). Η ανώτερη στάθμη στην οποία φτάνει και την οποία καταλαμβάνει το τελευταίο ηλεκτρόνιο, είναι πιο ψηλά ενεργειακά όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του ημιαγωγού. Αυτό επιβάλλει η κατανομή Fermi με την θερμοκρασία. Από αυτή συνεπάγεται ότι η ανώτερη ενεργειακά κατηλλειμμένη στάθμη έχει τη χαμηλότερη τιμή ενέργειας, στη θερμοκρασία απολύτου μηδενός ($-273 \text{ }^\circ\text{C}$).



Σχήμα 1.2: Από τα μεμονωμένα άτομα στη συμπυκνωμένη ύλη: Ενεργειακή εικόνα

Μεταξύ των ζωνών παρουσιάζονται και χάσματα δηλαδή τιμές ενέργειας που δεν μπορεί να πάρει κάποιο από τα ηλεκτρόνια σθένους (σχήμα 1.2γ). Η ικανότητα ενός υλικού να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα εξαρτάται από την δυνατότητα που έχουν τα ηλεκτρόνια σθένους να ανεβάσουν την κινητική τους ενέργεια στην τιμή που τους επιβάλλει η εξωτερική διαφορά δυναμικού, U . Αυτό ανάγεται στην ύπαρξη μη κατηλλειμμένης (από άλλα ηλεκτρόνια) ανώτερης ενεργειακά στάθμης με την απαιτούμενη από την U , ενεργειακή διαφορά. Στα μέταλλα παρατηρείται ότι η ανώτερη ενεργειακά κατηλλειμμένη στάθμη βρίσκεται εντός μιας ενεργειακής ζώνης (σχήμα 1.3α). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πολύ κοντινές, ενεργειακά, άδειες στάθμες για να ανέβει το ηλεκτρόνιο όταν του ζητήσει η U να το κάνει, οπότε τα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί του ρεύματος. Στους μονωτές παρατηρείται ότι η ανώτερη ενεργειακά κατηλλειμμένη στάθμη είναι ακριβώς στο επάνω όριο μιας ζώνης και μετά ακολουθεί ενεργειακό χάσμα (σχήμα 1.3β). Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχουν πολύ κοντινές ενεργειακά άδειες στάθμες για να ανέβει το ηλεκτρόνιο οπότε οι μονωτές είναι κακοί αγωγοί του ρεύματος. Στους ημιαγωγούς η ανώτερη ενεργειακά κατηλλειμμένη στάθμη στο απόλυτο μηδέν είναι και πάλι ακριβώς στο επάνω όριο μιας ζώνης που ακολουθείται από ενεργειακό χάσμα. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όμως, η κατανομή Fermi επιτρέπει σε μερικά ηλεκτρόνια να μεταπηδούν και να παραμένουν στις κατώτερες στάθμες της ανώτερης ενεργειακά ζώνης επειδή το ενεργειακό χάσμα, E_g , είναι μικρό (έως 2eV περίπου) σε σχέση με αυτό ενός μονωτή (σχήμα 1.3β). Έτσι ο ημιαγωγός μπορεί να άγει ρεύμα στην επάνω ζώνη (που καλείται και Ζώνη Αγωγιμότητας, Ζ.Α.) όπως το μέταλλο, όμως η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση του είναι μεγάλη επειδή τα ηλεκτρόνια εκεί είναι λίγα. Για αυτό καλείται ημιαγωγός! Τα ηλεκτρόνια που έχουν μεταπηδήσει από την κάτω στην επάνω ζώνη έχουν αφήσει πλέον και κάποιες άδειες στάθμες και στην κάτω ζώνη. Οι κενές αυτές θέσεις ηλεκτρονίων καλούνται «οπές». Η αγωγιμότητα ενισχύεται από την ύπαρξη των οπών καθώς η U μπορεί πλέον να προκαλεί μετακίνηση ηλεκτρονίων και στην κάτω ζώνη (που καλείται Ζώνη Σθένους, Ζ.Σ.) μέσω αυτών των σταθμών.

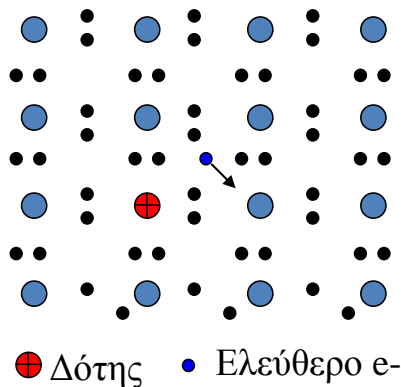


Σχήμα 1.3: Δομή ενεργειακών ζωνών σε μέταλλο (α), ημιαγωγό (β) και μονωτή (γ).

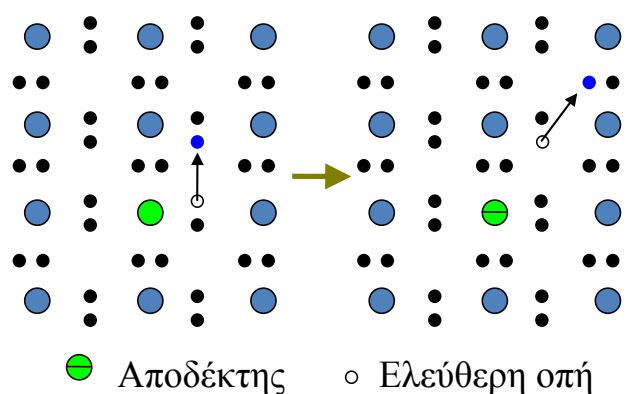
1.2 Εξωγενείς Ημιαγωγοί

Ένας ημιαγωγός χωρίς ξένα άτομα στο εσωτερικό του, που καλούνται «προσμίξεις», ονομάζεται ενδογενείς ημιαγωγός. Στην τεχνολογία ημιαγωγών η εισαγωγή προσμίξεων σε θέσεις ατόμων του πλέγματος (προσμίξεις «αντικατάστασης») αποδεικνύεται ευεργετική στην ελεγχόμενη αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού, τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς την χωρική κατανομή της. Για παράδειγμα στο πυρίτιο η εισαγωγή ατόμων με 5 ηλεκτρόνια σθένους οδηγεί τα 4 να σχηματίζουν δεσμούς με 4 γειτονικά άτομα πυριτίου και 1 να διατίθεται αδέσμευτο στον κρύσταλλο δηλαδή να μπορεί να κινηθεί σχεδόν ελεύθερα σε αυτόν συνεισφέροντας κατά 1 στην αύξηση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας του. Η πρόσμιξη αυτή καλείται «δότης» ηλεκτρονίων (σχήμα 1.4α). Αντίστοιχα εισαγωγή ατόμων με 3 ηλεκτρόνια σθένους τα οδηγεί στο να σχηματίζουν δεσμούς με 3 γειτονικά άτομα πυριτίου και 1 κενή θέση (οπή) από το 4^ο γείτονα πυριτίου να διατίθεται στον κρύσταλλο. Αυτή η θέση μπορεί να «κινείται» με μεταπήδηση γειτονικών ηλεκτρονίων συνεισφέροντας έτσι στην αύξηση των οπών αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Η πρόσμιξη αυτή καλείται «αποδέκτης» ηλεκτρονίων (σχήμα 1.4β). Προσέξτε ότι οι προσμίξεις αποκτούν τοπικά φορτίο με την απομάκρυνση ηλεκτρονίου ή οπής αλλά συνολικά ο κρύσταλλος παραμένει ουδέτερος. Ο ημιαγωγός με προσμίξεις καλείται «εξωγενής».

Si: Πεντασθενείς *P, As, Sb*

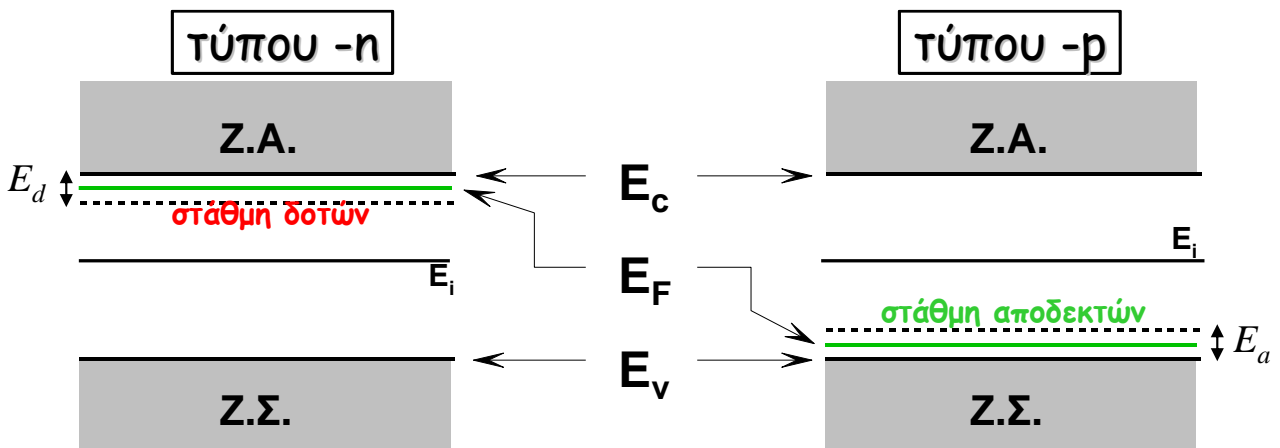


Si: Τρισθενείς *B, Al, Ga, In*



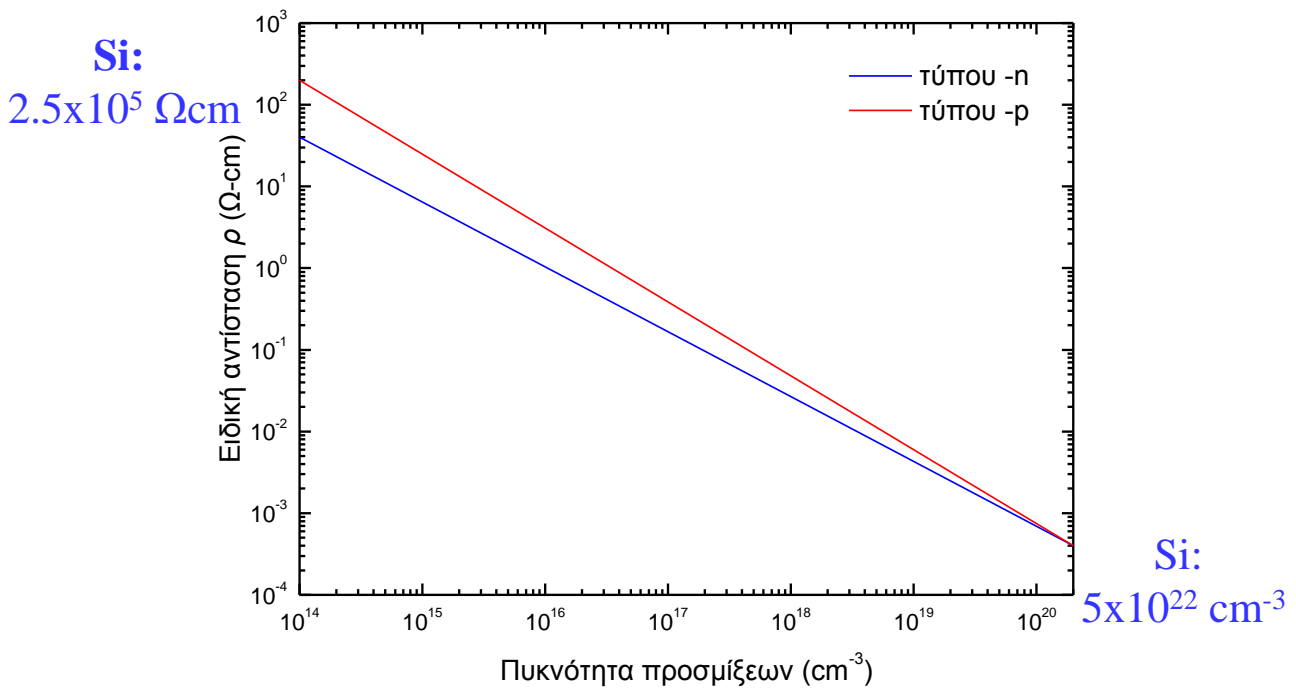
Σχήμα 1.4: Πυρίτιο με προσμίξεις αντικατάστασης δοτών (αριστερά) και αποδεκτών (δεξιά).

