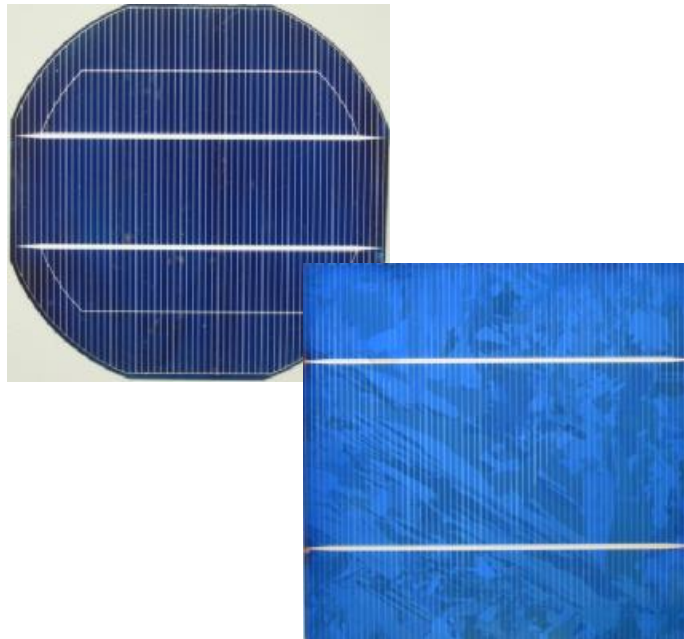


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ Φ/Β
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΜΥΤΙΛΗΝΙΟΣ ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΩΝ ΦΩΤΗΣ (Α.Μ.5897)
ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΔΡ. ΕΛΕΝΗ ΚΑΠΛΑΝΗ**

ΠΑΤΡΑ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Τμήματος Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στη μελέτη μεθόδου υπολογισμού της εν σειρά αντίστασης R_s και του συντελεστή ιδεατότητας m φωτοβολταϊκών (ϕ/β) στοιχείων. Η μέθοδος βασίζεται στη λήψη και επεξεργασία μετρήσεων των τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης i_{sc} και της τάσης ανοικτού κυκλώματος V_{oc} , για μια σειρά εντάσεων φωτεινής ροής. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας μεθόδου μπορεί να οδηγήσουν στον υπολογισμό της εν σειρά αντίστασης R_s και κατ'επέκταση στην εκτίμηση της απώλειας ισχύος λόγω του φαινομένου Joule, καθώς και τον προσδιορισμό του συντελεστή ιδεατότητας m . Επίσης, αποτελούν τη βάση για τη μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός ϕ/β στοιχείου

Παρουσιάζονται συνοπτικά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, η αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού, κατασκευαστικές λεπτομέρειες και αναλύονται μέθοδοι υπολογισμού της εν σειρά αντίστασης. Επίσης παρουσιάζονται και αναλύονται στοιχεία που αφορούν την διεξαγωγή των πειραμάτων και των πειραματικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος γίνεται ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων προς εξαγωγή συμπερασμάτων και παρατίθενται οι πειραματικές μετρήσεις σε μορφή πινάκων.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία συνίσταται από τη θεωρητική ανάπτυξη του θέματος, τη διεξαγωγή πειραμάτων και την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι πρωτογενές.

Ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου Δρ. Ελένη Καπλάνη του Τμήματος της Μηχανολογίας, για την καθοδήγησή, συμβουλές και τις παραινέσεις της, καθώς και τον καθ. Σωκράτη Καπλάνη, για τη διάθεση του εξοπλισμού του εργαστηρίου.

Παντελεήμων Φώτης Μυτιληνιός
Σεπτέμβριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή αυτή περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

1. Θεωρητική και πειραματική ανάλυση των χαρακτηριστικών μεγεθών, ρεύματος βραχυκύκλωσης i_{sc} και τάσης ανοικτού κυκλώματος V_{oc} για φ/β στοιχεία τύπου sc-Si και pc-Si. Παρουσιάζεται μια κατάλληλη πειραματική διάταξη για την λήψη μετρήσεων των ανωτέρω μεγεθών συναρτήσει της έντασης της φωτεινής ροής επ'αυτών.
2. Ανάλυση των μετρήσεων και ανάπτυξη ενός θεωρητικού μοντέλου για τον προσδιορισμό της εσωτερικής αντίστασης R_s και του συντελεστή ιδεατότητας m των φ/β στοιχείων.

Το περιεχόμενο της εργασίας με τη θεωρητική και πειραματική ανάλυση και με την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων, παρουσιάζεται σε 6 Κεφάλαια που συνοδεύονται από ένα Παράρτημα με Πίνακες.

Στο πρώτο Κεφάλαιο της εργασίας αναλύονται στοιχεία από την δομή και τον τρόπο λειτουργίας των φ/β στοιχείων. Αναλύεται η αρχή λειτουργία τους και παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιοι βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών. Κατόπιν γίνεται παρουσίαση της μεθόδου κατασκευής φ/β στοιχείων, των κατασκευαστικών τους λεπτομερειών και της απόδοσής τους.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των μεγεθών που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του φ/β στοιχείου και αναλύονται θέματα που αφορούν την επίδραση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην εμφανιζόμενη τάση και το παραγόμενο ρεύμα. Επιπλέον παρατίθενται θεωρητικά μοντέλα που περιγράφουν την λειτουργία του φ/β στοιχείου και αναλύονται η εν σειρά αντίσταση R_s , η εν παραλλήλω αντίσταση R_{sh} , συντελεστής ιδεατότητας m , καθώς και η επίδρασή τους στην λειτουργία του φ/β.

Στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των μεθόδων προσδιορισμού των εν σειρά R_s και εν παραλλήλω αντιστάσεων R_{sh} , καθώς και του συντελεστή ιδεατότητας m .

Το τέταρτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει ανάλυση της πειραματικής διάταξης και της διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Αναλύεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα καθώς και οι παράμετροι που ήταν απαραίτητο να ελέγχονται κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται οι υπολογισμοί που έγιναν με βάση τις μετρήσεις και στο έκτο και τελευταίο Κεφάλαιο παρατίθενται συμπεράσματα και συζήτηση επί των αποτελεσμάτων.

Τέλος παρατίθεται ένα Παράρτημα Πινάκων με τις τιμές των μετρήσεων που ελήφθησαν, οι οποίες είναι οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} , της τάσης ανοικτού κυκλώματος V_{oc} , η απόσταση λαμπτήρα-στοιχείου l , καθώς και των τιμών έντασης ακτινοβολίας I_T και της διορθωμένης τάσης, $V_{oc,corr}$, που προκύπτουν μέσω επεξεργασίας των μετρήσεων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	1
2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ....	2
3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ/ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	2
1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	3
1.1 Φ/Β ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ.....	3
1.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	8
1.2.1. Τύπος Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου, sc-Si.....	9
1.2.2 Τύπος Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου, pc-Si.....	10
1.2.3 Τύπος φ/β στοιχείου Λεπτής Μembrάνης (thin film)	10
1.2.4. Άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών	12
1.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΥΠΟΥ pc-Si ΚΑΙ sc-Si	12
1.4 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ /ΦΒ ΛΟΓΩ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	16
1.4.1. Οπτικές απώλειες	16
1.4.2. Ηλεκτρικές απώλειες.....	18
2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΝΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΙ Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΛΟΙΠΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	19

2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΝΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	19
2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	25
2.3 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R_s ΚΑΙ ΕΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩ R_{sh} . ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ m	27
3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_s ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ m	32
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ	38
4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΛΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	38
4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	45
4.3 ΛΗΨΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ I-V.	51
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	52
5.1 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΤΥΠΟΥ pc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 6cmX6cm	52
5.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ, m	56
5.1.2.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ, R_s	57
5.2 ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΤΥΠΟΥ sc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11cmX11cm ΜΕ ΑΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	59
5.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ, m	62
5.2.2.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ, R_s	64
5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΤΥΠΟΥ sc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 5cmX5cm ΜΕ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	66
5.3.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ, m	69
5.3.2.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ, R_s	70
6.ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ....	72

6.1 Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ $sc-Si$ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 5cmX5cm ΜΕ ΤΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	72
6.2 Φ/β ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ $pc-Si$ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 6cmX6cm ΜΕ ΤΟ ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	77
6.3 Φ/β ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ $sc-Si$ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11cmX11cm ΜΕ ΤΟ ΑΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	78
6.4 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ..	80
6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	87

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Ο ήλιος είναι μια τεράστια πηγή ενέργειας. Εντός της μάζας του λαμβάνουν χώρα πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης και παράγεται πυρηνική ακτινοβολία αλλά και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και θερμότητα.

Ένα μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας φθάνει στην εξωτερική ατμόσφαιρα της γης και είναι ίση με 174PW. Τελικά, στην επιφάνεια της γης, σε μια καθαρή ημέρα κατά το ηλιακό μεσημέρι, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 1000W/m^2 . Το ποσό αυτό δείχνει ότι η ανεξάντλητη αυτή πηγή ενέργειας έχει μικρή πυκνότητα, ωστόσο υπάρχει παντού σε αντίθεση με τα κοιτάσματα των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Ένα πλήθος από τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία με δύο κυρίως στόχους: α) να καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες σε ισχύ, θέρμανση, ψύξη σε ποσοστό περίπου 20% και β) να διατηρούν το περιβάλλον καθαρό, μειώνοντας τους ρύπους του φαινομένου του θερμοκηπίου (Kyoto Protocol, 1998)

Μια από τις τεχνολογίες αυτές αποτελούν τα φ/β συστήματα, τα οποία έχουν απόδοση, η οποία αυξάνεται συνεχώς, και σήμερα έχει ξεπεράσει το 35%, σε πειράματα στο εργαστήριο. Ωστόσο έχουν κατασκευασθεί συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα τα οποία συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μικρή επιφάνεια με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοση μέχρι και 29.7% (Bett et al, 2003).

Η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών αυτών επηρεάζεται σημαντικά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία προσπίπτει στα φ/β. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας ανά ημέρα και ανά ώρα για κάποια περιοχή (Karlanis and Karlanis 2007; Karlanis and Karlanis, 2010), που δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα σε σύγκριση με εμπορικά μοντέλα τα οποία απ'την άλλη πλευρά είναι πολύ εύχρηστα, όπως τα PVGIS (JRC, PVGIS) και Meteonorm (Meteonorm).

Παράλληλα έχει αναπτυχθεί και η τεχνολογία της Συμπαράγωγής όπου παράλληλα με την ηλεκτρική ισχύ παράγεται και θερμότητα (PV Thermal) (Chow, 2010).

2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Λόγω της άνευ χρόνου και ορίων εκμετάλλευσης της, όπως αναφέραμε προηγουμένως καθώς και του πρωτοκόλλου του Kyoto (Kyoto Protocol, 1998) που επιβάλλει σε παγκόσμια κλίμακα μείωση των ρύπων από τα συμβατά καύσιμα, ήτοι άνθρακας ή υδρογονάνθρακες, εντάθηκε η προσπάθεια για μελέτες και εφαρμογές με στόχο την άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, το οποίο θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 1. Σκοπός τους είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, φυσικών πόρων, αλλά και η προστασία του περιβάλλοντος, από τις επιπτώσεις των αέριων του θερμοκηπίου (Tucker, 1995).

Το φ/β φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel το 1839, κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια.

Το επόμενο βήμα έγινε όταν το 1877 ο καθηγητής Adams του Cambridge και ο φοιτητής του Day, παρουσίασαν την εργασία τους επί των μεταβολών των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του στοιχείου Σεληνίου, Se, όταν εκτίθεται στο φως.

Το 1918 ο Πολωνός Czochralski ανέπτυξε τη μέθοδο παραγωγής ημιαγώγιμου μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική του έρευνα και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη μέχρι και σήμερα.

Το πρώτο φ/β στοιχείο έγινε πραγματικότητα στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson. Η απόδοσή του ήταν μόλις το 6% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ/ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Όπως προαναφέραμε σημαντικό πλεονέκτημα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φ/β συστήματα έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας είναι η μηδενική εκπομπή ρύπων κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και ότι η ηλιακή ενέργεια είναι μία άφθονη, δωρεάν προσφερόμενη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.

Επίσης η λειτουργία τους είναι αθόρυβη και απαιτούν σχεδόν μηδενική συντήρηση. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία σύμφωνα με τους κατασκευαστές προσεγγίζει και τα 30 χρόνια λειτουργίας, αν και μέχρι πριν από 10 χρόνια τα όρια λειτουργίας που είχαν τεθεί ήταν τα 20 χρόνια.

Κάθε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση έχει δυνατότητα μελλοντικής επέκτασής της σε περίπτωση αυξημένων ηλεκτρικών αναγκών των χρηστών, οι

οποίες εγκαταστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές όπως η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου.

Τέλος, διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές τους. Μπορούν να λειτουργήσουν άριστα ως αυτόνομα συστήματα, αλλά και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες, όπως αιολικές γεννήτριες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.

Το ακόμα και σήμερα υψηλό κόστος των φ/β συστημάτων έναντι των συμβατικών συστημάτων είναι ένα μεγάλο τους μειονέκτημα. Βέβαια το κόστος μιας εγκατάστασης φ/β συστήματος μπορεί να αποπληρωθεί σε περίπου 5-6 χρόνια λειτουργίας του. Αυτό εξαρτάται από την υψηλή τιμή πώλησης της kWh η οποία από 0.49€/kWh μέχρι πρότινος μειώθηκε για τα νέα φ/β συστήματα στο 0.25€/kWh, και τα λοιπά κίνητρα για τη διείσδυση της στην οικονομία.

1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ

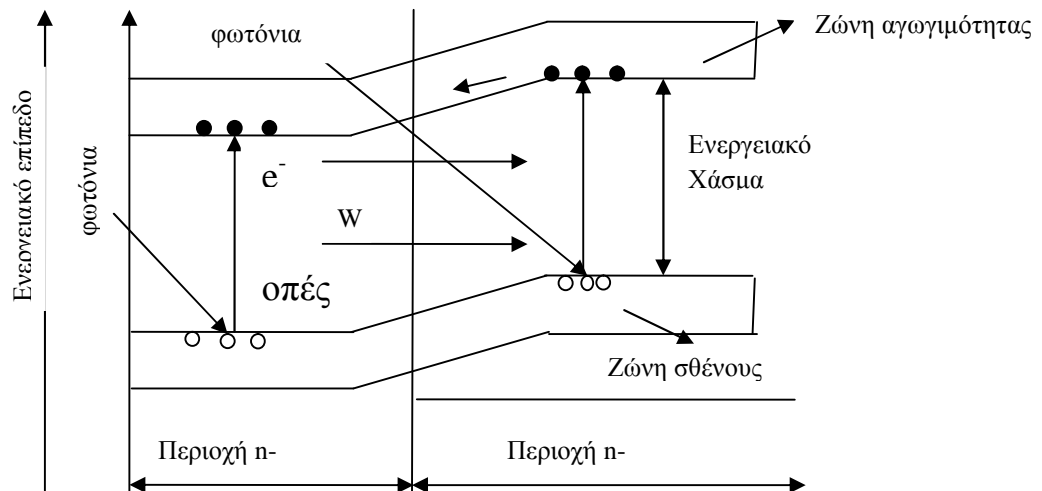
1.1 Φ/Β ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Η αρχή λειτουργίας ενός φ/β στοιχείου είναι η ακόλουθη: εάν δύο στρώσεις καθαρού ημιαγωγού (π.χ. πυριτίου Si) που στην κάθε μία έχει γίνει ελάχιστη προσθήκη προσμίξεων (άτομα φωσφόρου P στη μία και άτομα βορίου B στην άλλη) της τάξεως 10^{15} - 10^{16} άτομα/mol, βρίσκονται σε τέλεια επαφή, τότε εμφανίζεται το φ/β φαινόμενο κατά το οποίο αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού συνεχούς τάσης μεταξύ των ακροδεκτών του φ/β στοιχείου, όταν επί του φ/β συστήματος αυτού προσπέσει ηλιακή φωτεινή δέσμη. Όταν μάλιστα οι ακροδέκτες έρθουν σε επαφή, τότε διαρρέεται από συνεχές ρεύμα i το οποίο περνάει από το φορτίο R_L .