Από ενεργειακής άποψης η παρουσία δοτών εισάγει μια ενεργειακή στάθμη τόσο κοντά στην Ζ.Α. (διαφορά ενέργειας E_d) ώστε τα ηλεκτρόνια όλων των συγκεκριμένων ατόμων, που δεν συμμετέχουν σε δεσμούς με το πυρίτιο, να έχουν μεταπηδήσει στη Ζ.Α (σχήμα 1.5). Επειδή ο αριθμός τους είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερος από εκείνον του ενδογενούς ημιαγωγού, η αγωγιμότητα οφείλεται πλέον αποκλειστικά σε αυτά και ο ημιαγωγός καλείται «τύπου-n», δηλαδή negative, όρος που λαμβάνεται από το φορτίο του ηλεκτρονίου. Αντίστοιχα η παρουσία αποδεκτών εισάγει μια ενεργειακή στάθμη τόσο κοντά στην Ζ.Σ. (διαφορά ενέργειας E_a) ώστε τα ηλεκτρόνια όλων των γειτονικών ατόμων πυριτίου, να έχουν μεταπηδήσει στη στάθμη αυτή από τη Ζ.Σ., αφήνοντας αντίστοιχες κενές θέσεις (οπές) στη Ζ.Σ. (σχήμα 1.5). Επειδή ο αριθμός των οπών είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερος από εκείνον του ενδογενούς ημιαγωγού, η αγωγιμότητα του οφείλεται πλέον αποκλειστικά σε αυτές και ο ημιαγωγός καλείται «τύπου-p», δηλαδή positive, όρος που λαμβάνεται από την έλλειψη ηλεκτρονιακού φορτίου.



Σχήμα 1.5: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ημιαγωγού με προσμίξεις.

Η αύξηση της αγωγιμότητας (ή αλλιώς μείωση της ειδικής αντίστασης) του ημιαγωγού είναι ανάλογη του αριθμού των προσμίξεων που εισάγονται στο υλικό. Για παράδειγμα το πυρίτιο έχει ατομική πυκνότητα $5 \cdot 10^{22}$ άτομα/cm³ και ειδική αντίσταση $2,5 \cdot 10^5$ Ωcm. Αν εισαχθούν $5 \cdot 10^{16}$ άτομα/cm³ δηλαδή ένα άτομο πρόσμιξης για κάθε ένα εκατομμύριο άτομα πυριτίου η ειδική αντίσταση του θα μειωθεί περίπου στο ένα εκατομμυριοστό της αρχικής τιμής της. (σχήμα 1.6)

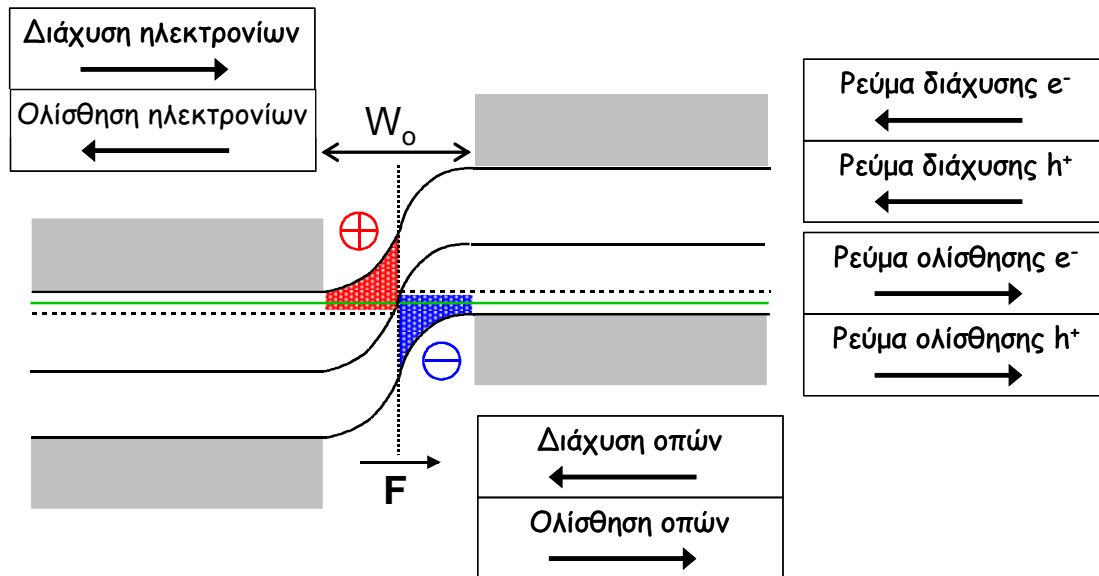


Σχήμα 1.6: Διάγραμμα ειδικής αντίστασης συναρτήσει της πυκνότητας προσμίξεων στο πυρίτιο.

Κεφάλαιο 2. Η βασική φωτοβολταϊκή διάταξη: δίοδος pn

2.1 Η ιδανική επαφή pn

Το βασικό δομικό στοιχείο μιας φωτοβολταϊκής κυψελίδας είναι η επαφή ανάμεσα σε έναν ημιαγωγό τύπου-p και έναν τύπου-n. Κατασκευαστικά η επαφή δημιουργείται με την εισαγωγή μεγάλης πυκνότητας προσμίξεων του ενός τύπου από την επιφάνεια ημιαγωγού ο οποίος έχει ήδη κατασκευαστεί να περιλαμβάνει προσμίξεις του άλλου τύπου αλλά σε μικρότερη πυκνότητα. Θα μελετήσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της επαφής θεωρώντας δύο ξεχωριστούς ημιαγωγούς που κολλάνε ιδανικά μεταξύ τους σε μια ευθεία γραμμή που ονομάζεται *μεταλλουργική επαφή*.

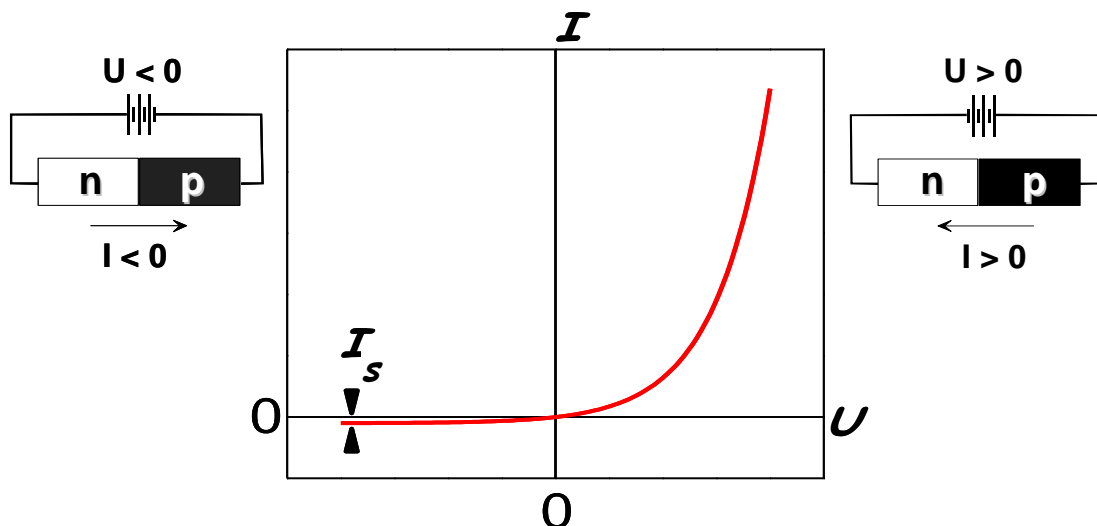


Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών και ρεύματα φορέων αγωγιμότητας στην επαφή pn.

Είναι γνωστό ότι εάν σε ένα κλειστό χώρο υπάρχει υψηλή συγκέντρωση σωματίων και σε έναν άλλο χαμηλή και ανοίξει κανείς δίαυλο επικοινωνίας ανάμεσα τους τότε τα σωματάρια θα διαχυθούν από τον χώρο υψηλής προς εκείνον της χαμηλής συγκέντρωσης στην προσπάθειά τους να τις εξισώσουν. Κατά την επαφή των δύο τύπων ενός ημιαγωγού ανοίγεται ένας δίαυλος επικοινωνίας ανάμεσα σε δύο χώρους με μεγάλη διαφορά συγκέντρωσης για κάθε ένα από τους φορείς αγωγιμότητας, ηλεκτρόνια και οπές. Έτσι τα ηλεκτρόνια αμέσως θα προσπαθήσουν να διαχυθούν από την πλευρά η που είναι πολλά προς την p που είναι λίγα και οι οπές αντίστροφα. Επειδή κίνηση φορτίων προς μια διεύθυνση σημαίνει αγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, δημιουργούνται αυτομάτως δύο ρεύματα *διάχυσης*. Ένα οπών και ένα ηλεκτρονίων. Το ηλεκτρικό ρεύμα ηλεκτρονίων έχει ίδια *συμβατική* φορά με των οπών επειδή παράγεται από αρνητικά φορτισμένα σωματάρια που κινούνται αντίθετα από τις *θετικά* φορτισμένες οπές (σχήμα 2.1). Αμέσως μόλις οι πρώτοι φορείς εγκαταλείψουν τους ημιαγωγούς τους *αίρεται* η ηλεκτρική τους ουδετερότητα. Στον τύπου-n η έλλειψη ηλεκτρονίων αναδεικνύει το θετικό, *απογυμνωμένο* όπως λέγεται, ακίνητο φορτίο των πυρήνων των προσμίξεων που τα έδωσαν στον αντίστοιχο κρύσταλλο. Αντίστοιχα στον τύπου-p τα ηλεκτρόνια που έφτασαν από τον τύπου-n φορτίζουν *αρνητικά* τους αποδέκτες με αποτέλεσμα να παρατηρείται στατικό αρνητικό φορτίο. Και τα δύο φορτία αναπτύσσονται κοντά και εκατέρωθεν της επαφής, σε μια περιοχή που καλείται «περιοχή απογύμνωσης», Π.Α.) δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο κάθετα στην επαφή (σχήμα 2.1). Η φορά του προκαλεί την άσκηση δύναμης στους διαχεόμενους φορείς που είναι *αντίθετη* στην κίνηση τους. Αυτό ισοδυναμεί με την δημιουργία δύο νέων ρευμάτων για τα

ηλεκτρόνια και τις οπές που λέγονται ρεύματα *ολίσθησης* και έχουν αντίθετη φορά προς εκείνα της διάχυσης. Όσο η φόρτιση μεγαλώνει τόσο μεγαλώνουν τα ρεύματα ολίσθησης έως ότου κάποια στιγμή εξισώνονται με τα ρεύματα διάχυσης. Τότε επέρχεται *θερμοδυναμική ισορροπία Θ.Ι.* στην επαφή. Η ενεργειακή εικόνα της επαφής φαίνεται στο σχήμα 2.1. Η καμπύλωση των ενεργειακών ζωνών οφείλεται στην παρουσία των φορτίων.

Η επαφή pn σε Θ.Ι. παρουσιάζει μηδενική διαφορά δυναμικού μεταξύ των εξωτερικών άκρων των ημιαγωγών που την αποτελούν (*τάση ανοιχτού κυκλώματος* $U_{oc} = 0$, ος: open circuit), ενώ η βραχυκύκλωση τους δεν παράγει ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα (*ρεύμα βραχυκυκλώματος* $I_{sc} = 0$, sc: short circuit). Αν εφαρμοστεί στα άκρα *θετική τάση, U*, δηλαδή το υψηλό δυναμικό (+) να είναι συνδεδεμένο με τον τύπου-p ημιαγωγό και το αρνητικό (-) στον τύπου-n (σχήμα 2.2), τότε εξουδετερώνεται μέρος του αρνητικού φορτίου του πρώτου και του θετικού του δεύτερου κοντά στην μεταλλουργική επαφή. Αντίστοιχα υποβαθμίζονται τα ρεύματα ολίσθησης που πλέον δεν εξισορροπούν τα ισχυρά ρεύματα διάχυσης τα οποία εξέρχονται προς το εξωτερικό κύκλωμα σαν ένα συνολικό ρεύμα I . Το ρεύμα αυτό αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της τάσης, U . Η επαφή λέγεται ότι βρίσκεται σε *ορθή πόλωση*. Αν εφαρμοστεί στα άκρα *αρνητική τάση* τότε το φορτίο από την κάθε πλευρά της επαφής αυξάνεται και αντίστοιχα το ηλεκτρικό πεδίο εντός της επαφής. Επειδή τα ρεύματα διάχυσης φυσικά παραμένουν εξισορροπημένα δεν θα εμφανιζόταν καθόλου ρεύμα στο κύκλωμα όπως στην Θ.Ι. Όμως το ισχυρότερο πεδίο αναγκάζει τα λίγα ηλεκτρόνια του τύπου-p ημιαγωγού να κινηθούν προς τον τύπου-n ημιαγωγό και τις λίγες οπές του τύπου-n να κινηθούν προς την πλευρά τύπου-p. Αυτά δεν εξισορροπούνται από κάτι και τελικά ανιχνεύονται σαν ένα απειροελάχιστο ρεύμα I_s στο εξωτερικό κύκλωμα. Η επαφή λέγεται ότι βρίσκεται σε *ανάστροφη πόλωση*. Η γραφική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του ρεύματος που ανιχνεύεται στο εξωτερικό κύκλωμα συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης δίδεται στο σχήμα 2.2. Πρακτικά η επαφή συμπεριφέρεται σαν διακόπτης που επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος μόνο κατά την μία φορά και για το λόγο αυτό ονομάζεται και *δίοδος*.