Στην πράξη γνωρίζουμε τα φ/β πλαίσια τα οποία έχουν ως βασική δομική μονάδα το φ/β στοιχείο που είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός μικρού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια, σύμφωνα με την καινοτόμο ειδική σύνθεση που παρουσιάζεται παραπάνω. Η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ηλεκτρική τάση και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Ουσιαστικά, το φ/β στοιχείο είναι μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος.

Προχωρώντας σε ενεργειακή μελέτη των στρώσεων του ημιαγωγού, ένα φ/β-στοιχείο αποτελείται μικροσκοπικά από 2 ζώνες, από την ενεργειακή ζώνη αγωγιμότητας και από την ζώνη σθένους. Ανάμεσα στις δύο ζώνες υπάρχει μια

διαφορά ενέργειας W_g , όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1. Όταν φωτόνιο ενέργειας $h\nu$ μεγαλύτερης της W_g αλληλεπιδράσει με ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους το αναβαθμίζει ενεργειακά και το μεταφέρει στη ζώνη αγωγιμότητας. Το ηλεκτρόνιο αφήνει πίσω μια «οπή», δηλαδή μια ατομική περιοχή θετικά φορτισμένη. Στη ζώνη αγωγιμότητας το ηλεκτρόνιο κινείται ελεύθερο με αποτέλεσμα το σύστημα να άγει τον ηλεκτρισμό. (Σ.Ν. Καπλάνης, 2004)



Σχ.1.1: Ενεργειακό διάγραμμα των δύο ημιαγωγών Si τύπου σε επαφή. (Καπλάνης,2004)

Η διαφορά ενέργειας η οποία αναπτύσσεται ανάμεσα στις 2 ζώνες χαρακτηρίζεται από το υλικό το οποίο είναι κατασκευασμένος ο ημιαγωγός, όπως δείχνει ο Πίν.1.1.

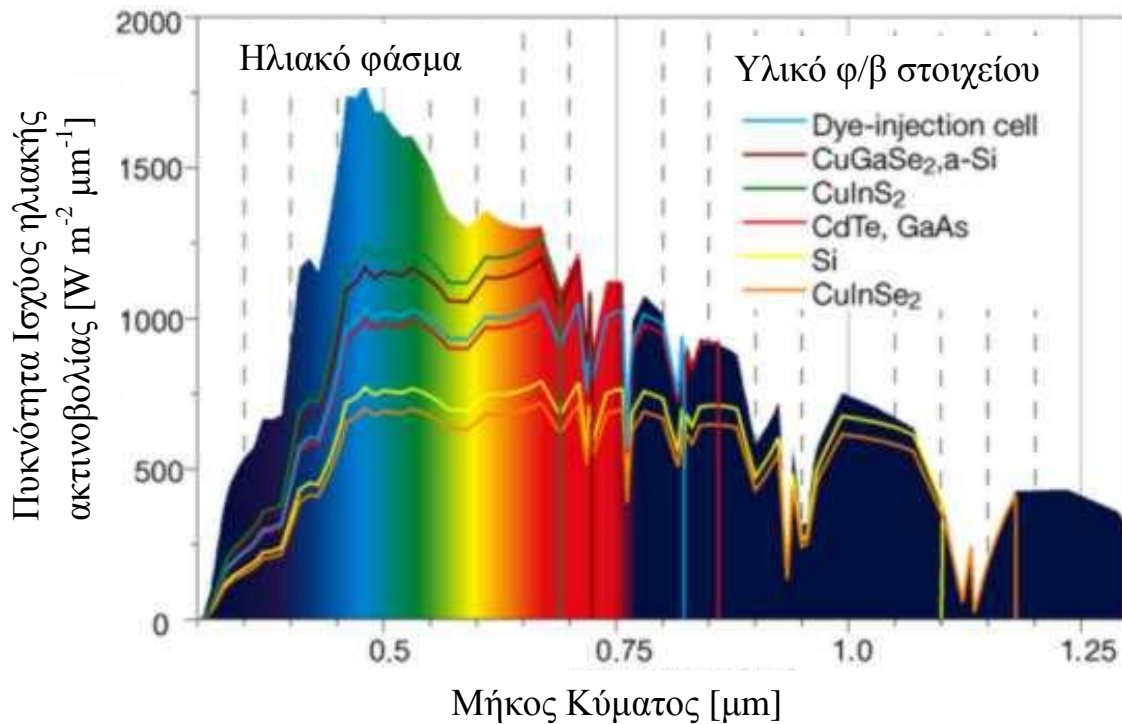
Πίνακας 1.1: Ενεργειακό χάσμα σε διάφορους ημιαγωγούς

Ημιαγωγό στοιχείο	Ενεργειακό χάσμα στους 300K (eV)
Si	1.12
Ge	0.67
Se	1.74
Te	0.32

Ουσιαστικά με ένα φ/β στοιχείο εκμεταλλευόμαστε την ιδιότητα που έχει ένα σύστημα από στρώσεις ημιαγωγού με διαφορετικές προσμίξεις να μετατρέπεται σε πηγή συνεχούς ρεύματος i όταν επ'αυτού προσπίπτει ένταση ηλιακής ακτινοβολίας I_T και όπου ισχύει η αναλογία ανάμεσα στο ρεύμα και την ένταση της ακτινοβολίας.

Δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλη τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φωτόνια πρέπει να έχουν ενέργεια $E=h\nu=hc/\lambda$, μεγαλύτερη από του ενεργειακού χάσματος W_g , δηλαδή τα

φωτόνια θα πρέπει να έχουν μήκος κύματος $\lambda \leq hc/W_g$. Κάποια υλικά αντιδρούν σε ευρύτερα φάσματα ακτινοβολίας από κάποια άλλα. Έτσι ανάλογα με το ημιαγώγιμο υλικό που χρησιμοποιείται υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης του ανάλογου ποσοστού ακτινοβολίας όπως φαίνεται στο Σχ.1.2.



Σχήμα 1.2: Φασματομετρική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας και η απορροφητικότητα κάποιων υλικών(Hahn and Meitner,2000).

Καθώς οι ηλιακές ακτίνες διατρέχουν τη γήινη ατμόσφαιρα, τα φωτόνια σκεδάζονται από υδρατμούς, σκόνη και διάφορα αιωρούμενα σωματίδια. Ένα μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς να αλλάξει κατεύθυνση και αποτελεί την άμεση ακτινοβολία I_b που φτάνει στο οριζόντιο επίπεδο ή μια κεκλιμένη επιφάνεια. Ένα άλλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει σε ένα σημείο της επιφάνειας της γης προερχόμενο από άλλη κατεύθυνση από αυτή της άμεσης και συνθέτει την διάχυτη ακτινοβολία I_d . Μια τρίτη συνιστώσα είναι αυτή που προέρχεται από την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από κοντινά αντικείμενα στο σημείο της μέτρησης (π.χ. νερό, χιόνι, πράσινο, κτήρια) και αποτελεί την ανακλώμενη συνιστώσα I_r .

Η συνολική ακτινοβολία του ήλιου που φθάνει στην γήινη ατμόσφαιρα ονομάζεται ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας (Extraterrestrial). Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας, I_{ext} κατά την ώρα h μιας μέρας n_j υπολογίζεται από την ακόλουθη εξ.(1.1):

$$I_{ext}(h; n_j) = I_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n_j}{365}\right) \right] [\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_s) + \sin(\delta)] \quad (1.1)$$

Όπου, ω_s η ωριαία γωνία και μετράται σε μοίρες, I_{sc} είναι η ηλιακή σταθερά, περίπου 1365 W/m^2 και n_j η μέρα του έτους με τιμές $[1,365]$, όπου 1 αναφέρεται στην 1 του Ιανουαρίου και 365 στις 31 Δεκέμβρη. (Karlanı and Karlanis,2012)

Έτσι σε κάθε σημείο της γης, και κατ'επέκταση σε κάθε φ/β στοιχείο φτάνουν τρεις συνιστώσες της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας: η άμεση I_b , η διάχυτη I_d και η ανακλώμενη I_r .

Η άμεση ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που φτάνει από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης χωρίς αλλαγή πορείας. Για τους διάφορους υπολογισμούς την αναλύουμε σε δύο συνιστώσες, μια κάθετη και μια παράλληλη στην επιφάνεια της γης. Η παράλληλη δεν επιδρά στην επιφάνεια της γης ή αντίστοιχα σε ένα φ/β στοιχείο με αποτέλεσμα να μην συνεισφέρει στην μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική.

Η διάχυτη είναι η ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση (λόγω σύννεφων ή άλλων σωματιδίων που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα). Το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης ακτινοβολίας και της ανακλώμενης είναι η ολική ακτινοβολία και δίδεται από την εξ.(1.2).

$$I_h = I_b + I_d + I_r \quad (1.2)$$

Η ολική ή/και διάχυτη ακτινοβολία μπορούν να μετρηθούν με το πυρανόμετρο, επιστημονικό όργανο το οποίο μετράει την ένταση της ακτινοβολίας (W/m^2). Είναι ακριβές και αξιόπιστο όργανο στην μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Με δύο πυρανόμετρα είναι δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας. Το πυρανόμετρο το οποίο μετράει τη διάχυτη ακτινοβολία θα πρέπει να έχει στεφάνι, το οποίο αποτρέπει τη πρόσπτωση της άμεσης ακτινοβολίας στο πυρανόμετρο. Το άλλο πυρανόμετρο το οποίο δεν φέρει στεφάνι μετράει την ολική ακτινοβολία. Η άμεση ακτινοβολία I_b προκύπτει αφαιρώντας τις δύο μετρήσεις.

Πυρανόμετρα με και χωρίς στεφάνι είναι αυτά που φαίνονται στην Εικ.1.1.

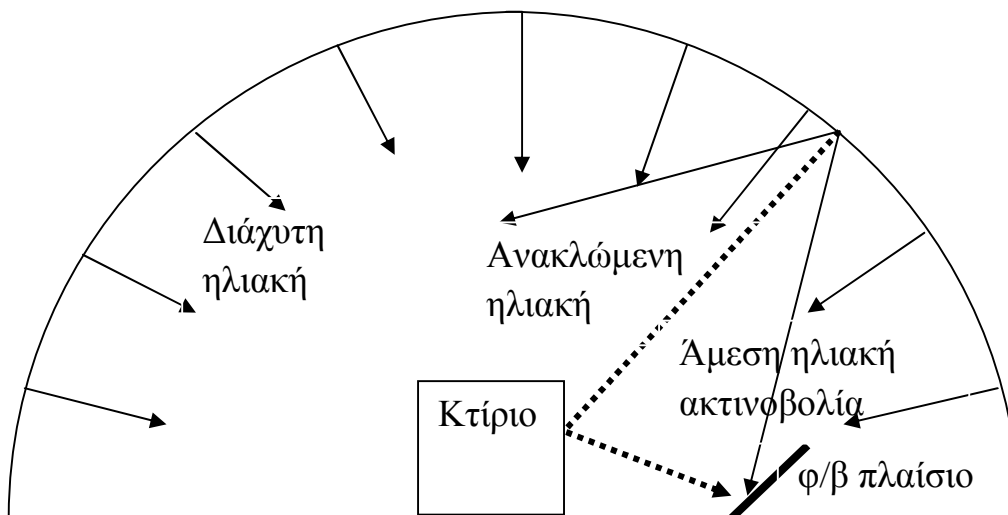


Εικόνα 1.1: Πυρανόμετρο με και χωρίς στεφάνι (εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας)

Η ακτινοβολία η οποία προέρχεται από την ανάκλαση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος ή από διάφορα αντικείμενα ονομάζεται ανακλώμενη. Ειδικά ενδιαφέρει το ποσοστό της ακτινοβολίας το οποίο τελικά φτάνει στη μελετώμενη επιφάνεια του φ/β υπό οποιοδήποτε προσανατολισμό. (Καπλάνης, 2004).

Όταν το φως προσπίπτει σε μία επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά, είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας.

Η άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία απεικονίζεται στο Σχ.1.3.

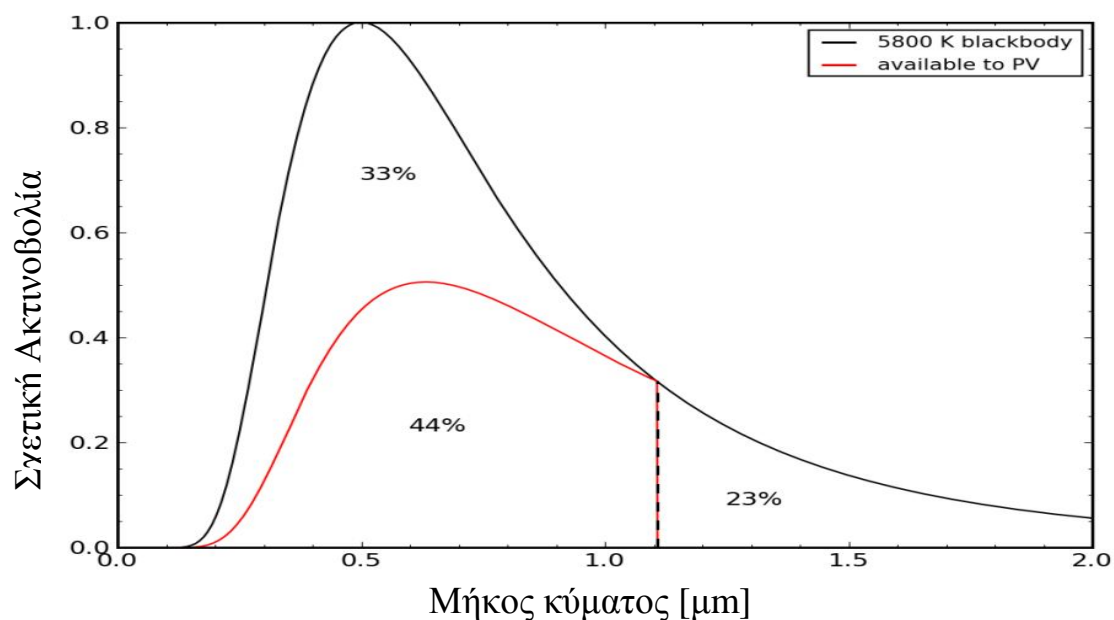


Σχήμα 1.3: Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία.