Σχήμα 2.2: Συμπεριφορά ρεύματος επαφής pn σε ορθή και ανάστροφη πόλωση

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει την καμπύλη ρεύματος-τάσης (IV) της ιδανικής διόδου είναι:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{q_e U}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

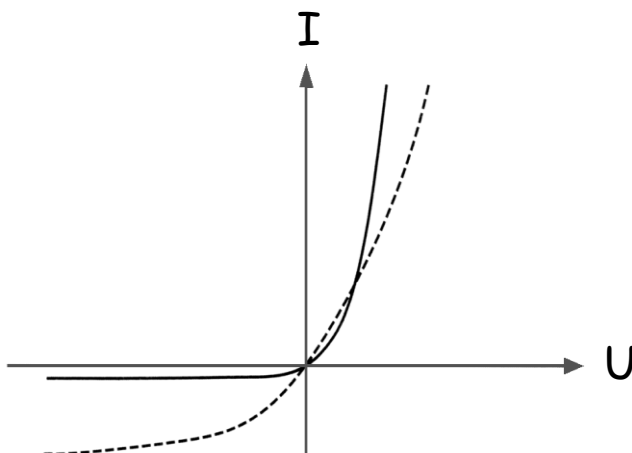
όπου T η θερμοκρασία της διόδου, q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου και k_B η σταθερά Boltzmann. Το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης, που πρέπει ιδανικά να διατηρείται όσο γίνεται χαμηλότερο, εξαρτάται από την θερμοκρασία και το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού σύμφωνα με την αναλογία:

$$I_s \propto T^\gamma \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \text{ με } \gamma \cong 3.5 \quad (2.2)$$

Βλέπουμε ότι αυξάνεται εκθετικά με μείωση του ενεργειακού χάσματος και με αύξηση της θερμοκρασίας του.

2.2 Αποκλίσεις από την ιδανικότητα

Στην πράξη όταν ηλεκτρόνια και οπές κινούνται στην περιοχή απογύμνωσης τότε κάποια από αυτά μπορούν να επανασυνδεθούν μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι καθώς η κενή θέση ηλεκτρονίου δεσμού πυριτίου μετακινείται στο χώρο με αμοιβαίες μετακινήσεις ηλεκτρονίων σθένους γειτονικών δεσμών (αυτό σημαίνει κινούμενη οπή) είναι δυνατόν να βρεθεί σε κοντινή απόσταση με κινούμενο ηλεκτρόνιο οπότε η ελαχιστοποίηση ενέργειας θα αναγκάσει το δεύτερο να καταλάβει την κενή θέση. Έτσι εξαφανίζονται και οι δύο φορείς, το ηλεκτρόνιο και η οπή. Οι επανασυνδέσεις μειώνουν το ρεύμα που άγει η διόδος στην ορθή πόλωση αλλά αυξάνουν και το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης (διαβάστε γιατί στην βιβλιογραφία) και άρα υποβαθμίζουν συνολικά την διοδική συμπεριφορά (διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 2.3). Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη IV δίδεται από τη σχέση 2.3. Η διαφορά της από την ιδανική περίπτωση είναι η προσθήκη του παράγοντα ιδανικότητας, n . Αυτός ισούται με μονάδα στην ιδανική περίπτωση και είναι μεγαλύτερος όσο ισχυρότερη είναι η επανασύνδεση.



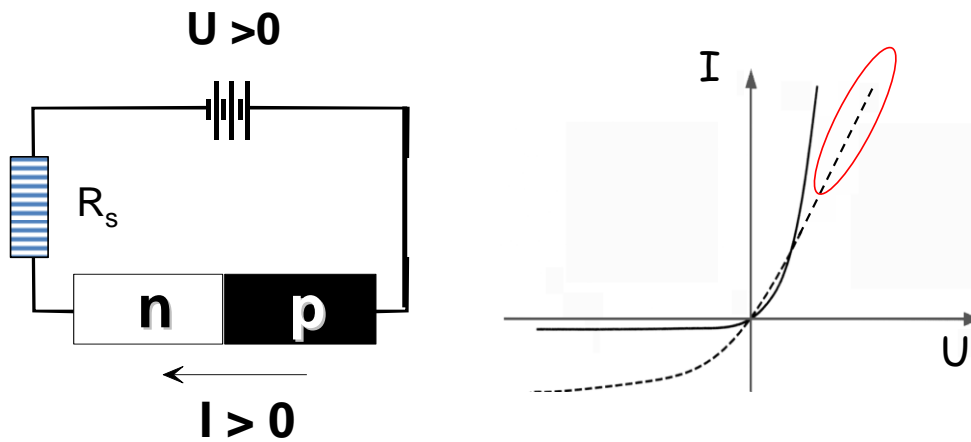
$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{q_e U}{n k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Σχήμα 2.3: Απόκλιση από ιδανικότητα λόγω επανασύνδεσης.

Στην πρακτική διόδο r_p θα πρέπει να προστεθούν δύο επιπλέον παράγοντες οι οποίοι δρουν αρνητικά στην επιθυμητή ηλεκτρική της συμπεριφορά: η σειριακή αντίσταση και η αντίσταση διαρροής.

Η σειριακή αντίσταση R_s περιλαμβάνει την αντίσταση που προβάλλει στο ρεύμα α) το σώμα κάθε ημιαγωγού μακριά από την επαφή r_p , β) οι αγωγοί που συνδέουν τη διόδο με την πηγή τάσης και γ) οι επαφές των αγωγών με τους ημιαγωγούς p και n . Η θέση της αντίστασης σε σχέση με τη διόδο στο κύκλωμα δίδεται στο σχήμα 2.4 και όταν η τιμή της γίνεται αρκούντως μεγάλη τότε το

αποτέλεσμα της στην καμπύλη IV γίνεται αισθητό από την παραγωγή ωμικής αναλογίας (ευθεία γραμμή) στο δεξιότερο κομμάτι της ορθής πόλωσης. Όπως είναι εμφανές στο σχήμα 2.4 τα ρεύματα υποβαθμίζονται σε αυτή την περιοχή της καμπύλης σε σχέση με την δίοδο με μηδενική σειριακή αντίσταση.

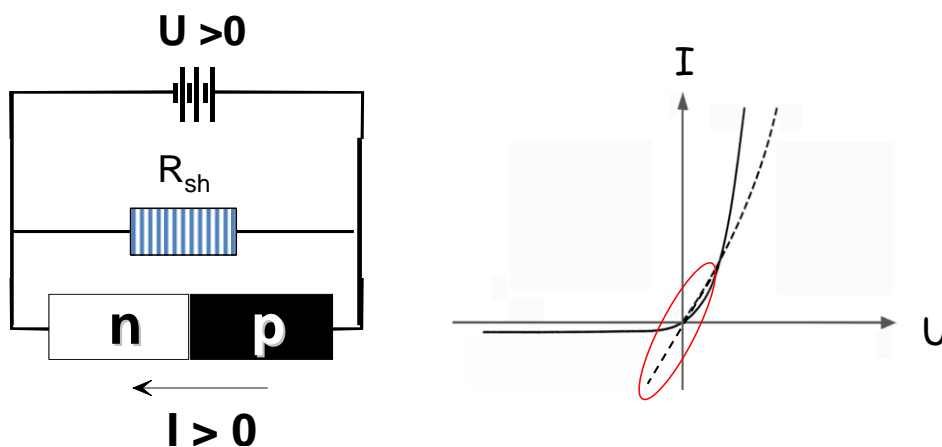


Σχήμα 2.4: Σειριακή αντίσταση σε δίοδο και επίδραση στην καμπύλη IV (διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα).

Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη IV μη ιδανικής διόδου με σειριακή αντίσταση R_s είναι:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{q_e(U - IR_s)}{nk_B T}\right) - 1 \right] \tag{2.4}$$

Η αντίσταση διαρροής R_{sh} οφείλεται α) στην διαρροή ρεύματος παράλληλα στην επαφή, όχι μέσα από αυτήν αλλά από την εξωτερική επιφάνεια των ημιαγωγών που την συνθέτουν και β) στην παρουσία κρυσταλλικών ατελειών και ξένων προσμίξεων μέσα στην περιοχή απογύμνωσης που δρουν ως «κανάλια» αγωγής φορέων αγωγιμότητας στην ανάστροφη πόλωση (εκεί δηλαδή που δεν θα έπρεπε να άγει η δίοδος). Η θέση της αντίστασης σε σχέση με τη δίοδο στο κύκλωμα δίδεται στο σχήμα 2.5 και όταν η τιμή της γίνεται αρκούντως μικρή τότε το αποτέλεσμα της στην καμπύλη IV γίνεται αισθητό από την παραγωγή ωμικής αναλογίας (ευθεία γραμμή) στην ανάστροφη πόλωση. Όπως είναι εμφανές στο σχήμα 2.5 τα ρεύματα ενισχύονται σε αυτή την περιοχή της καμπύλης σε σχέση με την δίοδο με άπειρη αντίσταση διαρροής.



Σχήμα 2.4: Αντίσταση διαρροής σε δίοδο και επίδραση στην καμπύλη IV (διακεκομμένη γραμμή).

Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη IV μη ιδανικής διόδου με αντίσταση διαρροής R_{sh} είναι:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{q_e U}{nk_B T}\right) - 1 \right] + \frac{U}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

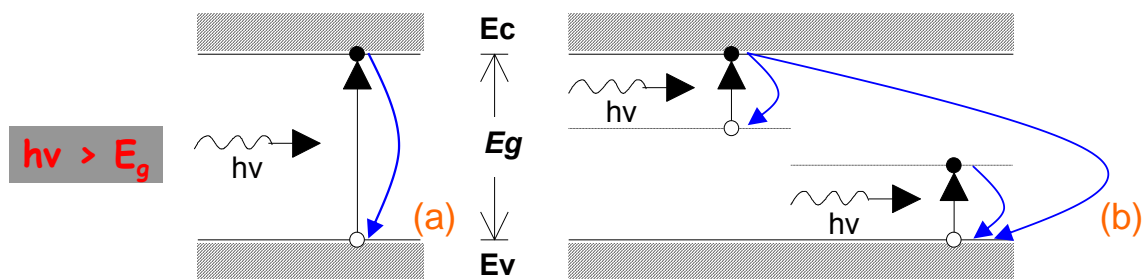
Κεφάλαιο 3. Απορρόφηση ακτινοβολίας στη δίοδο: το φωτοβολταϊκό στοιχείο

3.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Όταν ηλεκτρομαγνητική (H/M) ακτινοβολία ισχύος P_{inc} προσπίπτει πάνω σε μια επίπεδη ημιαγωγική επιφάνεια τότε μέρος αυτής ανακλάται P_{refl} προς τα πίσω ή σκεδάζεται προς διάφορες κατευθύνσεις ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας. Ένα μέρος της εισέρχεται στον ημιαγωγό. Κατά την πορεία της σε αυτόν μέρος της απορροφάται, P_{abs} , από το υλικό, δηλαδή η ενέργεια της αποδίδεται σε αυτό. Αν το πάχος του υλικού είναι αρκούντως μικρό τότε μέρος, P_{trans} της ακτινοβολίας θα καταφέρει να βγει έξω από αυτό. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας επιβάλλει την ισότητα

$$P_{inc} = P_{refl} + P_{abs} + P_{trans} \quad (3.1)$$

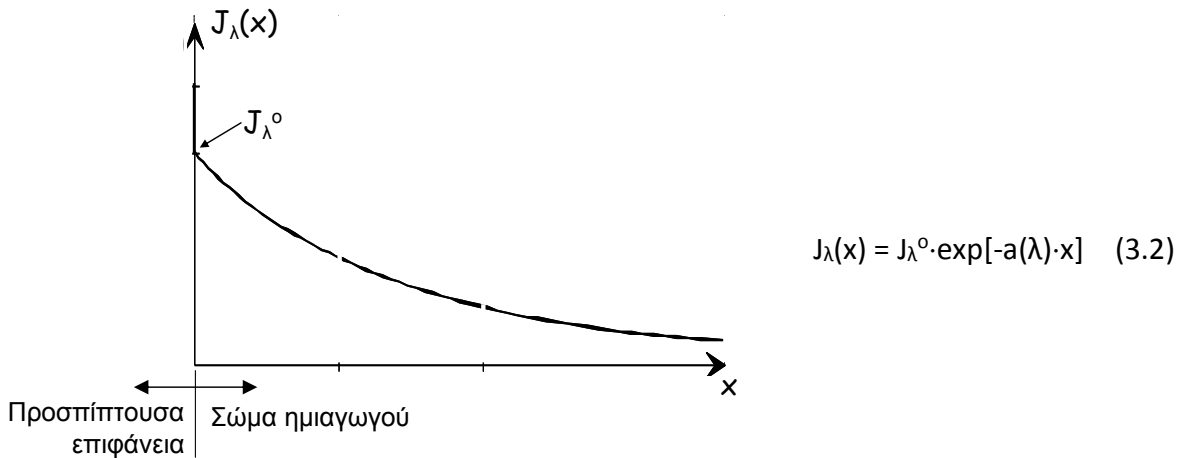
Η συνηθέστερη μορφή απορρόφησης σε ένα υλικό είναι η λήψη της ενέργειας των φωτονίων από ηλεκτρόνια σθένους ή αγωγιμότητας. Τότε αυξάνεται η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων (ή αλλιώς ανεβαίνουν σε υψηλότερη μη κατηλειμμένη στάθμη μιας ενεργειακής ζώνης) και σχεδόν αρχίζουν άμεσα να επιβραδύνονται (να κατεβαίνουν στάθμες) προς την αρχική τιμή της ενέργειας των με σκεδάσεις («κρούσεις») με άτομα του πλέγματος που ταλαντώνονται θερμικά (ή με ατέλειες του κρυστάλλου) αυξάνοντας την τοπική θερμοκρασία του υλικού. Τελικά η H/M ενέργεια που απορροφάται, αποδίδεται στο ημιαγωγό ως θερμότητα αυξάνοντας την θερμοκρασία του.