Όπως προαναφέρθηκε πολύ μικρό ποσοστό της απορροφημένης ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική από ένα φ/β-πλαίσιο. Το ποσοστό αυτό βέβαια μπορεί να λάβει τιμές και κάτω του 10% σε συνθήκες λειτουργίας του φ/β πλαισίου στο πεδίο. Η προσπάθεια των εμπειρογνομώνων είναι να σχεδιαστεί φ/β πλαίσιο το οποίο αποδίδει άνω του 20% σε συνθήκες λειτουργίας στο πεδίο. Το υπόλοιπο μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας, σε

θερμική, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία των φ/β στοιχείων. Επομένως κατά τη λειτουργία ενός φ/β συμπαράγονται ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.

Στο ηλιακό φάσμα το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια μικρότερο του 1.1eV είναι 26% του συνολικού πλήθους φωτονίων. Το μεγαλύτερο ποσοστό των χρήσιμων φωτονίων, έχουν ενέργεια μεγαλύτερη των 1.1eV. Η επιπλέον ενέργεια χάνεται, αφού δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που παράγονται από ένα φωτόνιο με ενέργεια 1.1eV και από ένα φωτόνιο με ενέργεια 2.5eV. Ουσιαστικά, μόνο το 44% είναι χρήσιμη ενέργεια, όπως βλέπουμε στο Σχ.1.4 που δείχνει το κρίσιμο μήκος των φωτονίων για το οποίο είναι δυνατόν να μεταφερθεί ενέργεια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Επίσης το φάσμα του φωτός το οποίο μπορεί να εκμεταλλευτεί ένα φ/β στοιχείο είναι 300-1200nm, χωρίς αυτό να ισχύει για όλα τα φ/β στοιχεία, κάποια αντιδρούν σε μεγαλύτερα φάσματα από κάποια άλλα.



Σχήμα 1.4: Σχετική ένταση της ακτινοβολίας σε σχέση με το μήκος του φάσματος. Με κόκκινη γραμμή η απορροφούμενη ακτινοβολία από το φ/β(Hahn and Meitner,2000).

Μοντέρνα συστήματα φωτοβολταϊκών-πλαισίων εκμεταλλεύονται αυτή τη θερμική ενέργεια με ένα εναλλάκτη θερμότητας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική απόδοση του πλαισίου σε 30%.

1.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Μέχρι στιγμής το πιο διαδεδομένο υλικό για την κατασκευή ηλιακών στοιχείων είναι το κρυσταλλικό πυρίτιο (συντομογραφία της ομάδας ως c-Si). Διακρίνονται κυρίως τρεις τύποι φ/β στοιχείων τα μονοκρυσταλλικά (sc-Si), τα πολυκρυσταλλικά (pc-Si) και του άμορφου (α-Si).

Δυο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό, τα οποία είναι τα πιο διαδεδομένα στην βιομηχανία φωτοβολταϊκών. Κατά τη μελέτη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η αξιολόγηση των ειδικών απαιτήσεων της εφαρμογής και λαμβάνεται μέριμνα για τη μη σκίαση τους, αλλά και για τη δυνατότητα να τοποθετηθούν σε συστήματα παρακολούθησης του ήλιου. Επίσης λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα, αφού επιλεγεί η τεχνολογία των φ/β για το προσδιορισμό της ισχύος αιχμής που θα πρέπει να αποδίδει η φ/β γεννήτρια για την κάλυψη των φορτίων.

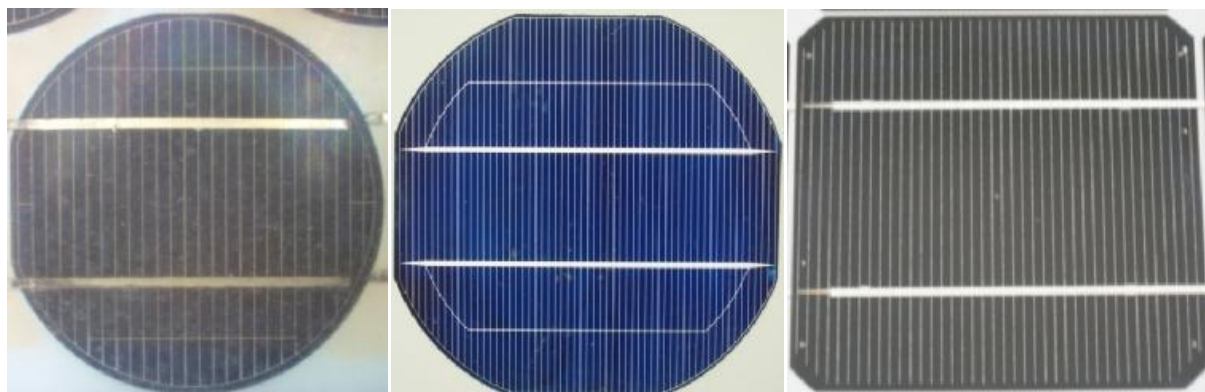
Ως απόδοση του φ/β στοιχείου n_c ορίζουμε το ηλίκο της μέγιστης ισχύος (P_m), που αποδίδει, προς την προσπίπτουσα ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας επί την επιφάνεια A_C του φ/β στοιχείου όπως φαίνεται και από την εξ.(1.2).

$$n_c = \frac{P_m}{A_c I_T} \quad (1.2)$$

Διακρίνουμε τους ακόλουθους τύπους φ/β στοιχείων με βάση το πυρίτιο:

1.2.1. Τύπος Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου, sc-Si

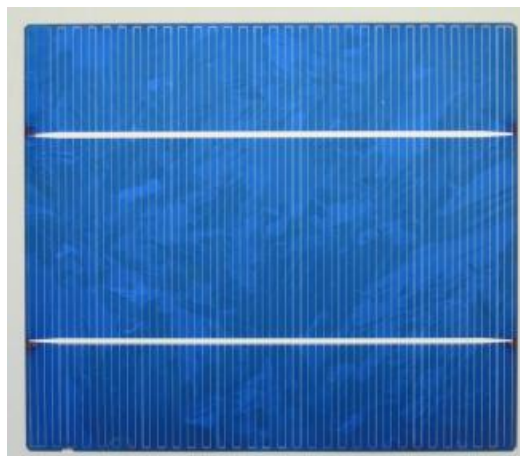
Τα φ/β πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν απόδοση μεταξύ 24.5% και 25.5% (Green et al, 2012). Τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία είναι ακριβά, λόγω της μεθόδου παραγωγής τους. Καθώς κόβονται από κυλινδρικές ράβδους, τα φ/β στοιχεία δεν είναι τετραγωνικής μορφής. Ως εκ τούτου, τα sc-Si πλαίσια έχουν ακάλυπτα κενά στις τέσσερις γωνίες των στοιχείων τους με αποτέλεσμα να υπάρχουν μέρη στην επιφάνεια των sc-Si φ/β πλαισίων χωρίς Si. Στην Εικ.1.2. παρουσιάζονται μονοκρυσταλλικά στοιχεία που δείχνουν την εξέλιξη της τεχνολογίας κατασκευής sc-Si στοιχείων, με τα αρχικά sc-Si στοιχεία να παρουσιάζουν σχεδόν κυκλική μορφή και τα τελευταία να εμφανίζονται με μια σχεδόν τετράγωνη μορφή.



Εικόνα 1.2: Μονοκρυσταλλικά στοιχεία νέες τεχνολογίες κατασκευής από αριστερά προς τα δεξιά (εργαστήριο Α.Π.Ε.).

1.2.2 Τύπος Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου, pc-Si

Παρουσιάζουν ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 19.9% έως 20.9%. (Green et al, 2012). Κατασκευάζονται από χυτά τετράγωνα καλούπια πυριτίου, αφού μεγάλες ποσότητες Si που έχει τακεί ψύχονται προσεκτικά και στερεοποιούνται. Η παραγωγή στοιχείων pc-Si είναι λιγότερο δαπανηρή από την παραγωγή μονοκρυσταλλικών φ/β στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου, αλλά έχουν μικρότερη απόδοση. Φ/β στοιχείο τύπο pc-Si φαίνεται στην Εικ. 1.3.

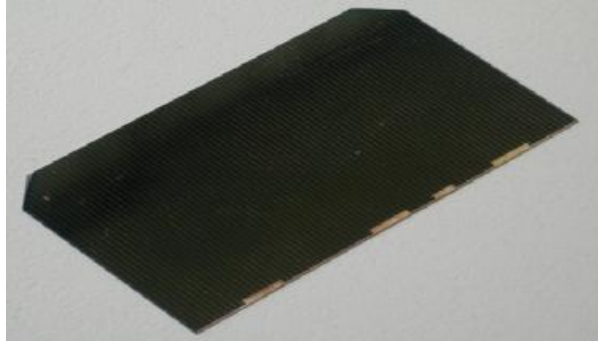


Εικόνα 1.3: Πολυκρυσταλλικό στοιχείο (εργαστήριο Α.Π.Ε, ΤΕΙ Πάτρας).

1.2.3 Τύπος φ/β στοιχείου Λεπτής Μεμβράνης (thin film)

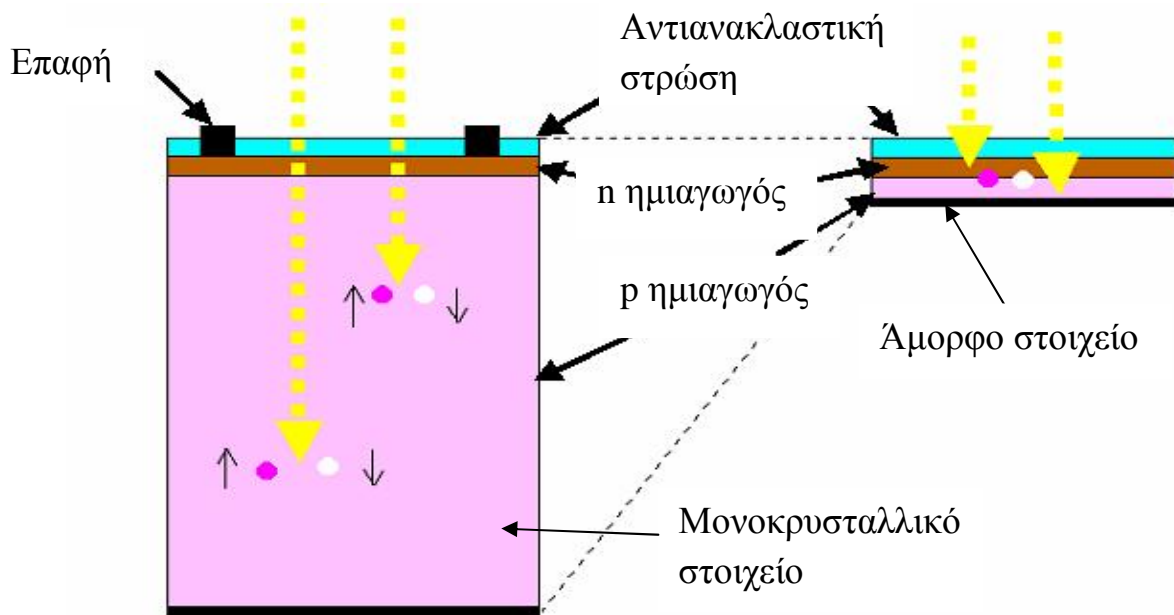
Το φ/β στοιχείο τύπου thin film κατασκευάζεται από απόθεση ενός ή περισσότερων λεπτών στρώσεων ημιαγωγίμου υλικού επί του υποστρώματος.

Το πάχος των στρώσεων ποικίλει από μερικά nm μέχρι μm . Τα στοιχεία αυτού του τύπου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το υλικό, όπως thin film a-Si με απόδοση 7% ,thin film χαλκοκυρίτη CIS και CIGS με απόδοση 9% με 10% (Stathatos,2012). Φ/β στοιχείο thin film φαίνεται στην Εικ.1.4.



Εικόνα 1.4: Thin film στοιχείο (εργαστήριο Α.Π.Ε ΤΕΙ Πάτρας).

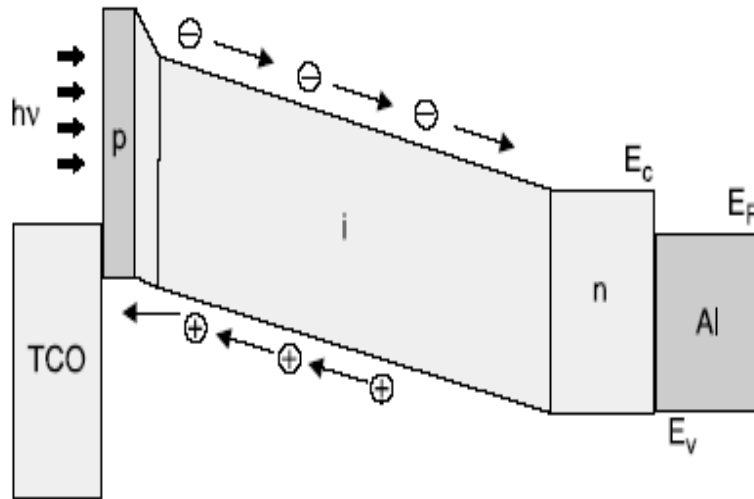
Το Σχ.1.5 δείχνει σε μεγέθυνση την μικροδομή στοιχείων a-Si που αποτελείται από την αντανακλαστική στρώση (AR), τον n ημιαγωγό πολύ μικρής στρώσης και τον τύπο p ημιαγωγό.



Σχήμα 1.5: Μικρόδομή μονοκρυσταλλικού και άμορφου στοιχείου κατά τη διάρκεια πρόσπτωσης ακτινοβολίας στη επιφάνειά του (Viteslav Benda,2012)

Το TCO (Transparent Conductive oxide) που φαίνεται στο Σχ.1.6 είναι υλικό το οποίο συμπεριφέρεται ως τζάμι που επιτρέπει να το διαπερνάει ηλιακή ακτινοβολία, και να είναι πλήρως αγωγίμο ώστε όλη η επιφάνεια να προσφέρεται για τη μετατροπή της ακτινοβολίας I_T σε ισχύ P , σε αντίθεση με τα

φ/β στοιχεία των Εικ.1.2 και Εικ.1.3 όπου είναι αναγκαία η αγωγή ηλεκτρικού φορτίου.



Σχήμα 1.6: Μικροδομή άμορφου στοιχείου κατά τη διάρκεια πρόσπτωσης ακτινοβολίας στην επιφάνειά του .(Vitezslav Benda,2012)

1.2.4. Άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών

Πέρα των παραπάνω υπάρχει και η οικογένεια των οργανικών φ/β στοιχείων με απόδοση 2.5%(πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι μπορεί να φτάσει τα 9.8%). Τα πολυμερή φ/β στοιχεία είναι ένας τύπος οργανικών φωτοβολταϊκών. Βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο. Λόγω των μηχανικών τους ιδιοτήτων τα οργανικά φ/β είναι εύκαμπτα. (Stathatos,2012).

Τελευταία η επιστημονική έρευνα επικεντρώνεται στα νανοκρυσταλλικά, τα οποία είναι βασισμένα σε νανοκρυστάλλους και ακόμα παρουσιάζουν απόδοση 7% (Stathatos,2012).

1.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΥΠΟΥ pc-Si ΚΑΙ sc-Si

Τα pc-Si και sc-Si είναι πλακίδια, τα οποία κατασκευάζονται με χρήση laser (laser cutting method) ή με κατεργασία χυτών ράβδων πυριτίου σε πολύ λεπτά τεμάχια ή πλακίδια . Τα πλακίδια αυτά είναι συνήθως θετικά φορτισμένα (p-type doped). Η διεργασία που ακολουθείται για να γίνει το πλακίδιο φ/β

στοιχείο, είναι η επιφανειακή διάχυση αρνητικών φορτισμένων προσμίξεων (n-type) στην εμπρόσθια πλευρά του πλακιδίου. Αυτή η διεργασία οδηγεί στη δημιουργία μιας διεπαφής p-n μερικές εκατοντάδες νανόμετρα κάτω από την επιφάνεια. Η επαφή p-n έχει πάχος μικρότερο των 0.5μm (0.2μm είναι μια επιθυμητή τιμή με τις υπάρχουσες τεχνολογίες) . Το πλακίδιο p-τύπου Si ονομάζεται wafer και φαίνεται στην Εικ. 1.5.



Εικόνα 1.5: Silicon Wafer (εργαστήριο Α.Π.Ε, ΤΕΙ Πάτρας).

Στη συνέχεια εφαρμόζονται διπλές αντανakλαστικές επιστρώσεις (AR), ώστε να αυξηθεί η ποσότητα του φωτός που φτάνει στο φ/β στοιχείο. Το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) έχει αντικατασταθεί ως υλικό για αντανakλαστική επιφάνεια από το νιτρίδιο του πυριτίου, λόγω της εξαιρετικής του ικανότητας παθητικοποίησης της επιφάνειάς του. Στον Πίν. 1.2 καταγράφονται κάποια υλικά με τους δείκτες ανακλαστικότητάς τους. Παθητικοποίηση είναι η χημική οξείδωση μετάλλων και η οποία αυξάνει την αντίσταση στη διάβρωση, με αποτέλεσμα να αποτρέπει την επανασύνδεση φορέα e^- και οπών στην επιφάνεια του φ/β στοιχείου. Εφαρμόζεται συνήθως σε ένα στρώμα πάχους αρκετών εκατοντάδων νανομέτρων, χρησιμοποιώντας χημική εναπόθεση ατμών ενισχυμένη με πλάσμα. Μερικά φ/β στοιχεία έχουν ανάγλυφες τις επιφάνειές τους ώστε να αυξήσουν την ηλιακή ακτινοβολία στο στοιχείο. Οι εν λόγω επιφάνειες μπορούν συνήθως να σχηματίσουν μονοκρυσταλλικά στοιχεία, αν και τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και οι μέθοδοι για τις πολυκρυσταλλικές.

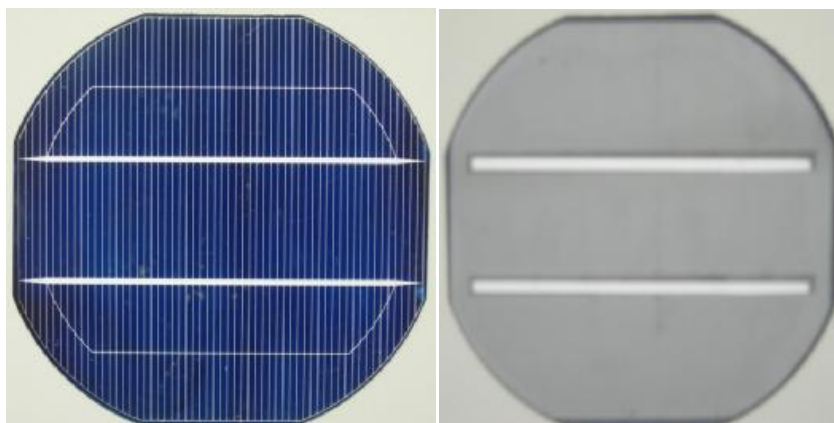
Οι ανακλαστικές επιφάνειες χαρακτηρίζονται από τον αντίστοιχο συντελεστή ανακλαστικότητας r , ο οποίος είναι μοναδικός για κάθε υλικό. Ο συντελεστής ανακλαστικότητας επηρεάζεται από τον συντελεστή διάθλασης n σύμφωνα με την εξ.(1.3). Ορισμένοι δείκτες διάθλασης δίδονται στον Πίν.1.2.

$$r = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (1.3)$$

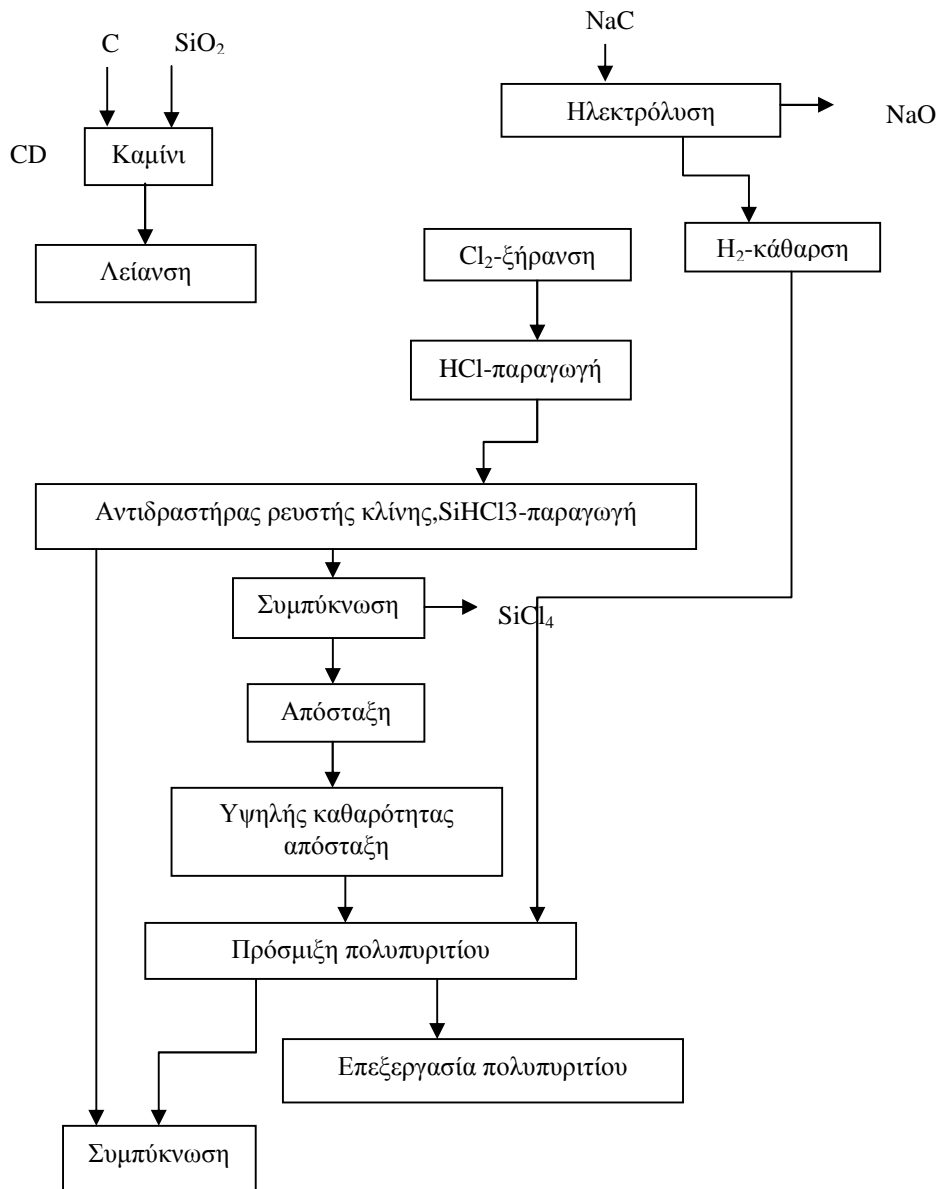
Πίνακας 1.2 Δείκτες διάθλασης διαφόρων υλικών (Hu and White,1983)

Υλικό	Δείκτες διάθλασης
Al ₂ O ₃	1.77
Glasses	1.5-1.7
MgO	1.74
SiO	1.5-1.6
SiO ₂	1.46
Ta ₂ O ₅	2.2
TiO ₂	2.5-2.6

Το πλακίδιο έχουν μεταλλικές επαφές τυπωμένες στην εμπρόσθια επιφάνεια με ασημί κόλλα. Η πίσω επιφάνεια σχηματίζεται επίσης εκτυπώνοντας μια μεταλλική κόλλα λεπτές λωρίδες, bus bar πάνω στην επιφάνεια. Συνήθως αυτή η επαφή καλύπτει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια. Η κόλλα στη συνέχεια πυρώνεται σε αρκετές μονάδες βαθμού κελσίου ώστε να σχηματισθούν ηλεκτρόδια στην ωμική επαφή με το πυρίτιο. Κάποιες εταιρείες χρησιμοποιούν βήμα ηλεκτροεπικάλυψης για την αύξηση της απόδοσης του στοιχείου. Στην Εικ.1.6 παρουσιάζεται ένα φ/β στοιχείο με τις επαφές στην εμπροσθη επιφάνειά του και με τη λεπτή λωρίδα στην πίσω επιφάνεια. Στο Σχ.1.7 παρουσιάζεται η προετοιμασία του ημιαγώγιμου πυριτίου



Εικόνα 1.6: Εμπρόσθια και πίσω επιφάνεια φ/β στοιχείου



Σχήμα 1.7: Προεπεξεργασία πυριτίου για την κατασκευή φ/β στοιχείων(Benda,2012).

Αφού τυπωθούν οι μεταλλικές επαφές, τα φ/β στοιχεία συνδέονται με αγώγιμο υλικό τύπου μεταλλικής κορδέλας, και συναρμολογούνται σε φ/β πλαίσια. Τα φ/β πλαίσια προστατεύονται από μια γυάλινη επιφάνεια και το πίσω μέρος τους προστατεύεται από ένα πολυμερές υλικό, το Tedlar.

Στην Εικ.1.7 απεικονίζονται διάφορα στάδια παραγωγής φ/β πλαισίων.



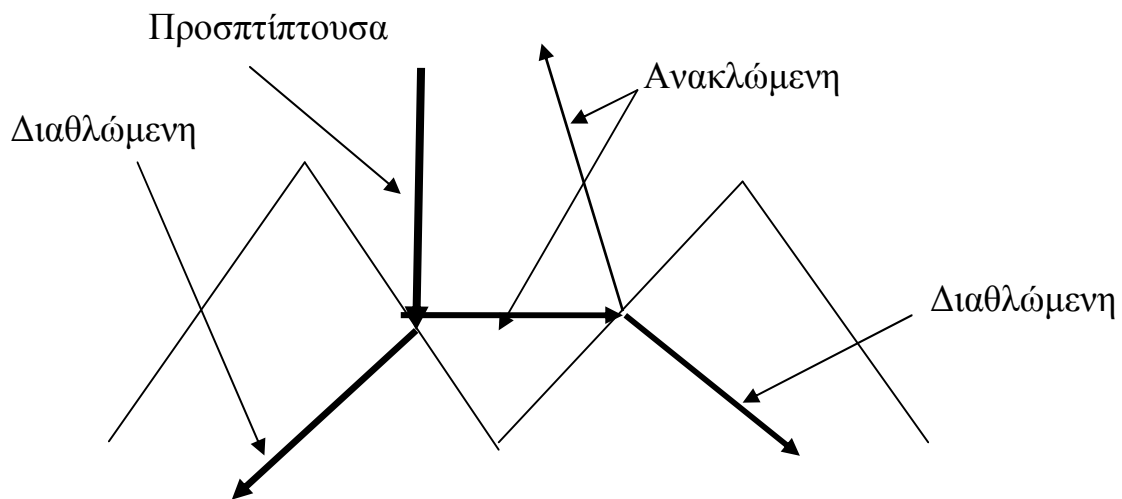
Εικόνα 1.7: Εικόνες κατά την παραγωγή φ/β πλαισίων (Aleo,2012)

1.4 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ /ΦΒ ΛΟΓΩ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η υψηλής ποιότητας κατασκευή ενός φ/β στοιχείου έχει μεγάλη σημασία καθώς λάθη ή κατασκευαστικές ατέλειες μπορούν να οδηγήσουν σε ενεργειακές απώλειες. Τις απώλειες μπορούμε να τις χωρίσουμε σε τρεις κατηγορίες: τις οπτικές, τις ηλεκτρικές και τις απώλειες λόγω επανασύνδεσης e^- και οπών ή ατέλειες λόγω δημιουργίας υψηλά αγώγιμων διαδρόμων εντός ή εκτός του ημιαγωγού.

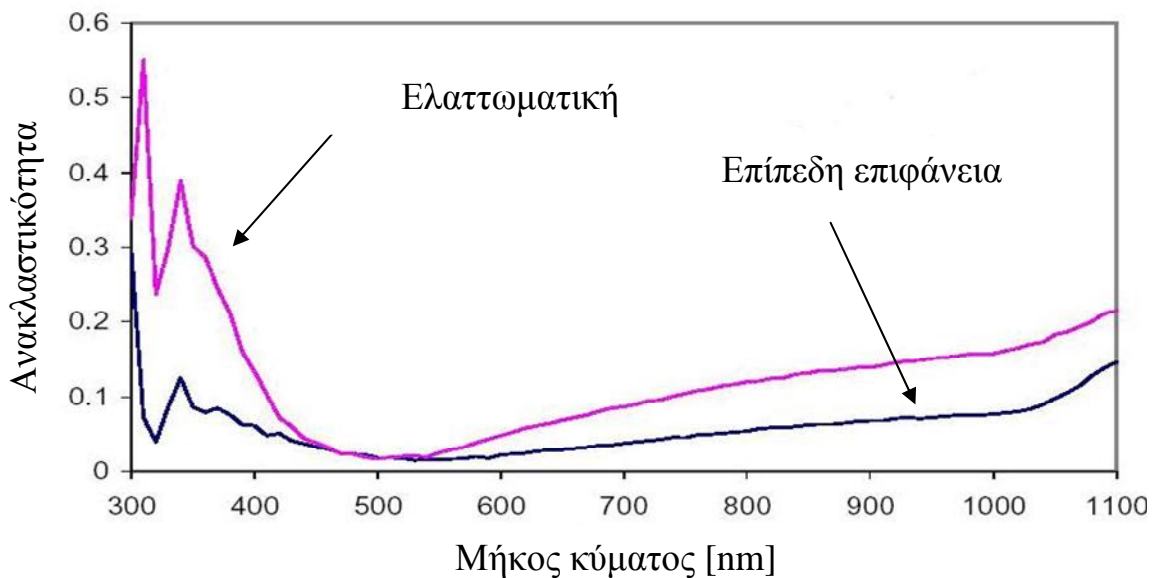
1.4.1. Οπτικές απώλειες

Μπορούν να προκληθούν λόγω ατελειών στην γυμνή επιφάνεια του φ/β στοιχείου. Αν για παράδειγμα η επιφάνεια έχει μορφή πυραμίδας μειώνεται η ανακλαστικότητα της επιφάνειας στο 1/3 της επίπεδης (Benda, 2000). Μια τέτοια επιφάνεια απεικονίζεται το Σχ. 1.8.



Σχήμα 1.8: Επιφάνεια στοιχείου με μορφή πυραμίδας (Benda, 2000).

Όπως προαναφέρθηκε προστίθεται για αυτό το λόγο αντανακλαστικό επίστρωμα ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω ανακλαστικότητας. Στο διάγραμμα του Σχ.1.9 φαίνεται η ανακλαστικότητα μιας επίπεδης επιφάνειας σε σχέση με μία με ατέλειες.