Σχήμα 3.1: Γένεση φορέων αγωγιμότητας και επανασύνδεση α) ζώνη με ζώνη και β) μέσω ατελειών δομής

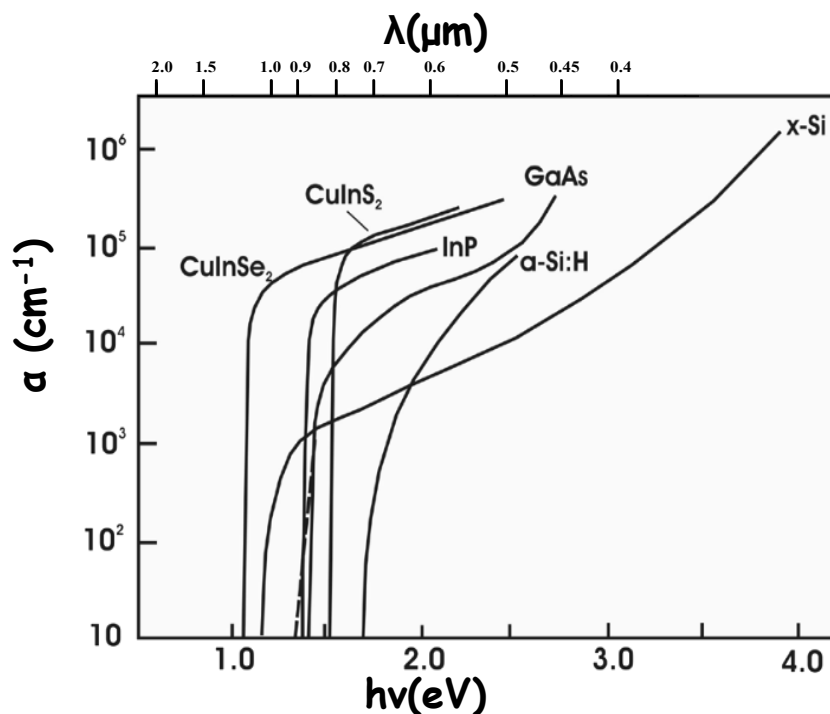
Αν όμως η ενέργεια των φωτονίων, $h\nu$, είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού ($h\nu > E_g$) τότε η απορρόφηση μπορεί να οδηγήσει στην άνοδο ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και άρα την δημιουργία ενός ζεύγους ελεύθερου ηλεκτρονίου-οπής (σχήμα 3.1). Πριν το ηλεκτρόνιο φύγει όμως από την περιοχή μπορεί να επανασυνδεθεί με την κενή θέση δεσμού που άφησε πίσω του (οπή) αποδίδοντας και πάλι την ενέργεια που πήρε από το φωτόνιο σε θερμότητα ή παράγοντας καινούργιο φωτόνιο με άλλη διεύθυνση από αυτήν του αρχικού (επανασύνδεση ζώνη με ζώνη). Αν όμως προλάβει να απομακρυνθεί τότε το φως δημιούργησε ένα ζεύγος νέων φορέων αγωγιμότητας, το *φωτοηλεκτρόνιο* και την *φωτοοπή* (τα ονομάζουμε έτσι επειδή προήλθαν από απορρόφηση φωτός). Το φως επομένως μπορεί να αυξάνει την αγωγιμότητα (ή να μειώνει την ειδική αντίσταση ενός ημιαγωγού) σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται *φωτοαγωγιμότητα*. Επανασυνδέσεις φορέων μπορεί να γίνονται φυσικά και σε

διαφορετικά από τα σημεία γένεσής τους. Οι επανασυνδέσεις ενισχύονται από την παρουσία ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα που δημιουργεί ενεργειακές στάθμες εντός του χάσματος του ημιαγωγού.



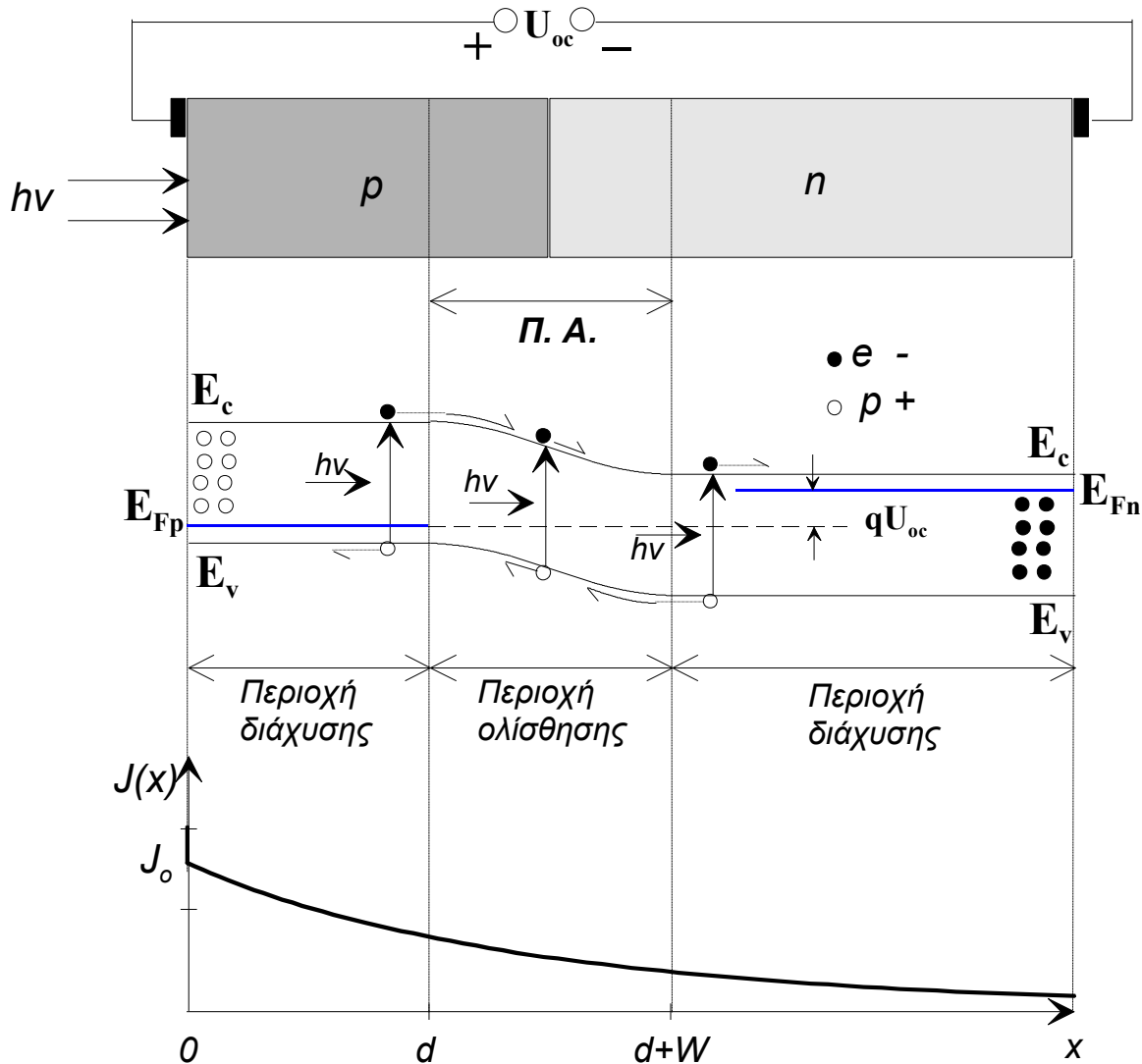
Σχήμα 3.2: Ένταση διερχόμενης από ημιαγωγό Η/Μ ακτινοβολίας.

Η απορρόφηση του φωτός στο σώμα του ημιαγωγού είναι ισχυρότερη κοντά στην επιφάνεια πρόσπτωσης. Η ένταση της διερχόμενης Η/Μ ακτινοβολίας μειώνεται εκθετικά με την απόσταση, x , από την εξωτερική επιφάνεια προς το εσωτερικό του ημιαγωγού (σχήμα 3.2) με ρυθμό που εξαρτάται από το μήκος κύματος της μέσω του λεγόμενου *συντελεστή απορρόφησης* $a(\lambda)$ του υλικού. Η σχέση 3.2 που περιγράφει τη συμπεριφορά αυτή καλείται *νόμος του Beer*. Στην περίπτωση που οι επανασυνδέσεις φορέων γίνονται ζώνη με ζώνη αποδεικνύεται ότι η συγκέντρωση των φορέων που δημιουργεί το φως σε κάθε θέση x , και άρα η φωτοαγωγιμότητα του υλικού, είναι ανάλογη του \sqrt{J} . Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η εξάρτηση του a από το λ και την ενέργεια φωτονίου $h\nu$ σε διάφορους ημιαγωγούς, συνήθεις στην κατασκευή Φ/Β κυψελίδων. Η ενέργεια από την οποία ξεκινούν οι καμπύλες αποτελεί την ενέργεια χάσματος κάθε περίπτωσης.



Σχήμα 3.3: Εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης από την ενέργεια και το μήκος κύματος του φωτός.

Ας εξετάσουμε τώρα τι συμβαίνει στην περιοχή απογύμνωσης μιας επαφής pn στην περίπτωση που προσπίπτει Η/Μ ακτινοβολία από την εξωτερική επιφάνεια ενός από τους δύο ημιαγωγούς, τον τύπου –p στην περίπτωση του σχήματος 3.4.



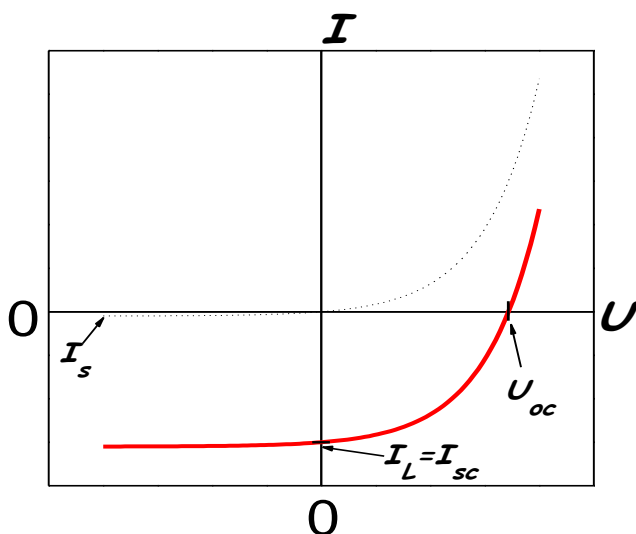
Σχήμα 3.4: Η επαφή pn κάτω από εξωτερικό φωτισμό: διάγραμμα ζωνών και κατανομή φωτεινής έντασης.

Το φως που θα καταφέρει να φτάσει στην Π.Α. θα παράγει και εκεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Σε αντίθεση όμως με το κυρίως σώμα ενός ημιαγωγού, το ζεύγος μέσα στην Π.Α. θα βρεθεί άμεσα υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που έχει δημιουργηθεί από το φορτίο των απογυμνωμένων προσμίξεων και θα διαχωριστεί πριν επανασυνδεθεί : το φωτοηλεκτρόνιο θα ολισθήσει προς τον τύπου-n ημιαγωγό και η φωτοοπή προς τον τύπου-p. Έτσι παράγεται ένα πλεόνασμα φωτοηλεκτρονίων στον n ημιαγωγό και φωτοοπών στον p ημιαγωγό. Στην περίπτωση που η διάδος δεν είναι συνδεδεμένη εξωτερικά (ανοιχτό κύκλωμα), το πλεόνασμα των φωτοφορέων στην Π.Α. δρα ως φορτίο αντιθέτου προσήμου από εκείνο των απογυμνωμένων προσμίξεων με αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό φορτίο της επαφής. Έτσι αποκαθίσταται μια νέα δυναμική, όπως λέγεται, ισορροπία των ρευμάτων ολίσθησης που έχουν ενισχυθεί από το φως, με τα ρεύματα διάχυσης. Το σημαντικό εδώ είναι ότι το πλεόνασμα των φωτοφορέων εκατέρωθεν της επαφής γίνεται ανιχνεύσιμο ως μια διαφορά δυναμικού (τάση) ανάμεσα στις εξωτερικές επιφάνειες των ημιαγωγών που τη συνθέτουν. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος U_{oc} και

παρατηρείται αυθόρμητα με την πρόσπτωση της Η/Μ ακτινοβολίας στη δίοδο. Ηλεκτρικό στοιχείο που αποδίδει διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες του αποτελεί μια εν δυνάμει πηγή τάσης δηλαδή μια πηγή ισχύος. Το φαινόμενο που μόλις περιγράψαμε και κάνει τη δίοδο πηγή τάσης είναι το *φωτοβολταϊκό φαινόμενο*.