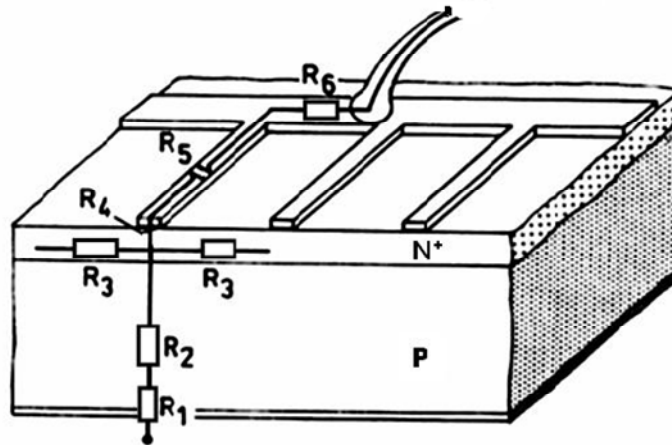


Σχήμα 1.9: Ανακλαστικότητα σε σχέση με το φάσμα του φωτός

Τέλος υπάρχουν και οι οπτικές απώλειες λόγω γήρανσης όπως παρουσιάζεται στις εργασίες (Karlanis and Karlani, 2012; Karlani, 2012).

1.4.2. Ηλεκτρικές απώλειες

Οι ηλεκτρικές απώλειες επηρεάζονται κυρίως από της εν σειρά αντίσταση R_s , η οποία αποτελείται από τις εξής επί μέρους αντιστάσεις (Σχ. 1.10):



Σχήμα 1.10: Στοιχείο με τις επί μέρους αντιστάσεις εν σειρά. (Vitezslav Benda,2012)

R_1 - επαφή μετάλλου-ημιαγωγού στο πίσω μέρος της επιφάνειας.

R_2 - λόγω του υλικού του ημιαγωγού.

R_3 - η αντίσταση μεταξύ 2 επαφών δαχτύλων του πλέγματος

R_4 -η αντίσταση της επαφής μετάλλου-ημιαγωγού στα δάχτυλα του πλέγματος

R_5 - η αντίσταση των δάχτυλων του πλέγματος

R_6 - η αντίσταση της λωρίδας συλλογής (bus bar)

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει τις ηλεκτρικές απώλειες ενός φ/β στοιχείου είναι η μείωση της εν παραλλήλω αντίστασης R_{sh} η οποία οφείλεται κυρίως στη γήρανση των φ/β στοιχείων.

Η αιτία της μείωσής της είναι το γεγονός ότι λόγω της γήρανσης, τα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων που δημιουργούνται κατά το φ/β φαινόμενο δεν αποδίδουν ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό οφείλεται στη συνεχή λειτουργία των φ/β καθώς και στις μηχανικές και ηλεκτρικές ισχυρές τάσεις που μπορεί να έχει δεχτεί το φ/β στοιχείο, με επιβλαβείς επιπτώσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου και

στην κυκλοφορία του ρεύματος ανάμεσα στους ημιαγωγούς και το πλαίσιο. (Kaplani and Kaplani,2011)

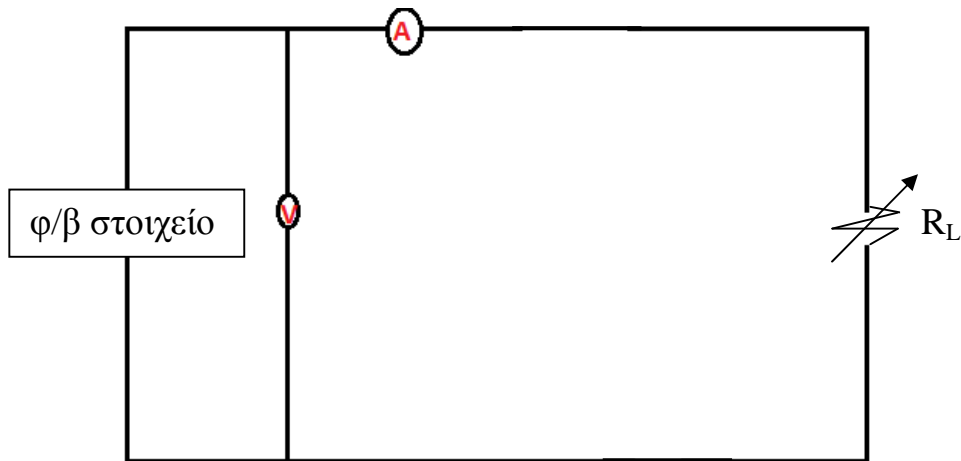
2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΝΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΙ Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΛΟΙΠΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το κάθε φ/β στοιχείο έχει ορισμένες ηλεκτρικές παραμέτρους, όπως ρεύμα βραχυκύκλωσης i_{sc} , τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} , συντελεστής πλήρωσης FF, οι οποίες εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά τους στοιχεία, τον τύπο των φωτοβολταϊκών αυτών στοιχείων καθώς και από τις συνθήκες λειτουργίας τους. Οι παραπάνω μεταβλητές πρέπει να είναι γνωστές για το κάθε φ/βστοιχείο ώστε να γνωρίζουμε ποιο είναι το στοιχείο που θα μας καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις και πως οι διάφορες συνθήκες λειτουργίες επηρεάζουν αυτές τις μεταβλητές ή παραμέτρους.

Στο Κεφάλαιο αυτό αναλύεται η χαρακτηριστική καμπύλη ενός φ/β στοιχείου. Θεωρείται ως η καμπύλη που παριστά την ένταση του ρεύματος i , που δίνει το φ/β στοιχείο, συναρτήσει της τάσης V στα άκρα του φορτίου με το οποίο είναι συνδεδεμένο. Με βάση την καμπύλη αυτή μπορεί να προσδιοριστούν σημαντικές ηλεκτρικοί παράμετροι για το στοιχείο, όπως το ρεύμα βραχυκύκλωσης i_{sc} και η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} .

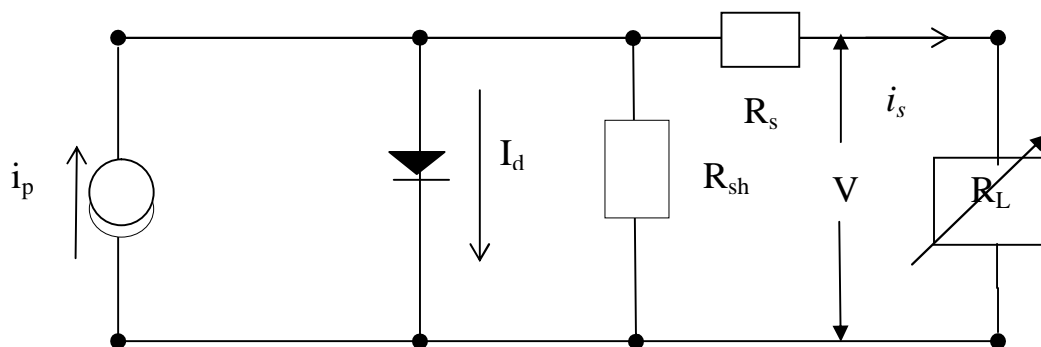
2.1ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΝΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Μια απλή μέθοδος για να χαράξουμε μια χαρακτηριστική I-V καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η ακόλουθη: συνδέουμε με μεταβλητό ηλεκτρικό φορτίο, R_L τα άκρα του στοιχείου, όπως βλέπουμε στο Σχ. 2.1. Στο κύκλωμα συνδέουμε ένα αμπερόμετρο εν σειρά και ένα βολτόμετρο στα άκρα του στοιχείου.



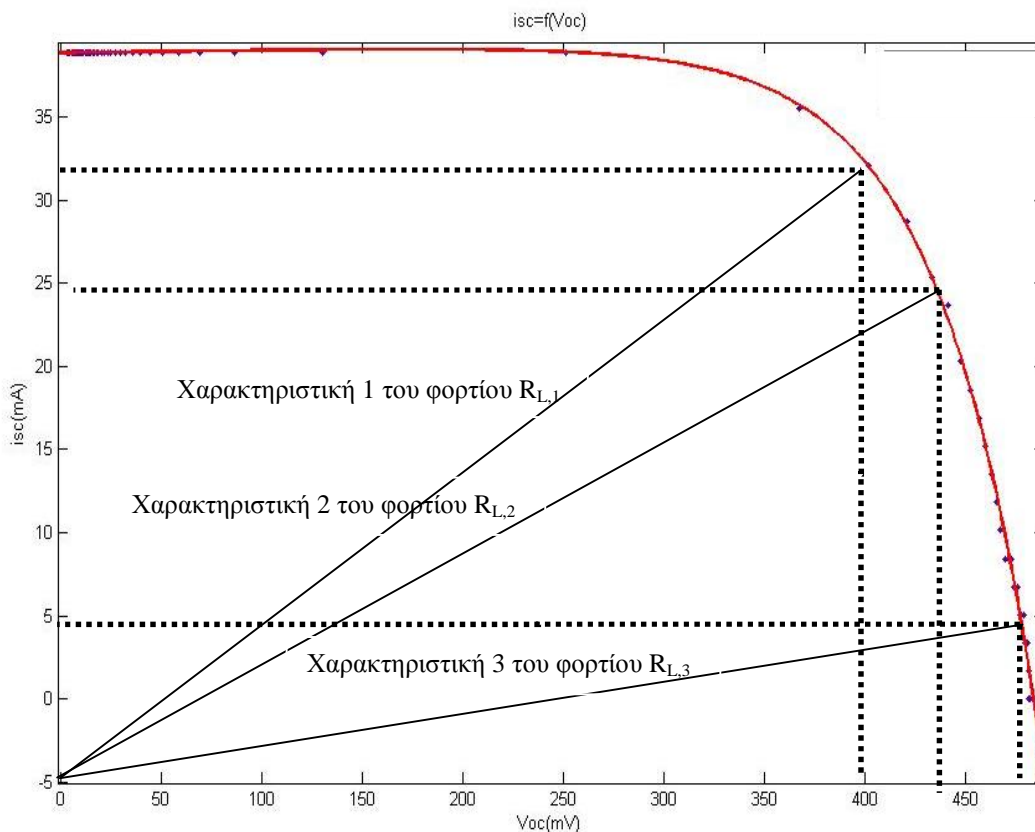
Σχήμα 2.1: Κύκλωμα στοιχείου συνδεδεμένο με εξωτερικό φορτίο

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του στοιχείου το οποίο είναι συνδεδεμένο με το φορτίο ονομάζεται κύκλωμα μίας διόδου και απεικονίζεται στο Σχ. 2.2.



Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα μίας διόδου συνδεδεμένο με φορτίο R_L

Για κάθε τιμή αντίστασης φορτίου R_L , στο φορτίο μεταφέρεται ισχύς από το στοιχείο, η οποία είναι το γινόμενο των αντίστοιχων ζευγών ρεύματος (i) και τάσης (V). Όταν η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη- άπειρη, τότε το κύκλωμα βρίσκεται σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος (open circuit). Σε αυτή τη περίπτωση το ρεύμα είναι 0 ($i=0$), ενώ η τάση V , η οποία σε αυτές τις συνθήκες χαρακτηρίζεται ως V_{oc} , παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Αντίθετα, όταν η R_L είναι πολύ μικρή, ή τείνει στο μηδέν, τότε παρουσιάζονται συνθήκες βραχυκυκλώματος (short circuit). Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος μηδενίζεται η τάση και το ρεύμα $i=i_{sc}$ παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του. Στο Σχ.2.3 φαίνεται η καμπύλη $I-V$ για διάφορες τιμές φορτίου.

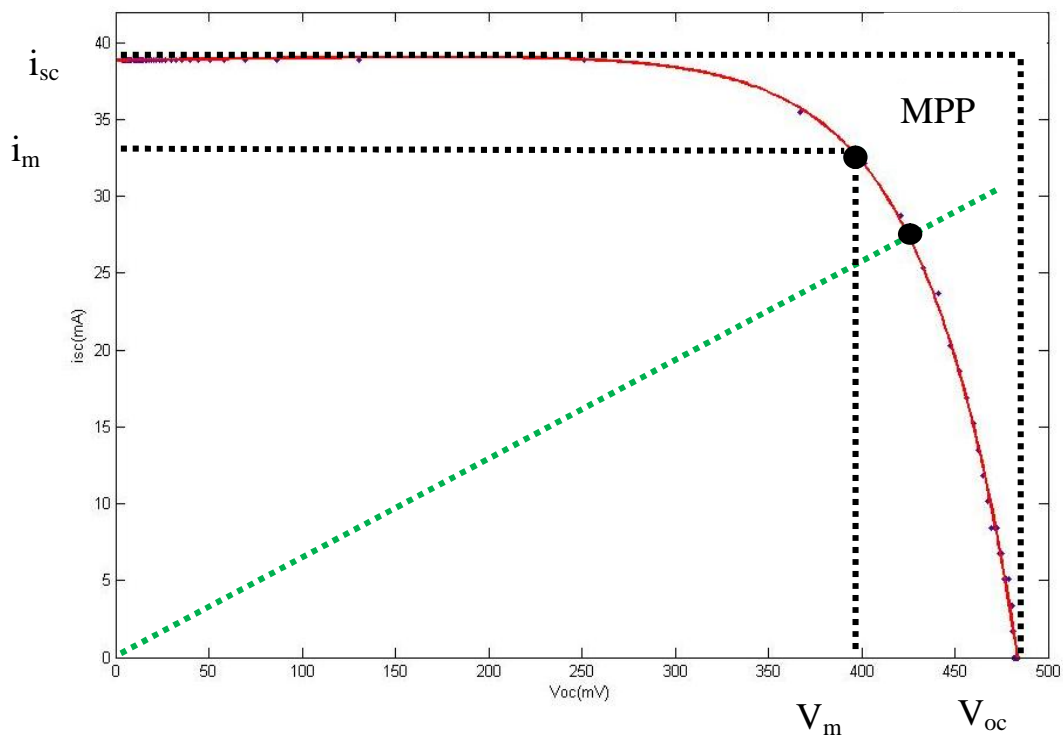


Σχήμα 2.3:Μετρήσεις τάσης και έντασης ρεύματος για διάφορα ζευγάρια τιμών και χάραξη χαρακτηριστικής I-V καμπύλης.