Αν βραχυκυκλώσουμε τα εξωτερικά άκρα της δίοδου τότε οι φωτοφορείς που φτάνουν στα όρια των περιοχών απογύμνωσης αυτομάτως κινούνται προς το εξωτερικό κύκλωμα χωρίς ουσιαστικά να συσσωρεύονται στα όρια αυτά. Η κίνηση αυτή γίνεται μέσω του σώματος κάθε ενός από τους ημιαγωγούς n και p και εκεί αποτελεί πάλι μια διαχυτική διαδικασία. Τελικά οι φωτοσπές που κινούνται στον p ημιαγωγό επανασυνδέονται με ηλεκτρόνια που διαρρέουν το εξωτερικό κύκλωμα προερχόμενα από τα φωτοηλεκτρόνια που έχουν κινηθεί στον n -ημιαγωγό. Το συνολικό ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο πη καλείται *φωτόρρευμα*, I_L και είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στην ιδανική δίοδο το ρεύμα αυτό διαρρέει το εξωτερικό βραχυκύκλωμα. Για το λόγο αυτό καλείται και *ρεύμα βραχυκύκλωσης*, I_{sc} .

Η καμπύλη ρεύματος-τάσης δίοδου πη παρουσία φωτός δίδεται στο σχήμα 3.5. Σε αυτό έχει συμπεριληφθεί η μη ιδανικότητα που οφείλεται σε επανασυνδέσεις φωτοφορέων στην Π.Α. Οι επανασυνδέσεις αυτές μειώνουν το φωτόρρευμα σε σχέση με την μη ιδανική δίοδο αλλά και την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Η καμπύλη ουσιαστικά μετατοπίζεται προς τα κάτω κατά το ρεύμα I_L σε σχέση με εκείνη της δίοδου στο σκοτάδι. Η καμπύλη μαθηματικά περιγράφεται από τη σχέση 3.3.



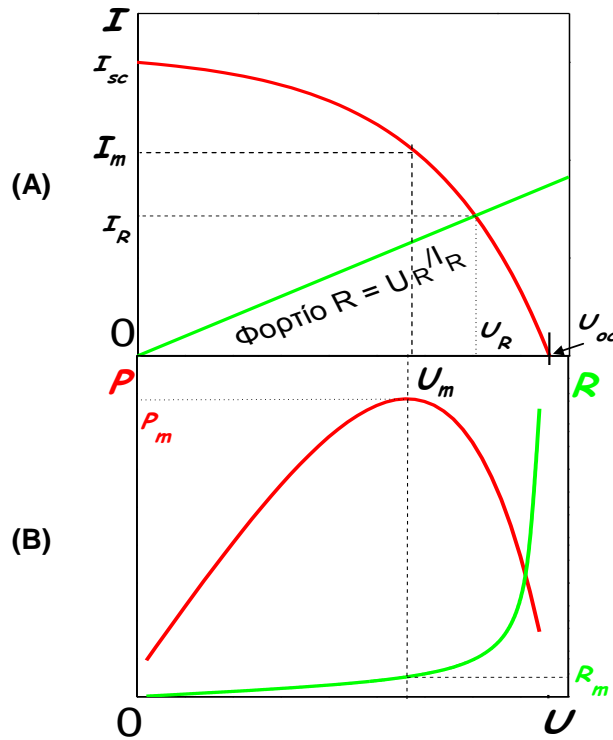
$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{q_e U}{nk_B T}\right) - 1 \right] - I_L \quad (3.3)$$

Σχήμα 3.5: Καμπύλη IV Φ/Β κυψελίδας δίοδου πη

Για εξωτερικό φωτισμό που παράγει φωτόρρευμα πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης ($I_L \gg I_s$) αποδεικνύεται ότι για την τάση ανοιχτού κυκλώματος ισχύει η αναλογία:

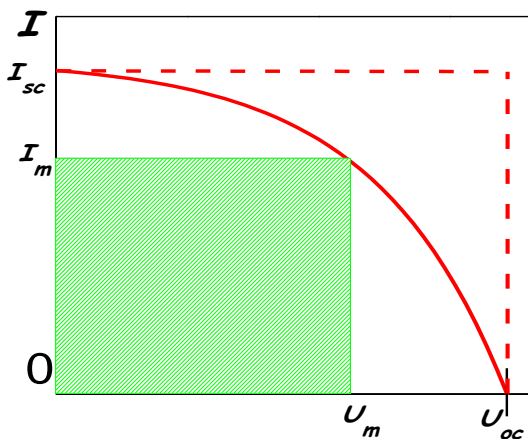
$$U_{oc} \sim \frac{nk_B T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{cT^\gamma}\right) + \frac{nE_g}{q} \quad \text{με } \gamma \sim 3,5 \quad (3.4)$$

που δείχνει ότι η τάση αυξάνει α) με την ενέργεια χάσματος του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η επαφή πη, για σταθερό φωτόρρευμα και β) με την ένταση του φωτορεύματος. T είναι η θερμοκρασία της επαφής, n ο παράγοντας ιδανικότητας και c σταθερά.



Σχήμα 3.6: Α) IV Φ/Β στοιχείου Β) Καμπύλη παρεχόμενης ισχύος P και φορτίου R συναρτήσει της τάσης.

Η δίοδος συμπεριφέρεται ως πάροχος ισχύος στο τέταρτο τεταρτημόριο του σχήματος 3.5 όπου το γινόμενο ρεύματος-τάσης είναι πάντα μικρότερο ή ίσο του μηδενός. Στις IV Φ/Β κυψελίδων παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία μόνο το τεταρτημόριο αυτό αντεστραμμένο ως προς τον οριζόντιο άξονα δηλαδή με θετικά ρεύματα (σχήμα 3.6Α). Όταν το Φ/Β στοιχείο συνδέεται με κάποιο εξωτερικό φορτίο, δηλαδή έναν καταναλωτή ενέργειας που ισοδυναμεί με αντίσταση R, τότε είναι υποχρεωμένο να λειτουργήσει σε σημείο (I_R, U_R) της IV καμπύλης του που να ικανοποιεί τη σχέση $R = U_R / I_R$. Εκεί θα αποδίδει στο φορτίο ισχύ $P = U_R \cdot I_R$. Αν υπολογίσουμε την ισχύ που παρέχει το στοιχείο σε εύρος τιμών φορτίου R και κάνουμε τη γραφική της παράσταση συναρτήσει της τάσης στα άκρα του στοιχείου τότε η καμπύλη που παίρνουμε (σχήμα 3.6Β) παρουσιάζει μέγιστο, P_m , για φορτίο R_m στο σημείο (I_m, U_m) που καλείται *σημείο μέγιστης ισχύος*, MPP. Στην πράξη αν ο συνδυασμός πηγής – καταναλωτή γίνει με σκοπό τη λειτουργία σε αυτό το σημείο τότε υπάρχει η βέλτιστη εκμετάλλευση της Φ/Β κυψελίδας.



$$FF = \frac{P_m}{U_{oc} I_{sc}} = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}} \tag{3.5}$$

Σχήμα 3.7: Σχηματικός ορισμός παράγοντα πληρότητας.

Μια ιδανική πηγή ισχύος σε κύκλωμα, ορίζεται το στοιχείο που μπορεί να τροφοδοτήσει με τάση (από 0 έως μια μέγιστη τιμή U_{oc}) το κύκλωμα ανεξαρτήτως του ρεύματος που θα του ζητηθεί από αυτό (από 0 έως μια μέγιστη κατασκευαστικά τιμή I_{sc}). Η περιοχή λειτουργίας μιας τέτοιας πηγής είναι το ορθογώνιο που εσωκλείεται από τη διακεκομμένη γραμμή του σχήματος 3.7 και το σημείο μέγιστης παροχής ισχύος είναι το (I_{sc}, U_{oc}) . Η καμπύλη IV μιας Φ/Β κυψελίδας έχει μορφή που δείχνει ότι απέχει από εκείνη μιας ιδανικής πηγής ισχύος (σχήμα 3.7). Δείκτης της ιδανικότητας της κυψελίδας σαν πηγή ισχύος είναι ο παράγοντας πλήρωσης FF (*field factor*) που δίδεται από τη σχέση 3.5. Όσο το $FF \rightarrow 1$ τόσο πιο κοντά στην ιδανική πηγή είναι το στοιχείο. Στα συνήθη φωτοβολταϊκά όπου η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι μεγαλύτερη από 0.25 V ο FF δίδεται από την εξίσωση:

$$FF = \frac{qU_{oc}/nk_B T - \ln(0.72 + qU_{oc}/nk_B T)}{1 + qU_{oc}/nk_B T} \quad (3.6)$$

Ο FF πλησιάζει κοντύτερα στη μονάδα όσο μεγαλώνει η U_{oc} (άρα το E_g και το φωτόρευμα I_L) αλλά μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του στοιχείου που επιδρά αρνητικά και στην U_{oc} (σχέση 3.4). Τυπική περιοχή τιμών του FF σε λειτουργικά Φ/Β είναι 0.7 – 0.9.

3.2 Απόδοση Φ/Β στοιχείου και παράγοντες που την επηρεάζουν

Από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν μια Φ/Β κυψελίδα είναι η απόδοση η . Ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, P_m , από το Φ/Β προς την προσπίπτουσα ηλιακή ισχύ, P_{in} .

$$\eta \equiv \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{U_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot U_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (3.7)$$

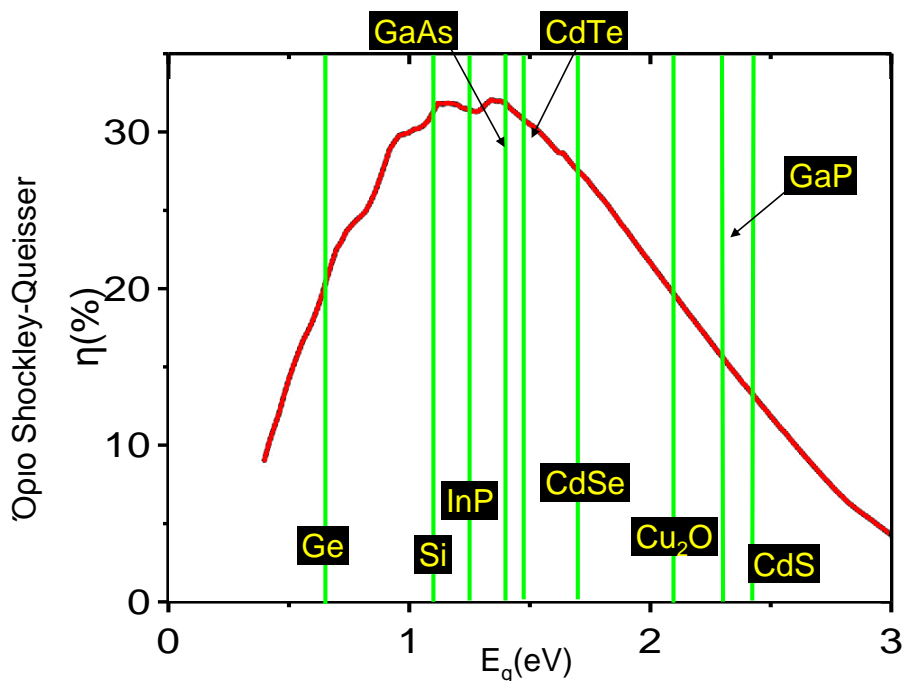
Η P_{in} είναι ίση με το γινόμενο της συνολικής προσπίπτουσας έντασης του ηλιακού φάσματος J_{in} επί την ενεργό επιφάνεια της, A , κυψελίδας στην οποία πέφτει το φως. Η ένταση λαμβάνεται ως ολοκλήρωμα σε όλα τα μήκη κύματος της κατανομής του ηλιακού φάσματος που διέρχεται από αέρια μάζα ίση με 1.5 φορές το πάχος της γήινης ατμόσφαιρας (AM1.5)

$$J_{in} = \int_0^{\infty} J_{AM1.5}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.8)$$

Μια από τις σημαντικότερες προσπάθειες που καταβάλλονται στην έρευνα και ανάπτυξη των Φ/Β στοιχείων σήμερα εστιάζεται ακριβώς στην αύξηση της απόδοσης των Φ/Β στοιχείων. Στην συνέχεια θα δούμε τους παράγοντες που την επηρεάζουν και κατασκευαστικές προσεγγίσεις που μπορούν να τη βελτιώσουν.

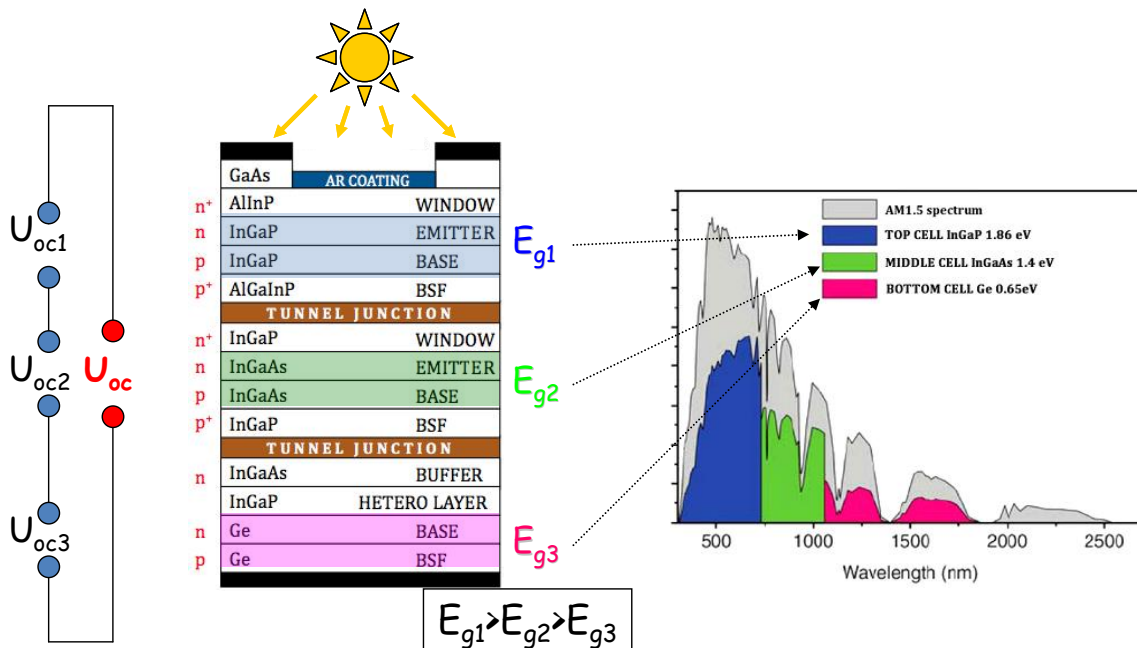
Η απόδοση επηρεάζεται σοβαρά από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού που επιλέγεται για την κατασκευή του στοιχείου. Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η θεωρητική πρόβλεψη για τη μέγιστη απόδοση που μπορεί να έχει μια Φ/Β κυψελίδα επαφής pn, σαν συνάρτηση της ενέργειας χάσματος. Η πρόβλεψη θεωρεί τη δίοδο μη ιδανική λόγω επανασύνδεσης φορέων από ζώνη σε ζώνη και καλείται συχνά ως *όριο Shockley-Queisser* από τους ερευνητές που πρώτοι την εισήγαγαν. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται και τα χάσματα συνήθων ημιαγωγών στην κατασκευή Φ/Β κυψελίδων. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη παρουσιάζει ένα μέγιστο στην τιμή $E_g = 1.35$ eV που αντιστοιχεί στο χάσμα του ημιαγωγού InP (φωσφίδιο του ινδίου) και ισούται με $\eta \cong 32\%$. Η μορφή της καμπύλης οφείλεται σε δύο ανταγωνιστικούς παράγοντες που επικρατούν ο ένας στις χαμηλές

και ο άλλος στις υψηλές ενέργειες. Από τις σχέσεις 3.6 και 3.7 παρατηρούμε ότι η απόδοση έχει τόσο άμεση όσο και έμμεση, μέσω του παράγοντα πλήρωσης, τάση να αυξάνεται με την τάση ανοιχτού κυκλώματος U_{oc} . Η σχέση 3.4 δείχνει ότι η U_{oc} είναι ανάλογη της ενέργειας χάσματος. Άρα η απόδοση αυξάνει με αύξηση της ενέργειας χάσματος και αυτό ακριβώς παρατηρείται κοιτάζοντας την καμπύλη του σχήματος 3.8 από τις χαμηλές E_g . Από την άλλη πλευρά μόνο τα φωτόνια με $h\nu$ μεγαλύτερη της ενέργειας χάσματος (σχήμα 3.1) μπορούν απορροφηθούν από τον ημιαγωγό και να οδηγήσουν στην παραγωγή φωτορεύματος I_L . Άρα το I_L και επομένως και το I_{sc} θα μειώνονται ισχυρά όσο η ενέργεια χάσματος αυξάνεται γιατί όλο και περισσότερα φωτόνια δεν απορροφώνται από τον ημιαγωγό. Αυτό οδηγεί στην μείωση τελικά της απόδοσης σε $E_g > 1.4$ eV. Οι δύο αυτοί ανταγωνιστικοί παράγοντες σε συνδυασμό με τις απώλειες φωτοφορέων από επανασύνδεση περιορίζουν και την μέγιστη τιμή της απόδοσης στο 32%.



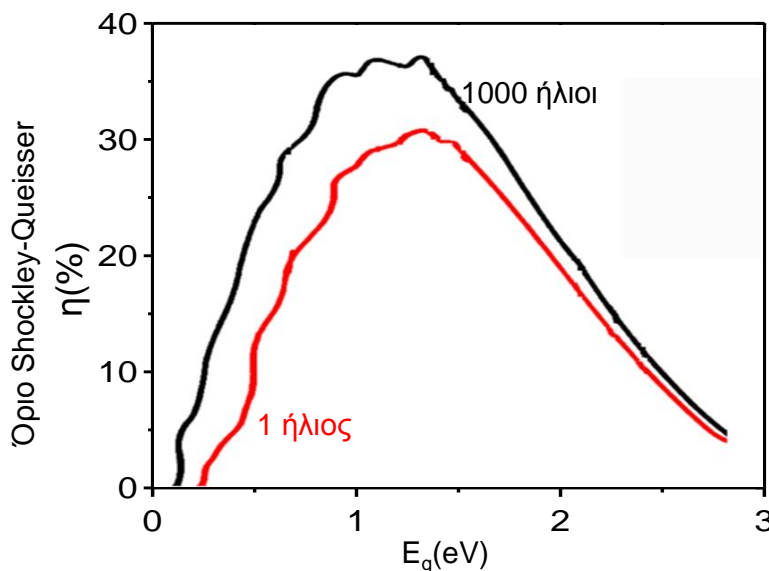
Σχήμα 3.8: Θεωρητική απόδοση Φ/Β επαφής pn συναρτήσει της ενέργειας χάσματος.

Μια κατασκευαστική προσέγγιση για βελτίωση της απόδοσης, που σχετίζεται με την ενέργεια χάσματος, είναι τα Tandem Φ/Β. Πρόκειται για την δημιουργία περισσότερων της μιας επαφών pn, της μιας πάνω από την άλλη, από υλικά διαφορετικού ενεργειακού χάσματος. Οι επαφές τοποθετούνται με τέτοια σειρά ώστε το φως να προσπίπτει κατά σειρά από τον ημιαγωγό μεγαλύτερου προς εκείνο μικρότερου χάσματος (σχήμα 3.9). Τότε φωτόνια μεγαλύτερης ενέργειας απορροφώνται πρώτα δηλαδή κοντύτερα στην εξωτερική επιφάνεια της κυψελίδας ενώ τα χαμηλότερης διαδίδονται προς το εσωτερικό της μέχρι να απορροφηθούν από επόμενη επαφή. Κάθε μια από τις επαφές θα παράγει τη δικιά της τάση ανοιχτού κυκλώματος οπότε η τιμή της U_{oc} για το Tandem Φ/Β ισούται με το άθροισμα των τιμών των επιμέρους επαφών. Η δομή Tandem επομένως θυμίζει τη συνδεσμολογία πηγών τάσης εν σειρά. Το κέρδος προέρχεται από το γεγονός ότι στις περιοχές του E_g που μια επαφή χάνει σε απόδοση (λόγω χαμηλού U_{oc} ή λόγω χαμηλής απορρόφησης φωτός) κερδίζει μια άλλη μέσα στην ίδια κυψελίδα. Έτσι η θεωρητικά αναμενόμενη απόδοση για Tandem με δύο επαφές pn από υλικά με $E_{g1}=1.56$ eV και $E_{g2}=0.94$ eV φτάνει το 47% ενώ με τρεις από υλικά με $E_{g1}=1.75$ eV, $E_{g2}=1.18$ eV και $E_{g3}=0.75$ eV φτάνει το 54%.



Σχήμα 3.9: Tandem Φ/Β στοιχείο τριών επαφών pn και περιοχές του ηλιακού φάσματος που απορροφά κάθε μία από τις επαφές αυτές.

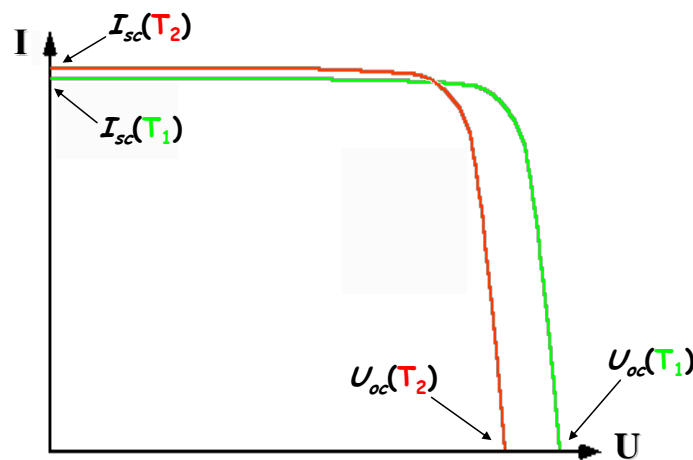
Η απόδοση Φ/Β απλής επαφής pn αυξάνει ελαφρώς και με την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η αύξηση πάνω από την τιμή του σχήματος 3.8 μπορεί να επιτευχθεί με χρήση κατόπτρων που συγκεντρώνουν το φως επάνω στο στοιχείο. Από το σχήμα 3.10 παρατηρούμε ότι η επίδραση είναι μικρή καθώς ένταση 1000 φορές μεγαλύτερη από την τιμή της AM1.5 ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση της μέγιστης θεωρητικής απόδοσης από το 32% μόλις στο 38%.



Σχήμα 3.10: Επίδραση της συγκέντρωσης του φωτός στην απόδοση Φ/Β κυψελίδας

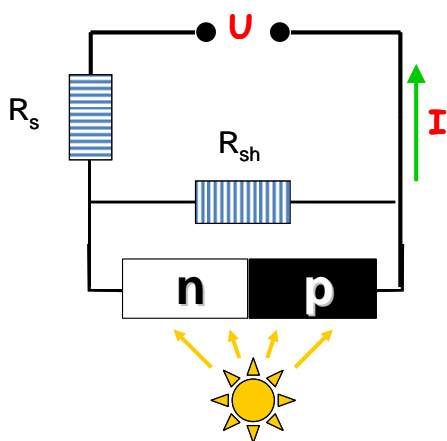
Καθώς στη σχέση 3.7 το I_{sc} είναι ανάλογο του P_{in} (δηλαδή αύξηση x1000 στο P_{in} προκαλεί ανάλογη αύξηση στο φωτόρρευμα) η αύξηση στο η οφείλεται στην μικρή αύξηση του γινομένου $FF \cdot U_{oc}$ της σχέσης 3.7 που προκαλείται από την αύξηση του U_{oc} με το I_L όπως προβλέπεται από τη σχέση 3.4.

Αρνητική επίδραση στην απόδοση έχει η αύξηση της θερμοκρασίας της Φ/Β κυψελίδας. Αυτή προκαλείται τόσο από αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όσο και από τη θέρμανση της ίδιας της κυψελίδας που επιφέρει α) η αποδιέγερση φωτοφορέων προς χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες μιας ζώνης (τότε η ενέργεια αποδίδεται στις ταλαντώσεις των ατόμων του πλέγματος που σημαίνει αμέσως αύξηση της θερμοκρασίας του) και β) η ροή ηλεκτρικού ρεύματος από την ωμική αντίσταση του σώματος του ημιαγωγού (θέρμανση Joule). Στο σχήμα 3.11 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη IV μιας επαφής pn κάτω από φωτισμό. Παρά το γεγονός ότι αυξάνεται ελαφρά το ρεύμα βραχυκύκλωσης (δείτε στη βιβλιογραφία γιατί) η απόδοση πέφτει λόγω ισχυρότερης μείωσης της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ενώ επηρεάζεται αρνητικά και ο παράγοντα πλήρωσης μέσω της σχέσης 3.6. Η μείωση της U_{oc} με την θερμοκρασία προβλέπεται από τη σχέση 3.4 στην οποία η μεγάλη τιμή του εκθέτη γ παίζει τον καθοριστικό ρόλο.



Σχήμα 3.11: Επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη IV Φ/Β κυψελίδας ($T_2 > T_1$)

Στην ενότητα 2.2 είχαμε αναφερθεί εκτενώς στην αρνητική επίδραση των παρασιτικών αντιστάσεων σειριακής, R_s και διαρροής, R_{sh} στην διοδική συμπεριφορά όπως αυτή αναμένεται από την καμπύλη ρεύματος-τάσης επαφής pn με παράγοντα ιδανικότητας n . Η επίδραση αυτή έχει και το ανάλογο αντίτυπο στην απόδοση Φ/Β κυψελίδας που περιλαμβάνει τέτοιες αντιστάσεις (σχήμα 3.12).