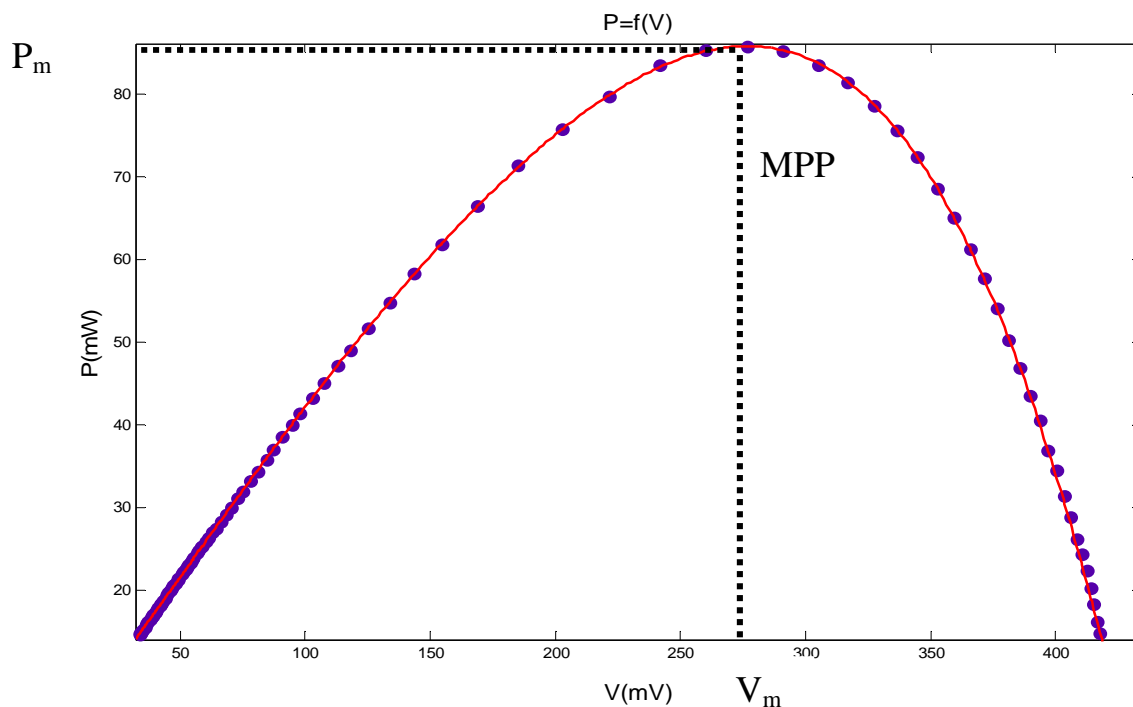
Από τα ζεύγη τιμών (i, V) που προκύπτουν για διάφορες τιμές φορτίου R_L προκύπτει το διάγραμμα χαρακτηριστικής καμπύλης I-V όπως του Σχ.2.4.

Η μέγιστη τιμή της ισχύος, P_m , που έχει τη δυνατότητα να αποδώσει το φ/β στοιχείο σε ένα φορτίο R_L , επιτυγχάνεται για συγκεκριμένη τιμή του R_L και για την οποία το στοιχείο λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύς του: Maximum Power Point (MPP) όπως φαίνεται στα Σχ.2.4 και Σχ.2.5. Γραφικά, το σημείο μέγιστης ισχύς αντιστοιχεί στο σημείο στο οποίο η κλίση dI/dV έχει τη μέγιστη μεταβολή.

Το MPP εξαρτάται από τη χαρακτηριστική καμπύλη I-V, την ένταση της ακτινοβολίας I_T , τη θερμοκρασία. Στο Σχ.2.4 παρουσιάζεται με πράσινη διακεκομμένη γραμμή η χαρακτηριστική ενός φορτίου. Η τομή της καμπύλης με αυτή τη γραμμή δίνει το σημείο λειτουργίας του φορτίου. Λόγω του μετατοπισμένου σημείου λειτουργίας σε σχέση με το MPP το σύστημα δεν μπορεί να λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση. Συστήματα ηλεκτρονικής παρακολούθησης MPP είναι αναγκαίο να ενσωματώνονται στο ηλεκτρικό σύστημα μιας φ/β γεννήτριας ώστε να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό τις δυνατότητες ενός φ/β συστήματος.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και χαρακτηριστική του φορτίου. Η τομή τους δίνει το σημείο λειτουργίας του φορτίου.



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ισχύος συναρτήσει της τάσης φ/β στοιχείου

Καθώς η θέση του ήλιου (το ύψος του) και η αζιμουθιακή γωνία του μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας, ένα πλαίσιο με σταθερή κλίση δεν

θα μπορεί να αποδίδει τη μέγιστη ισχύ για κάθε ύψος ηλίου καθώς η ακτινοβολία του ήλιου δεν θα προσπίπτει συνεχώς κάθετα στο φ/β-πλαίσιο.

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m = i_m * V_m$ προς το γινόμενο της έντασης ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος $i_{sc} * V_{oc}$ ενός φ/β στοιχείου ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF(Fill Factor) όπως δίνεται στην εξ.(2.1).

$$FF = \frac{i_m * V_m}{i_{sc} * V_{oc}} \quad (2.1)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης είναι ο λόγος του μεγίστου εμβαδού του ορθογωνίου που είναι εγγεγραμμένο στην χαρακτηριστική (i,V) του φ/β-στοιχείου, σε σχέση με το ορθογώνιο $i_{sc} * V_{oc}$ που αντιπροσωπεύει μια μέγιστη ισχύ η οποία είναι αδύνατο να αποδοθεί στο φορτίο R_L , καθώς δεν αποδίδεται ισχύς με ανοικτό κύκλωμα, ούτε επίσης με βραχυκύκλωμα, όπως φαίνεται στο Σχ.2.4. Οι συνήθεις τιμές του FF κυμαίνονται στην περιοχή 0,5-0,8 και εξαρτώνται κυρίως από την τεχνική κατασκευής των φ/β-στοιχείων και την τιμή W_g του ημιαγωγού. Σημαντικός παράγοντας μεταβολής του συντελεστή πλήρωσης είναι επίσης η γήρανση του φ/β στοιχείου, η οποία μειώνει σημαντικά τον συντελεστή FF (Kaplani and Kaplanis, 2012).

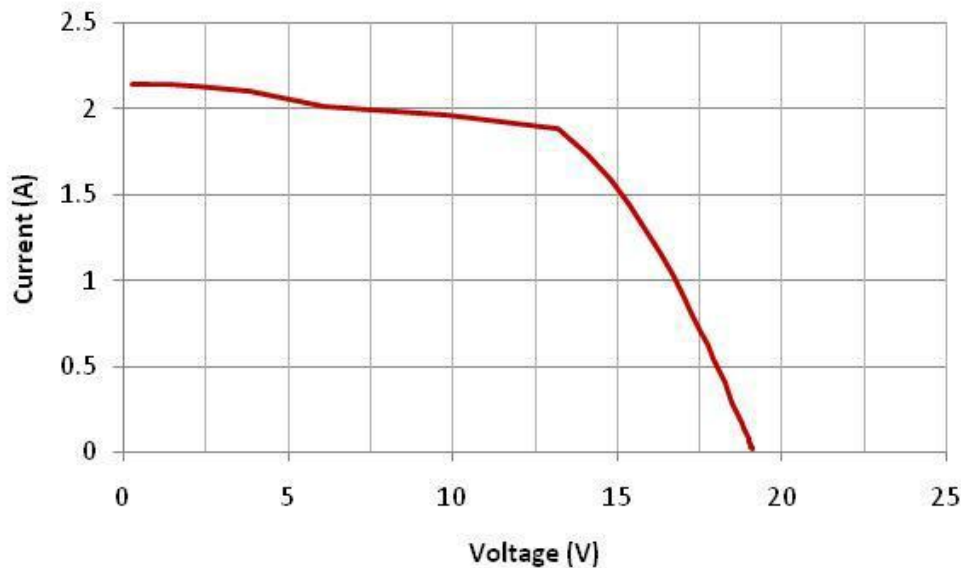
Ουσιαστικά ο συντελεστής πλήρωσης δείχνει μία σχέση, της οποίας η τιμή είναι αντιστρόφως ανάλογη με τις παρασιτικές απώλειες που έχει το φ/β στοιχείο, απώλειες που οφείλονται κυρίως στις αντιστάσεις R_s και R_{sh} του φ/β στοιχείου, οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια.

Ένα φ/β στοιχείο αποδίδει μέγιστη ηλεκτρική ισχύ P_m για συνεχόμενη και σταθερή προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία I_T . Το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας ανά τετραγωνική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού, ονομάζεται βαθμός απόδοσης η_c του φωτοβολταϊκού στοιχείου όπως δίνεται στην εξ.(2.2).

$$\eta_c = \frac{P_m}{A_c I_T} = \frac{i_m V_m}{A_c I_T} = \frac{i_{sc} V_{oc} FF}{A_c I_T} \quad (2.2)$$

Όπου, A_c είναι η επιφάνεια του φ/β στοιχείου.

Σημαντική επίδραση στις ηλεκτρικές παραμέτρους έχει και η επίδραση της γήρανσης (ageing) ενός στοιχείου. Στο Σχ.2.6 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική καμπύλη ενός φ/β πλαισίου με 18 χρόνια λειτουργίας. Είναι ευδιάκριτη η μεταβολή του συντελεστή FF, κάτι που υποδεικνύει ότι έχουν μεταβληθεί και οι υπόλοιπες ηλεκτρικοί παράμετροι που αναφέρονται στην εξ.(2.2).



Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V φ/β πλαισίου με σημάδια γήρανσης (Kaplani, 2012).

Όλες οι παραπάνω ηλεκτρικές παράμετροι, οι οποίες χαρακτηρίζουν την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου έχει συμφωνηθεί να γίνονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες δοκιμών, για λόγους συγκρισιμότητας των ηλεκτρικών παραμέτρων. Οι τυπικές αυτές συνθήκες δοκιμών-πιστοποίησης και λειτουργίας φ/β στοιχείων είναι:

Οι κανονικές συνθήκες (S.T.C.: Standard Test Conditions) υπό τις οποίες γίνονται οι δοκιμές-μετρήσεις των ανωτέρω μεγεθών και είναι οι εξής:

- a) Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουσας στα φ/β-πλαίσια 10^3W/m^2 .
- b) Θερμοκρασία φ/β πλαισίου, $T_c=25^\circ\text{C}$.
- c) Φάσμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας: A.M.=1.5, όπου A.M. είναι η αέριος μάζα, η οποία ορίζεται ως το πηλίκο του οπτικού πάχους της ατμόσφαιρας δια μέσου της οποία περνά η άμεση ακτινοβολία, προς το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ (Καπλάνης, 2004).

Τυπικές συνθήκες λειτουργίας φ/β πλαισίων, Standard Operating Conditions (SOC).

Οι ακόλουθες συνθήκες έχουν προταθεί για τον προσδιορισμό της ισχύος αιχμής, ώστε αυτές να προσεγγίζουν περισσότερο μια πραγματική κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή η τιμή P_m που θα προκύπτει από τις συνθήκες αυτές να προσεγγίζει αυτήν που θα αποδίδει το φ/β σύστημα στο πεδίο εφαρμογής:

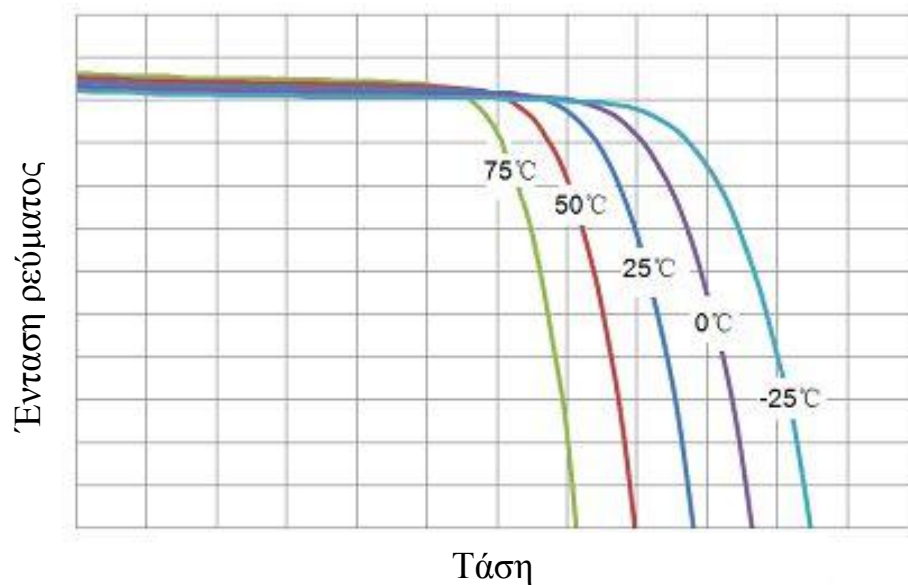
- a) Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας 800W/m^2 .
- b) Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_a=20^\circ\text{C}$.
- c) Ταχύτητα ανέμου: $v=1 \text{m/sec}$
- d) Προσανατολισμός προς Νότο και μετρήσεις κατά το ηλιακό μεσημέρι
- e) Μετρήσεις θερμοκρασίας υπό συνθήκες ανοικτού κυκλώματος.

Η ονομαστική τιμή θερμοκρασίας φ/β στοιχείου υπό συνθήκες SOC ονομάζεται Nominal Operating Cell Temperature (NOCT). Συνήθως η NOCT είναι μια θερμοκρασία κατά 20-40°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ένα φ/β πλαίσιο δεν αποδίδει καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας τη μέγιστη ονομαστική ισχύ. Για αυτό το λόγο ορίζουμε ένα συντελεστή PSH: Peak Solar Hour ή ισοδύναμος Αριθμός Ωρών Ηλιοφάνειας ως ένα αριθμό που εκφράζεται σε ώρες/ημέρα και αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια πρόσπτωσης ακτινοβολίας στο φ/β-πλαίσιο έντασης $I_T=1000\text{W/m}^2$ η οποία θα παρήγαγε το ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή θα έδινε ποσό ηλεκτρικής ενέργειας στο φορτίο R_L , ίσο με αυτό που δίνει το φ/β πλαίσιο για την πραγματική χρονική κατανομή της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό. (Σ.Ν. Καπλάνης,2004)

2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Το φ/β στοιχείο είναι μια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, για σταθερά προσπίπτουσα ακτινοβολία, όπως φαίνεται από Σχ.2.7.



Σχήμα 2.7: Επίδραση της θερμοκρασίας στην χαρακτηριστική I-V sc-Si φ/β πλαίσιο LM5M96 της Luma Solar.

Το παραπάνω διάγραμμα μας δίνει μια χαρακτηριστική I-V για διάφορες θερμοκρασίες του φ/β στοιχείου. Παρατηρούμε λοιπόν ότι με την αύξηση θερμοκρασίας υπάρχει μια πολύ μικρή αύξηση της έντασης του ρεύματος. Αντίθετα παρατηρούμε σημαντική μείωση της τάσης η οποία υπολογίζεται με τη εξ.(2.3).

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = -2.1 \text{ έως } 2.3 \frac{mV}{^{\circ}C} \quad (2.3)$$

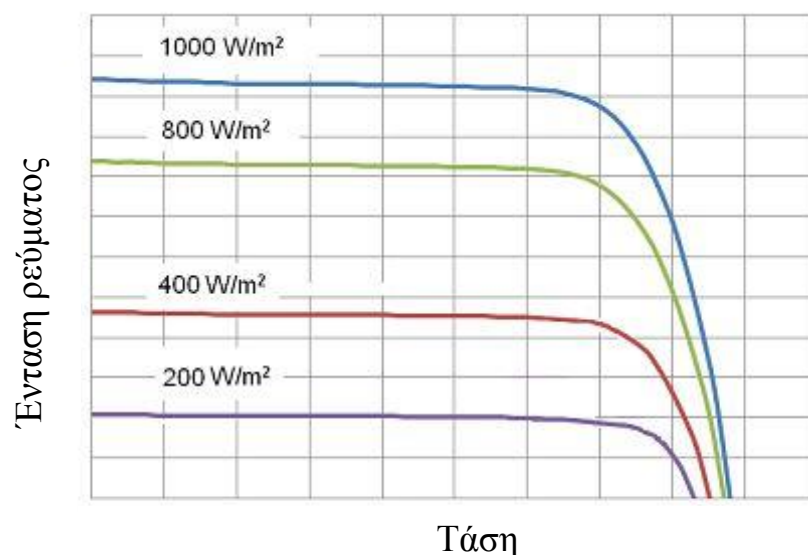
Όπου dV_{oc} η διαφορά της τάσης ανοικτού κυκλώματος σε ένα σύστημα αναφοράς με θερμοκρασία στοιχείου $T_{c,o}$ και της τάσης που μετρήθηκε για θερμοκρασία στοιχείου T_c . Αυτή η συμπεριφορά των φ/β στοιχείων οδήγησε στην εύρεση συντελεστών μεταβολής των χαρακτηριστικών τιμών τους σε σχέση με τη θερμοκρασία (temperature coefficient).

Η αναγόμενη σε συνθήκες αναφοράς τάση υπολογίζεται σύμφωνα με τη εξ.(2.4).

$$V_o = V + 2.2(T_c - T_{c,o}) \quad (2.4)$$

όπου T_o η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου σε συνθήκες αναφοράς και T_c η μετρούμενη θερμοκρασία του στοιχείου.

Εξίσου σημαντική είναι η επίδραση της έντασης της ακτινοβολίας, I_T , στα χαρακτηριστικά των φ/β στοιχείων, όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Σχ.2.8.



Σχήμα 2.8: Επίδραση της ακτινοβολίας στην χαρακτηριστική I-V sc-Si φ/β πλαίσιο LM5M96 της Luma Solar.)

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να βγάλουμε δύο συμπεράσματα. Πρώτον το ρεύμα μεταβάλλεται αναλογικά με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Δεύτερον η τάση μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ($dV_{oc}/dT_c < 0$) και ανάλογα με το λογάριθμο της έντασης της ακτινοβολίας I_T ($m k T_c \ln(C)/q > 0$), όπου m ο συντελεστής ιδεατότητας, k η σταθερά Boltzmann, T_c η θερμοκρασία, $C = I_T/1000$ και q το φορτίο ηλεκτρονίου.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι η απόδοση του φ/β στοιχείου αυξάνεται με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας για σταθερή θερμοκρασία και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας για σταθερή ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Το ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με τις διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας σύμφωνα με την εξ.(2.5).

$$i_{sc} = i_{sc,o} [1 + h_T (T_c - T_{c,o})] \cdot I_T / I_{T,o} \quad (2.5)$$

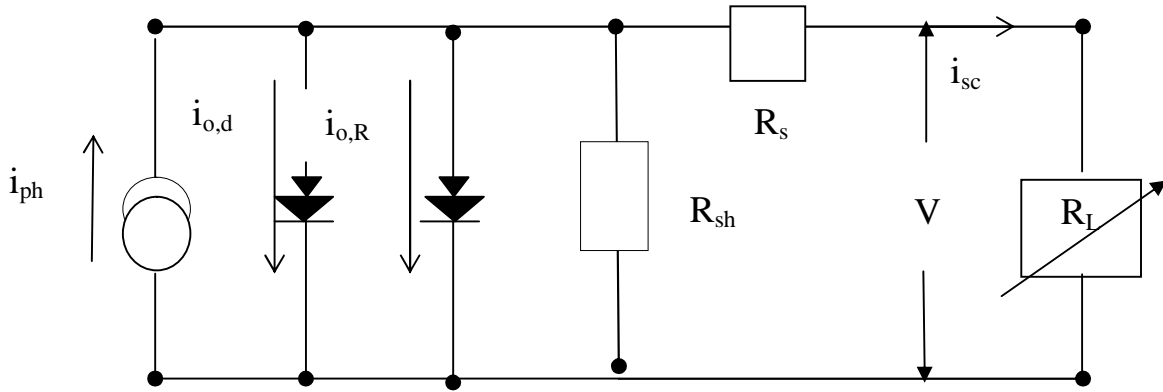
όπου $h_T: K^{-1}$: ο γραμμικός συντελεστής μεταβολής της i_{sc} με την θερμοκρασία T_c . $T_{c,o}$ και $I_{T,o}$ είναι η θερμοκρασία του φ/β-στοιχείου και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό, υπό συνθήκες αναφοράς (Karlanis and Karlani, 2012).

2.3 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R_s ΚΑΙ ΕΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩ R_{sh} . ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ m

Η μαθηματική έκφραση της χαρακτηριστικής καμπύλης του φωτοβολταϊκού για το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μίας διόδου (Σχ. 2.2) δίνεται από τη εξ.(2.6).

$$i = i_{ph} - i_d \left(\exp \left(\frac{V + i R_s}{\frac{m_d k T}{q}} \right) - 1 \right) - \frac{V + i R_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

Αντίστοιχα το ισοδύναμο κύκλωμα και η μαθηματική έκφραση για το ηλεκτρικό ισοδύναμο φ/β στοιχείου με δύο διόδους δίνονται στο Σχ.2.9 και στη εξ.(2.7) αντίστοιχα.



Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου δύο διόδων συνδεδεμένο με φορτίο R_L

$$i = i_{ph} - i_d \left(\exp \left(\frac{V+iR_s}{\frac{m_d k T}{q}} \right) - 1 \right) - i_R \left(\exp \left(\frac{V+iR_s}{\frac{m_R k T}{q}} \right) - 1 \right) - \frac{V+iR_s}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

Σε αυτά τα κυκλώματα παρατηρούμε δύο αντιστάσεις, την εν σειρά αντίσταση R_s και την εν παραλλήλω R_{sh} (I_d το ρεύμα σκότους που διαρρέει την δίοδο, i_{ph} το φωτορεύμα).

Η εσωτερική αντίσταση R_s εμποδίζει την διέλευση του ρεύματος μέσα στον αγωγό. Αντιπροσωπεύει την ωμική αντίσταση στην εμπρόσθια επιφάνεια του φ/β-στοιχείου η οποία φωτίζεται και στην μεταλλική επαφή με τον ημιαγωγό αλλά και εντός του ημιαγωγού, όπως αναφέρεται στην Εν.1.4.2. Σε γενικές γραμμές η εν σειρά αντίσταση R_s είναι πολύ χαμηλή και την μεγαλύτερη επίδραση σε αυτή έχει η κατανεμημένη αντίσταση από το στρώμα n μέχρι και την επιφάνεια του. Επίσης εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού, αλλά και από τις διαστάσεις και σχήμα της επαφής σε αυτό το στρώμα. Ενδεικτικές τιμές αντίστασης για διάφορα υλικά δίνονται στον Πίν.2.1.

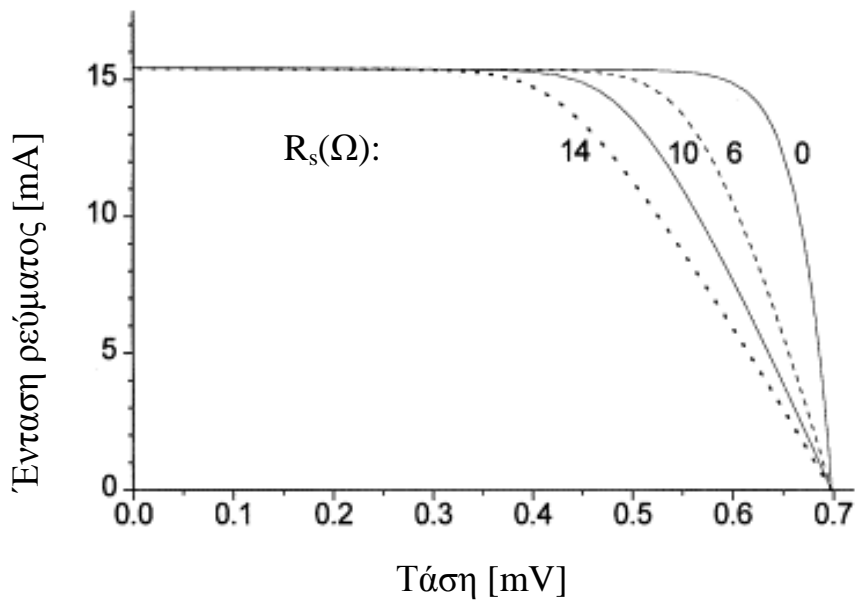
Πίνακας 2.1: Τιμές της εν σειρά αντίστασης R_s για διάφορα υλικά φ/β στοιχείων (Καπλάνης, 2004).

Υλικό φ/β στοιχείων	$R_s(\Omega)$
CR-Si 1	0.17
CR-Si 2	0.26
Poly Si	0.75
a-Si 1	4.95
a-Si 2	6.46

Οι απώλειες λόγω της εσωτερικής αντίστασης που οφείλονται στο φαινόμενο Joule υπολογίζονται από τη σχέση $P=I^2R_s$ και αυξάνονται όσο αυξάνεται το i_{ph} δηλαδή όσο αυξάνεται η ένταση της ακτινοβολίας.

Από τα παραπάνω εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα. Στην ιδανική περίπτωση που η εσωτερική αντίσταση είναι μηδέν, η ισχύς του στοιχείου θα αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με την ένταση της ακτινοβολίας ($P=I^2R_s=0$). Όσο μεγαλώνει η αντίσταση R_s , η ισχύς θα παρουσιάζει μια υπο-γραμμική αύξηση της οποίας η κλίση της εφαπτομένης θα μειώνεται ανάλογα. (Καπλάνης,2004)

Στο Σχ.2.10 και στον Πίν.2.2 παρουσιάζεται η επίδραση της R_s στην χαρακτηριστική I-V καθώς και στην απόδοση ενός στοιχείου.



Σχήμα 2.10: Επίδραση της εν σειρά αντίστασης R_s στη χαρακτηριστική I-V.(Ferber et al.,1998)

Πίνακας 2.2: Επίδραση της εν σειρά αντίστασης R_s στην απόδοση ενός φ/β στοιχείου.(Gupta et al)

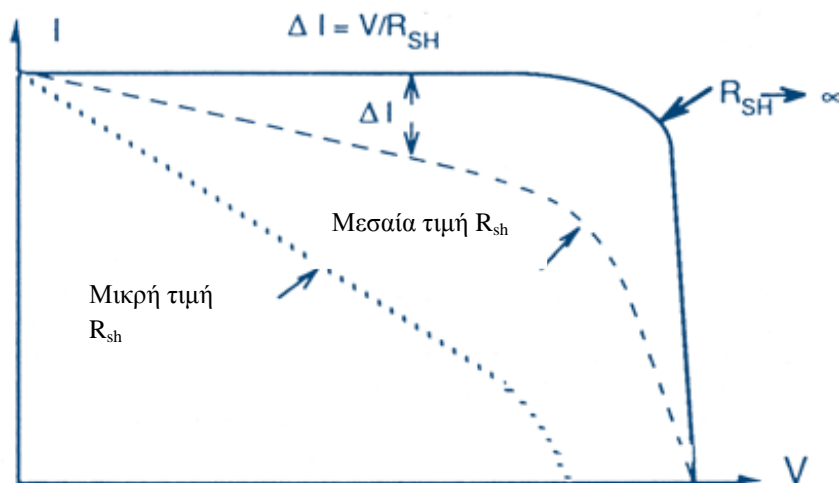
α/α	Εν σειρά αντίσταση φ/β στοιχείου (Ω/cm^2)	Απώλειες απόδοσης σε ακτινοβολία $1000 W/m^2$ (%)
1	10^{-5}	28
2	10^{-4}	24
3	10^{-3}	21
4	10^{-2}	10
5	10^{-1}	3

Όλα τα μονοπάτια υψηλής αγωγιμότητας μέσα στον αγωγό ή στα άκρα του αποτελούν την R_{sh} , την αντίσταση εν παραλλήλω (Shunt Resistance). Η αντίσταση R_{sh} είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η εν παραλλήλω αντίσταση εμφανίζεται λόγω διαρροής από ένα ακροδέκτη σε ένα άλλο, λόγω ανεπαρκούς μόνωσης, όπως για παράδειγμα στις άκρες του στοιχείου ή ανάμεσα στις επαφές διαφορετικής πολικότητας. Ουσιαστικά αντιπροσωπεύει διαύλους υψηλής αγωγιμότητας δια μέσου της διόδου p-n ή περιοχές υψηλής αγωγιμότητας στην περιφέρεια του φ/β-στοιχείου.

Αν υποθέσουμε ότι η παράλληλη αντίσταση μειώνεται, τότε η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_{sh} αυξάνεται για δεδομένη τιμή της τάσης V στα άκρα της, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή της έντασης του ρεύματος φορτίου I_L και συνεπώς η τάση V_{oc}

Στο Σχ.2.11 παρουσιάζεται η επίδραση της R_{sh} στην χαρακτηριστική I-V.



Σχήμα 2.11: Επίδραση της εν παραλλήλω αντίστασης R_{sh} στην χαρακτηριστική I-V (UNSW Engineering)

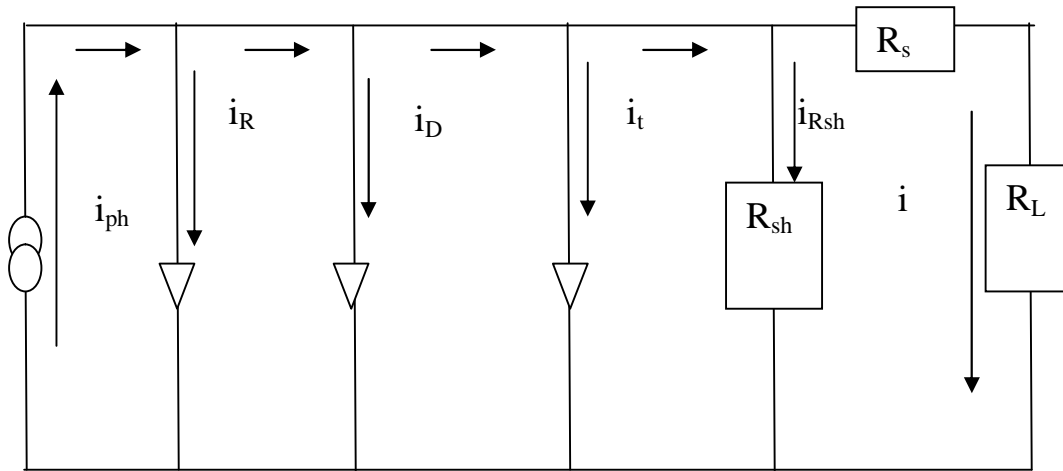
Και οι δύο αντιστάσεις R_s και R_{sh} επηρεάζουν σημαντικά τον συντελεστή πλήρωσης FF.

Για πληρέστερη ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος που αναφέρθηκε στα Σχ. 2.2 και Σχ.2.9, θα πρέπει να θεωρήσουμε και τα άλλα τρία φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, όπως είναι:

1. Η διάχυση των φορέων ηλεκτρονίων και οπών
2. Η επανασύνδεση ηλεκτρονίων και οπών
3. Η θερμοϊονική εκπομπή.

Για μικρά ρεύματα επικρατεί πτώση τάσεως στη R_{sh} . Καθώς η πόλωση αυξάνει επικρατεί το φαινόμενο της επανασύνδεσης, στη συνέχεια της διάχυσης

και τέλος η πτώση τάσεως στην αντίσταση R_s . Η εμφάνιση αυτών των φαινομένων συνοδεύεται από αντίστοιχα ρεύματα και συντελεστές, όπου απεικονίζονται στο Σχ.2.13 το οποίο περιγράφεται μαθηματικά από την εξ (2.8).