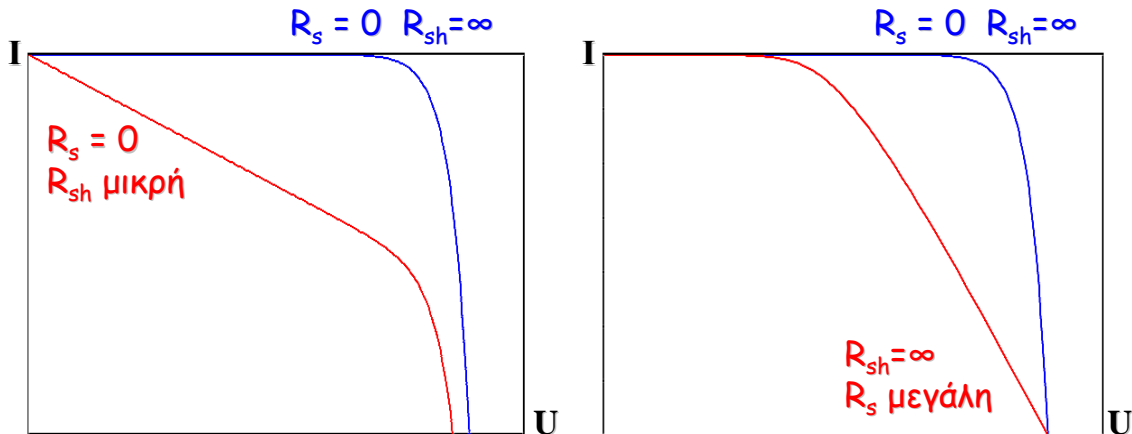


$$I = \left| I_s \left[\exp \left(\frac{q_e (U - IR_s)}{nk_B T} \right) - 1 \right] + \frac{U - IR_s}{R_{sh}} - I_L \right| \quad (3.9)$$

Σχήμα 3.12: Φ/Β στοιχείο με παρασιτικές αντιστάσεις.

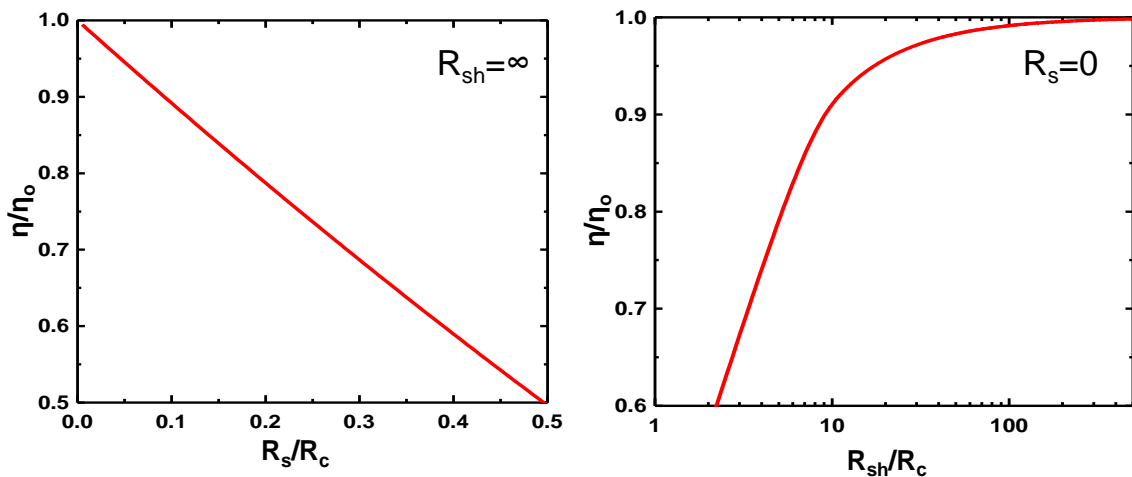
Η σχέση 3.3 που περιγράφει μαθηματικά την καμπύλη IV Φ/Β διαμορφώνεται πλέον στη σχέση 3.9 που περιλαμβάνει τις τιμές των R_s και R_{sh} . Όπως φαίνεται από τις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 3.13 η μείωση της απόδοσης που προκαλούν οι παρασιτικές αντιστάσεις οφείλεται κυρίως στην απομάκρυνση της καμπύλης IV από την «ορθογώνια» συμπεριφορά ιδανικής πηγής ισχύος δηλαδή στην μείωση του παράγοντα πλήρωσης. Έτσι όταν η αντίσταση διαρροής δεν είναι

άπειρη αλλά έχει μικρή τιμή τότε υποβαθμίζει το ρεύμα λειτουργίας από χαμηλές τάσεις ενώ όταν η σειριακή αντίσταση δεν είναι μηδέν αλλά έχει μεγάλη τιμή τότε το ρεύμα υποβαθμίζεται σε μεγαλύτερες τάσεις, κοντά στη U_{oc} .



Σχήμα 3.13: Επίδραση των παρασιτικών αντιστάσεων στην καμπύλη IV Φ/Β κυψελίδας.

Για να έχει κανείς μια αίσθηση του μεγέθους της υποβάθμισης της απόδοσης που προκαλούν οι αντιστάσεις αυτές αναφέρουμε το παράδειγμα Φ/Β κυψελίδας κρυσταλλικού πυριτίου με τυπικές τιμές ιδανικής επαφής κάτω από φωτισμό: $U_{oc}=0.6V$ και $I_{sc}=30mA$. Ορίζοντας την παράμετρο $R_c = U_{oc}/I_{sc}$ (που ισούται με 20Ω στην περίπτωση μας) κατασκευάζουμε το θεωρητικά αναμενόμενο διάγραμμα του λόγου της απόδοσης με παρασιτική αντίσταση προς εκείνη χωρίς αντίσταση, (η/η_0) σαν συνάρτηση με το λόγο της τιμής της αντίστασης προς την R_c για κάθε μια από τις R_s και R_{sh} . Σε κάθε περίπτωση θεωρούμε την άλλη αντίσταση με την ιδανική της τιμή.



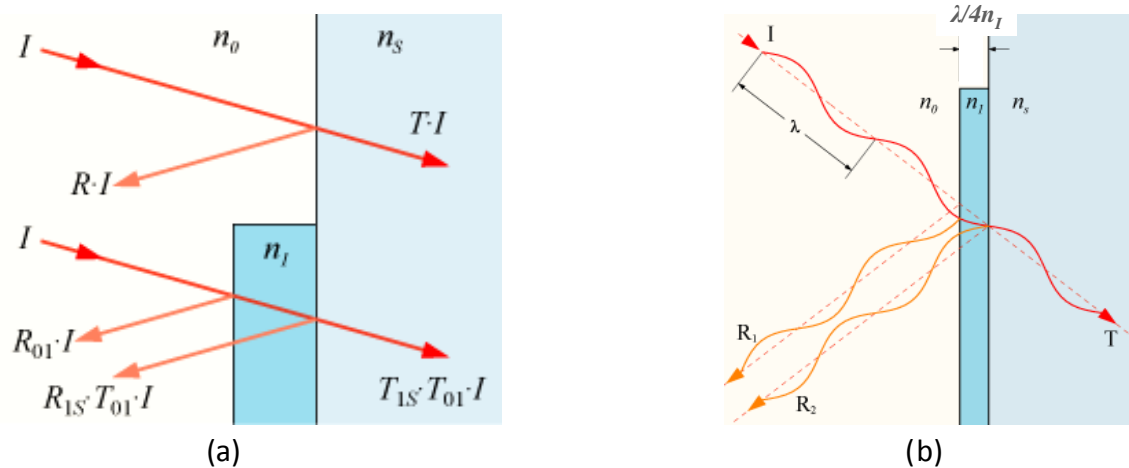
Σχήμα 3.14: Επίδραση στη απόδοση της R_s για άπειρη R_{sh} και της R_{sh} για μηδενική R_s

Στο σχήμα 3.14 φαίνεται ότι η απόδοση πέφτει αναλογικά με αύξηση της R_s και μη γραμμικά με μείωση της R_{sh} . Παρατηρείστε ότι μια σειριακή αντίσταση μόλις 10Ω θα μειώσει την απόδοση της κυψελίδας στο 50% της αρχικής τιμής της ενώ μια αντίσταση διαρροής 45Ω (που είναι στην πραγματικότητα μικρή σε σχέση με τις τιμές που έχουν οι πρακτικές κυψελίδες) θα μειώσει την απόδοση της κυψελίδας κατά 40%.

Μια τελευταία παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση μιας Φ/Β κυψελίδας είναι ο παρανομαστής της σχέσης 3.7 που είναι η ισχύς της προσπίπτουσας στο Φ/Β, Η/Μ ακτινοβολίας. Από τη σχέση 3.1 γίνεται αντιληπτό ότι μόνο ένα μέρος αυτής της ισχύος απορροφάται από το υλικό καθώς ποσοστό του ηλιακού φωτός ανακλάται από την επιφάνεια του. Το ποσοστό αυτό είναι τόσο

μεγαλύτερο όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά του δείκτη διάθλασης (δ.δ.) του υλικού, n_s , από του ατμοσφαιρικού αέρα ($n_o \cong 1$). Προσέξτε ότι ο συνήθης συμβολισμός του δ.δ. είναι n ώστε να μην υπάρξει σύγχυση με τον ίδιο συμβολισμό που χρησιμοποιείται και για τον παράγοντα ιδανικότητας της διόδου. Στο κρυσταλλικό πυρίτιο για παράδειγμα όπου ο δ.δ. είναι περίπου 4 για μήκος κύματος φως, $\lambda = 470 \text{ nm}$, το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται είναι 36% της προσπίπτουσας. Αυτό σημαίνει ότι αν συνέβαινε το ίδιο σε όλο το ηλιακό φάσμα (δεν ισχύει αυτό βέβαια...!) τότε η απόδοση θα ήταν περίπου στα 2/3 αυτής που θα πετύχαινε θεωρητικά το υλικό με βάση το όριο Shockley-Queisser.

Ο τρόπος με τον οποίο περιορίζονται οι απώλειες λόγω ανάκλασης του φωτός είναι με τη χρήση αντανάκλαστικών επιστρώσεων που σε συνδυασμό με τη χρωματική απόχρωση των ίδιων των υλικών δίνουν τα χαρακτηριστικά χρώματα (συνήθως μπλέ ή καφέκοκκινο) που έχουν οι επιφάνειες των εμπορικών κυψελίδων. Υπάρχουν δυο προσεγγίσεις (σχήμα 3.15 a και b) που συνήθως εφαρμόζονται συνδυαστικά.



Σχήμα 3.15: Αντανάκλαστικές επιστρώσεις τύπου Rayleigh (a) και συμβολής (b)

Η πρώτη είναι η επίστρωση Rayleigh στην οποία το υλικό της επίστρωσης πρέπει να έχει δ.δ. n_1 ενδιάμεσο των n_o και n_s , ιδανικά ίσο με $\sqrt{n_o \cdot n_s}$ ανεξαρτήτως πάχους (αρκεί να μην απορροφάει σημαντικά το φως ειδικά στις περιοχές του φάσματος όπου το Φ/Β αποδίδει τα μέγιστα). Στο παράδειγμα με το πυρίτιο, επίστρωση με $n_1 = 2$ μειώνει το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας από 36% σε 21%. Η δεύτερη προσέγγιση εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της συμβολής από λεπτά υμένια που λέει ότι για συγκεκριμένο μήκος κύματος λ και δ.δ. υμενίου n_1 , η ανάκλαση μηδενίζεται λόγω καταστρεπτικής συμβολής, όταν το πάχος του υμενίου ισούται με $\lambda/4n_1$. Για το $\lambda = 470 \text{ nm}$ και το $n_1 = 2$ του παραδείγματος μας ένα πάχος υμενίου 71 νανόμετρα μηδενίζει την ανάκλαση στο συγκεκριμένο μήκος κύματος ενώ αποδεικνύεται ότι την επιτρέπει σε ποσοστό μικρότερο του μόλις 5% σε όλο το ορατό ηλιακό φάσμα! Για το λόγο αυτό σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές περιλαμβάνουν αντανάκλαστικές επιστρώσεις συμβολής στα Φ/Β τους.

Κεφάλαιο 4. Υλικά και δομές κατασκευής Φ/Β στοιχείων

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας ενότητας θα γίνει μια αναφορά στα συνήθη εμπορικά Φ/Β στοιχεία επαφής ρη, στα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα και την δομή τους. Όσον αφορά την τελευταία χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες α) εκείνα που κατασκευάζονται με επεξεργασία φύλλων που κόβονται από μεγάλα συμπαγή κομμάτια (συνήθως κυλινδρικής συμμετρίας) και β) εκείνα που εναποτίθενται (με φυσικές ή χημικές τεχνικές από αέρια φάση) υπό την μορφή λεπτών υμενίων επάνω σε σκληρά ή εύκαμπτα υποστρώματα. Στην πρώτη ανήκουν τα Φ/Β κρυσταλλικού και πολυ-κρυσταλλικού πυριτίου και γαλλίου-αρσενικού ενώ στη δεύτερη τα άμορφου(ή μικροκρυσταλλικού) υδρογονωμένου πυριτίου, τα CdTe και CIGS.



(α)



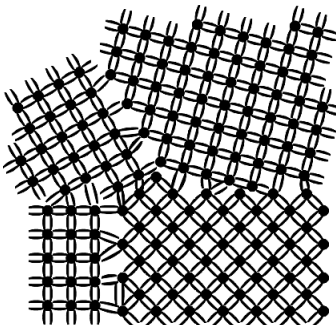
(β)



(γ)

Σχήμα 4.1: Φ/Β κυψελίδα (β) και πάνελ (γ) κρυσταλλικού πυριτίου. Κύλινδρος συμπαγούς ημιαγωγού (α)

Ο μονοκρύσταλλος πυριτίου c-Si αποτελεί ένα τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα στο οποίο τα άτομα διατάσσονται περιοδικά στο χώρο με ίδιους προσανατολισμούς δεσμών έτσι ώστε η εσωτερική δομή του υλικού να είναι ακριβώς ίδια για εξωτερικό παρατηρητή παντού σε όλο τον όγκο του κρυστάλλου. Τα Φ/Β c-Si φτιάχνονται από κυλίνδρους (μασούρια) υπερκάθαρου υλικού (σχήμα 4.1 α) από ξένα σώματα ή κρυσταλλικές ατέλειες που περιλαμβάνουν κατά την κατασκευή τους μια ενεργή πρόσμιξη, είναι δηλαδή τύπου n ή τύπου p. Από αυτά κόβονται δίσκια πάχους συνήθως έως 300 μm και εισάγεται από την μια τους επιφάνεια, σε υψηλή συγκέντρωση, η άλλη πρόσμιξη με μεθόδους όπως η θερμική διάχυση ή η εμφύτευση. Εξωτερικά τα Φ/Β αυτά διακρίνονται από την ομοιογενή οπτικά επιφάνεια που συνήθως χρωματίζεται μπλε από το συνδυασμό του χρώματος του υλικού με την αντανάκλαστική του επιστρώση (σχήμα 4.1 β). Έχουν σχετικά υψηλό κόστος κατασκευής αλλά προσφέρουν αξιοπιστία στην απόδοση και σταθερότητα στο χρόνο. Η επιτευγμένη μέγιστη απόδοση απλής κυψελίδας έχει φτάσει το 25% ενώ σε Φ/Β πλαίσια περιορίζεται στο 22%



(α)



(β)

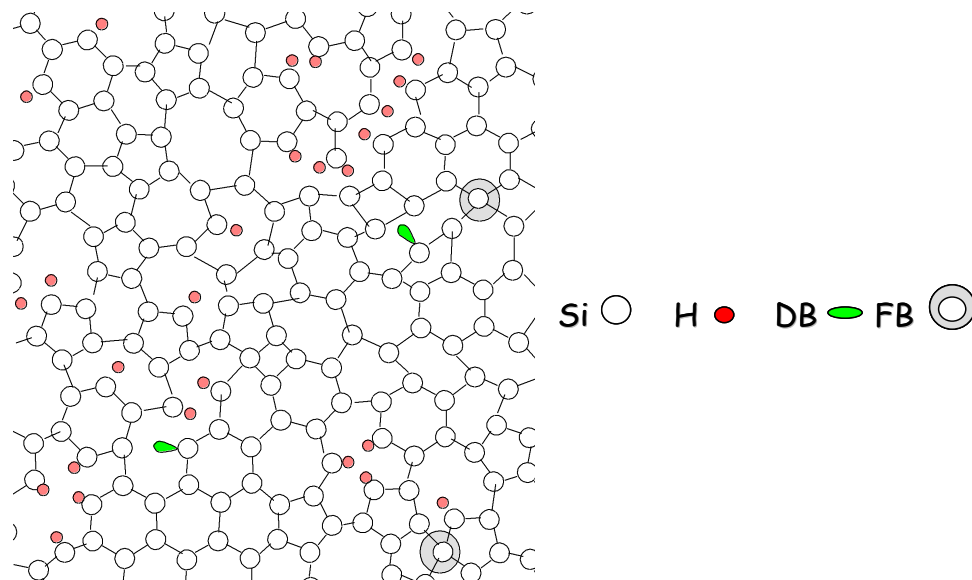


(γ)

Σχήμα 4.2: Φ/Β κυψελίδα (γ) και επιφάνεια (β) πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Περιγράμμα της εσωτερικής δομής του υλικού (α)

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (p-Si) κατασκευάζεται με παρόμοιες τεχνικές με το μονοκρύσταλλο αλλά με χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις και σε αυτό οφείλεται η τελική δομή του. Αυτή αντί να αποτελεί ένα ομοιόμορφο πλέγμα, αντίθετα αποτελείται από πολλούς κρυσταλλίτες διαφόρων σχημάτων και μεγεθών (συνήθως διαστάσεων τάξης μερικών εκατοστών), πακτωμένους μεταξύ τους (σχήμα 4.2 α). Κάθε κρυσταλλίτης είναι ένας μονοκρύσταλλος πυριτίου. Οι κρυσταλλίτες είναι ορατοί δια γυμνού οφθαλμού στην επιφάνεια των Φ/Β p-Si (σχήμα 4.2 β και γ) και αυτό τα κάνει άμεσα αναγνωρίσιμα ανάμεσα σε όλα τα άλλα στοιχεία. Τα όρια των κρυσταλλιτών αποτελούν *κρυσταλλικές ατέλειες* που εισάγουν ενεργειακές στάθμες μέσα στο χάσμα του ημιαγωγού και ενισχύουν την επανασύνδεση των φωτοφορέων μειώνοντας αντίστοιχα το φωτόρευμα. Για το λόγο αυτό η συνολική επιφάνεια που συνθέτουν τα όρια αυτά πρέπει να διατηρείται μικρή. Αυτό επιτυγχάνεται με το όσο γίνεται μεγαλύτερο μέσο μέγεθος των κρυσταλλιτών. Τα Φ/Β p-Si έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής από το c-Si, ικανοποιητική σταθερότητα με το χρόνο και απόδοση που φτάνει το 20% σε επίπεδο κυψελίδας και 14% για Φ/Β πλαίσιο.

Το γάλλιο-αρσενικό (GaAs) είναι σύνθετος ημιαγωγός που έχει άμεσο ενεργειακό χάσμα 1.45 eV δηλαδή πολύ κοντά στην τιμή που επιτυγχάνει το απόλυτο μέγιστο απόδοσης (32%) σύμφωνα με το όριο Shockley-Queisser. Έχει το χαρακτηριστικό ότι οι ελεύθεροι φορείς ηλεκτρόνια και οπές που παράγονται από απορρόφηση του φωτός έχουν πολύ μεγάλη ευκινησία μέσα στο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι επιτυγχάνονται μεγαλύτερα φωτορεύματα για ίδιες συγκεντρώσεις φωτοφορέων ενώ και η θέρμανση του υλικού είναι αναλογικά μικρότερη. Τα Φ/Β που παράγονται από GaAs αποτελούν τους πρωταθλητές απόδοσης με 29% σε επίπεδο κυψελίδας, δηλαδή πάρα πολύ κοντά στο θεωρητικό όριο του 30-31% που αντιστοιχεί σε αυτή την ενέργεια χάσματος. Σε μεγάλα πλαίσια έχει επιτευχθεί απόδοση 23%. Το εξαιρετικά υψηλό κόστος κατασκευής αλλά και η εξαιρετική σταθερότητα στην απόδοση τους ακόμα και υπό τις αντίξοες συνθήκες που επικρατούν στο διάστημα έχει περιορίσει τα Φ/Β GaAs σε σχετικές εφαρμογές.



Σχήμα 4.3: Δομή a-Si:H. Ακόρεστοι δεσμοί DB και FB.

Το άμορφο υδρογονωμένο πυρίτιο (a-Si:H) είναι ο πρώτος ημιαγωγός λεπτού υμενίου που αναφέρουμε στην ενότητα αυτή. Με ενεργειακό χάσμα 1.65 eV, είναι υλικό που φτιάχνεται σε πάχη τάξης μικρομέτρου, με συμπύκνωση ατόμων πυριτίου, επάνω σε υπόστρωμα από γυαλί, μέταλλο ή

και εύκαμπτο πλαστικό. Η συμπύκνωση γίνεται φυσικά από αέρια φάση ή από σιλάνιο (SiH_4), ένα αέριο αντίστοιχο του μεθανίου ή από άτομα που εξαχνώνονται από στερεό πυρίτιο. Λέγεται άμορφο διότι τα άτομα του πυριτίου μέσα στο υλικό δεν διατηρούν την περιοδικότητα ενός κρυσταλλικού πλέγματος αλλά έχουν μια σχετικά άτακτη δομή που περιλαμβάνει και πολλούς ακόρεστους δεσμούς πυριτίου (που δεν συνδέονται δηλαδή με γειτονικά άτομα). Επειδή και αυτοί ενισχύουν τις επανασυνδέσεις φωτοφορέων, το υλικό περιλαμβάνει και άτομα υδρογόνου που κορένουν σε μεγάλο ποσοστό αυτούς τους δεσμούς (σχήμα 4.3).

Ενώ το κόστος κατασκευής Φ/Β από a-Si:H είναι εξαιρετικά χαμηλό, παρουσιάζουν το πρόβλημα της χαμηλής απόδοσης που δεν ξεπερνά το 13% και το 8% σε επίπεδο κυψελίδας και πλαισίου αντίστοιχα, ακριβώς εξαιτίας της απόκλισης της δομής του υλικού από την κρυσταλλικότητα. Αυτή η απόδοση καλείται *σταθεροποιημένη* καθώς η αρχική είναι υψηλότερη αλλά υποβαθμίζεται γρήγορα κατά την έκθεση του υλικού στο ηλιακό φως! Αυτό το φαινόμενο καλείται Staebler-Wronski, από τους ερευνητές που το ανακάλυψαν, και αποτελεί άλλο ένα πρόβλημα του υλικού. Εξωτερικά τα Φ/Β αυτά διακρίνονται από την καφέ-κόκκινη απόχρωση τους (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.5: Φ/Β πλαίσια a-Si:H

Από τα νεότερα υλικά κατασκευής Φ/Β λεπτών υμενίων είναι το τελλουρίδιο του Καδμίου (CdTe). Είναι σύνθετος ημιαγωγός με ενεργειακό χάσμα 1.5 eV. Εκ κατασκευής το CdTe έχει περισσότερες οπές από ηλεκτρόνια και αυτό τον κάνει τύπου $-p$. Άρα δεν είναι δυνατόν να υποστηρίξει μόνος του μια επαφή p μιας που δεν εμπλουτίζεται εύκολα με προσμίξεις που να αλλάζουν τον χαρακτήρα του σε τύπου $-n$. Έτσι η επαφή p φτιάχνεται με επίστρωση του σουλφιδίου του καδμίου (CdS) επάνω από το CdTe , ενός ημιαγωγού που επίσης εκ κατασκευής είναι τύπου $-n$. Επειδή το CdS έχει πολύ μεγάλο χάσμα ($E_g = 2.5$ eV) η απορρόφηση φωτονίων σε αυτόν είναι τόσο μικρή σε σχέση με το CdTe ώστε το CdS να θεωρείται περισσότερο ως «παράθυρο» διαπερατό στο φως και το CdTe ως το αποκλειστικά «ενεργό» υλικό της επαφής p . Τα Φ/Β CdTe είναι φθηνότερα από του $c\text{-Si}$, επειδή χρησιμοποιούν όμως σπάνια μέταλλα και το κάδμιο που από πολλούς θεωρείται ανθυγιεινό στοιχείο, δεν έχουν διαδοθεί εμπορικά. Έχουν επιτύχει απόδοση σε επίπεδο κυψελίδας 21% και πλαισίου έως 17%.

Μια παραλλαγή των Φ/Β CdTe είναι τα Φ/Β CIGS από τα αρχικά των λέξεων Copper, Indium, Gallium και Selenide που είναι τα τέσσερα στοιχεία του τετραμερούς σύνθετου ημιαγωγού που αποτελεί το ενεργό υλικό στην περίπτωση τους. Και το CIGS είναι τύπου $-p$ ημιαγωγός οπότε πάλι χρησιμοποιείται το CdS για την ολοκλήρωση της επαφής p . Ο συντακτικός τύπος του, $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}$, δηλώνει και την ιδιαιτερότητα του, ότι δηλαδή η σχετική αναλογία ινδίου (In) και γαλλίου (Ga) μπορεί να αλλάζει κατά την κατασκευή του τετραμερούς επιφέροντας αλλαγή στο τιμή του ενεργειακού χάσματος του. Το E_g κινείται από το 1.7 προς το 1.0 eV καθώς το x αλλάζει από 0 προς

το 1 (ή αλλιώς καθώς κινούμαστε από μηδενική ποσότητα ιδίου προς μηδενική ποσότητα γαλλίου). Αυτό προσφέρει μια δυνατότητα βελτιστοποίησης της απόδοσης Φ/Β που το χρησιμοποιούν. Επειδή παρουσιάζει και το μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης φωτός για $h\nu > E_g$, πράγματι κατέχει το ρεκόρ απόδοσης Φ/Β στοιχείου απλής επαφής pn λεπτού υμενίου με 22% (14% για Φ/Β πλαίσιο). Θεωρείται από τα πολλά υποσχόμενα υλικά για το μέλλον της Φ/Β τεχνολογίας.

Κεφάλαιο 5. Βιβλιογραφία.

1. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Ι. Φραγκιαδάκης, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, ISBN 960-456-007-7
2. “Physics and Technology of Semiconductor Devices”, S. M. Sze, Wiley, New York, 1981, ISBN: 0-471-05661-8
3. “Εργαστήριο Στερεών Υλικών – Εγχειρίδιο”, Ε. Σπανάκης, Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2013.
4. <http://www.pveducation.org/>