Σχήμα 2.13: Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου με τρεις διόδους.

$$i = i_{o,d} \left[e^{\lambda_d(V-ir_s)} - 1 \right] + i_{o,r} \left[e^{\lambda_r(V-ir_s)} - 1 \right] + i_{o,t} \left[e^{\lambda_t(V-ir_s)} - 1 \right] + \frac{V-ir_s}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

,όπου το $i_{o,d}$ είναι το αντίστροφο ρεύμα κόρου λόγω διάχυσης και m_d είναι ένας συντελεστής συνδεδεμένος με το φαινόμενο αυτό. Στην ιδανική περίπτωση, $m_d=1$.

Το $i_{o,t}$ είναι το αντίστροφο ρεύμα κόρου λόγω θερμοϊονικής εκπομπής για συστήματα MIS(Metal Insulator Semiconductor), με $m_t > 2$.

Το $i_{o,r}$ είναι το αντίστροφο ρεύμα κόρου λόγω επανασύνδεσης e^- , και οπών, με το m_r να ισούται στην ιδανική περίπτωση με 2.

Ο συντελεστής ιδεατότητας m ουσιαστικά περιγράφει τα παραπάνω φαινόμενα. Οι τιμές του συντελεστή ιδεατότητας μεταβάλλονται με την ένταση της ακτινοβολίας I_T , δηλαδή με το ρεύμα. (Καπλάνης,2004).

3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_s ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ m

Για τον προσδιορισμό της R_s έχουν αναφερθεί διάφορες μέθοδοι (Karlanis and Karlani, 2011; Cotfas et al, 2008). Θα γίνει αναφορά 3 τέτοιων μεθόδων οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Πείραμα 1

Εκτελούμε μια σειρά δύο τύπων πειραμάτων με το ίδιο φ/β στοιχείο:

A. προσδιορίζουμε τη χαρακτηριστική (I-V) σκότους.

B. Προσδιορίζουμε τη χαρακτηριστική (I-V), όταν το φ/β στοιχείο φωτίζεται.

Όταν εκτελούμε το πείραμα για την χαρακτηριστική του σκότους, προσπαθούμε να επιτύχουμε ρεύμα (σκότους) ίσο με το ρεύμα που αποδίδει το φ/β στοιχείο όταν φωτίζεται, εφαρμόζοντας αντίστροφη πόλωση με εξωτερική γεννήτρια.

Η τάση που θα πρέπει να εφαρμοσθεί στην περίπτωση αυτή, V_A , είναι μεγαλύτερη της, V_{oc} , ώστε να υπερνικηθεί η πώση τάσεως $i \times R_s$. Για αυτό το λόγο αυξάνουμε την τάση μέχρι μια τιμή V_A σύμφωνα με την εξ.(3.1), όπου $i_d = i_{sc}$.

$$V_A - V_{oc} = i_{sc} \times R_s \quad (3.1)$$

Έχοντας μετρήσει τις (V_{oc}, i_{sc}) , από το πείραμα B, και την V_A , από το Πείραμα A, υπολογίζουμε την R_s σύμφωνα με την εξ.(3.2).

$$R_s = \frac{V_A - V_{oc}}{i_{sc}} \quad (3.2)$$

Πείραμα 2

Εκτελούμε μια σειρά μετρήσεων (I-V) προσδιορισμού της χαρακτηριστικής σκότους για το υπό μελέτη φ/β-στοιχείο. Θεωρούμε ότι η (I-V) υπακούει στη εξ.(3.3).

$$I(V) = i_{o,d} [e^{\lambda_d(V - iR_s)} - 1] + i_{o,R} [e^{\lambda_r(V - iR_s)} - 1] +$$

$$i_{o,t} \left[e^{\lambda_T (V - iR_s)} - 1 \right] + \frac{V - iR_s}{R_{sh}} \quad (3.3)$$

Εφαρμόζουμε την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για μη γραμμική προσαρμογή (non-linear least square fit), όπου οι άγνωστες παράμετροι είναι:

m_d, m_r, m_t και οι

$i_{o,d}, i_{o,r}, i_{o,t}$ και τέλος οι

R_s και R_{sh}

Τα m_d, m_r, m_t αντιστοιχούν στα φαινόμενα της διάχυσης, της επανασύνδεσης και της θερμοϊονικής εκπομπής και τα $i_{o,d}, i_{o,r}, i_{o,t}$ είναι τα αντίστοιχα ρεύματά τους.

Η προσαρμογή δίνει τις τιμές που αντιστοιχούν στους ανωτέρω άγνωστους συντελεστές/σταθερές, που εμφανίζονται στην πολυωνυμική έκφραση στην οποία προσαρμόζουμε τα πειραματικά σημεία (I,V). Ο συντελεστής συσχέτισμού (Correlation Coefficient) είναι συνήθως αρκετά ψηλός (π.χ. $R^2=0,96$). Συγκρίνουμε τέλος την τιμή R_s με αυτή που προσδιορίσαμε από το Πείραμα 1.

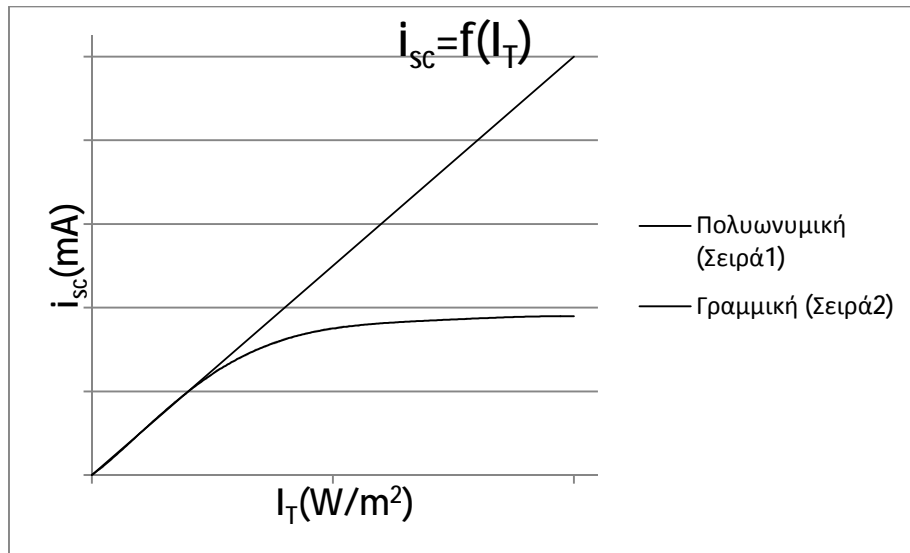
Πείραμα 3

Μία εκτίμηση της τιμής R_s και του συντελεστή ιδεατότητας m επιτυγχάνεται από την μελέτη της καμπύλης του ρεύματος, i_{sc} , συναρτήσεως της έντασης του φωτός, I_T , που προσπίπτει σε ένα φ/β-στοιχείο.

Η εξ.(3.4) δίνει τη σχέση ανάμεσα στο ρεύμα φωτονίων i_{ph} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης i_{sc} .

$$i_{sc} = i_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{q}{mkT} i_{sc} R_s\right) \quad (3.4)$$

Το φωτόρευμα, i_{ph} , είναι γραμμικά ανάλογο της I_T . Το I_0 προκύπτει λόγω του ρεύματος, I_d , της διόδου που υφίσταται στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του φ/β στοιχείου και ενεργεί έτσι ώστε, το i_{sc} να μην συμπεριφέρεται γραμμικά συναρτήσεως της I_T όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$ η πολυωνυμική προσαρμογή καμπύλης, και η εφαπτόμενη $i_{ph}=f(I_T)$ η γραμμική προσαρμογή.

Για το σκοπό αυτό του προσδιορισμού των R_s και m σχεδιάζουμε και εκτελούμε ένα πείραμα το οποίο θα αναλυθεί στη συνέχεια και επεξεργαζόμαστε τις μετρήσεις.

1. Εκτελούμε το πείραμα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής ($i-V$) και προσδιορίζουμε τις τιμές V_{oc} και i_{sc} , για μια σειρά από διαφορετικές εντάσεις φωτισμού. Είναι δυνατό κατά την μέθοδο αυτή να μην λαμβάνουμε πάντα την $I-V$ αλλά μόνο τα i_{sc} και V_{oc} .

2. Σχεδιάζουμε το διάγραμμα i_{sc} vs I_T και V_{oc} vs $\ln(I_T)$.

Η τιμή του m προσδιορίζεται από την μεταβολή του V_{oc} συναρτήσει του λογαρίθμου της έντασης I_T με την οποία φωτίζουμε το ϕ/β στοιχείο, σύμφωνα με την εξ.(3.5)

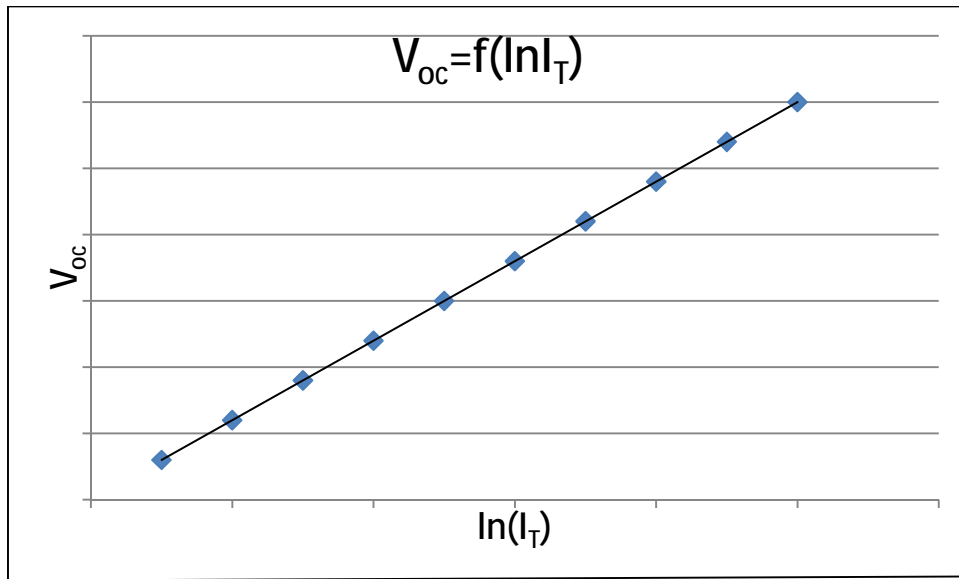
$$V_{oc} = \frac{mkT_c}{q} \ln I_T + C \quad (3.5)$$

όπου C είναι μια σταθερά.

Υπολογίζουμε την κλίση α_1 της ευθείας από την προσαρμοσμένη ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Γνωρίζουμε τις τιμές q, k και έχοντας μετρήσει την T_c προσδιορίζουμε την R_s . Εναλλακτικά, σύμφωνα με τη σχέση 3.5 μπορούμε να προσαρμόσουμε λογαριθμική καμπύλη της μορφής $y = a \cdot \ln(x) + c$ στα δεδομένα για τον προσδιορισμό του συντελεστή α_1 σύμφωνα με την εξ.(3.7).

Από το διάγραμμα V_{oc} συναρτήσει της $\ln I_T$ του Σχ.3.4 λαμβάνουμε ευθεία με κλίση η οποία δίνεται από τη εξ.(3.6).

$$\alpha_2 = \frac{mkT_c}{q} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε σχέση με το λογάριθμο της έντασης της ακτινοβολίας.

3. Στη συνέχεια, σχεδιάζουμε το διάγραμμα $\ln(i_{ph} - i_{sc})$ συναρτήσει της i_{sc} . Για τον προσδιορισμό της διαφοράς $i_{ph} - i_{sc}$ φέρουμε την εφαπτόμενη στην καμπύλη i_{sc} vs I_T στην περιοχή των πολύ μικρών τιμών I_T , όταν δηλ. η επίδραση $i_{sc} \cdot R_s$ στην εξ.(3.4) είναι μηδενική.

Λογαριθμίζοντας την εξ.(3.4) λαμβάνουμε τη εξ.(3.7).

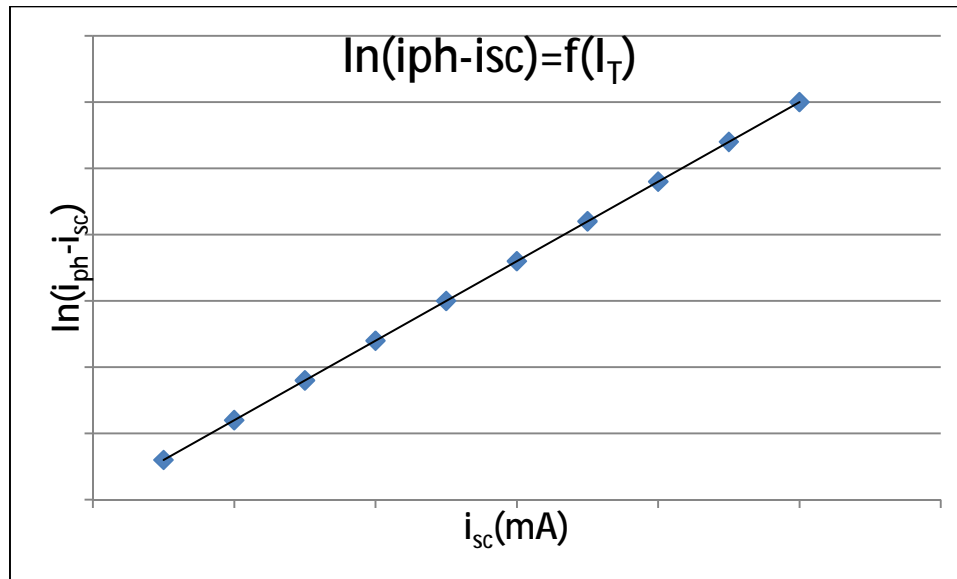
$$\ln(i_{ph} - i_{sc}) = \frac{qR_s}{mkT_c} i_{sc} + C' \quad (3.7)$$

όπου C' είναι μία σταθερά που εξαρτάται από το I_0 , όπως διαπιστώνουμε από μια απλή διερεύνηση της εξ.(3.4).

Με γνωστό το q/kT_c , προσδιορίζουμε τον συντελεστή m υπολογίζοντας τον σύμφωνα με την εξ.(3.8) και το συντελεστή α_2 . Αφού έχουμε υπολογίσει το m , προσδιορίζουμε στη συνέχεια το R_s , από την εξ.(3.8).

$$\alpha_1 = \frac{q}{mkT} r_s \quad (3.8)$$

όπου α_1 είναι η κλίση του διαγράμματος της λογαριθμικής διαφοράς του φωτορεύματος-ρεύματος βραχυκύκλωσης $\ln(i_{ph} - i_{sc})$ προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης i_{sc} , όπως φαίνεται στο Σχ.3.5.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα της λογαριθμικής διαφοράς φωτορεύματος-ρεύματος βραχυκύκλωσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης (Καπλάνης,2004).

Έχουν αναπτυχθεί διεθνώς και άλλες μέθοδοι προσδιορισμού της εν σειρά αντίστασης θεωρώντας την εν παραλλήλω άπειρη. (D.Cotfas et al, 2008). Μερικές από αυτές είναι:

1. Η δυναμική μέθοδος χρησιμοποιεί το μοντέλο διόδου της μιας διόδου και εισάγοντας ένα χαμηλού πλάτους εναλλασσόμενο ρεύμα κατά την ορθή πόλωση. Η εξ.(3.10) μας δίνει την δυναμική αντίσταση:

$$R_d = \frac{dV}{dI} = \frac{mkT}{q} \frac{1}{I} - R_s \quad (3.10)$$

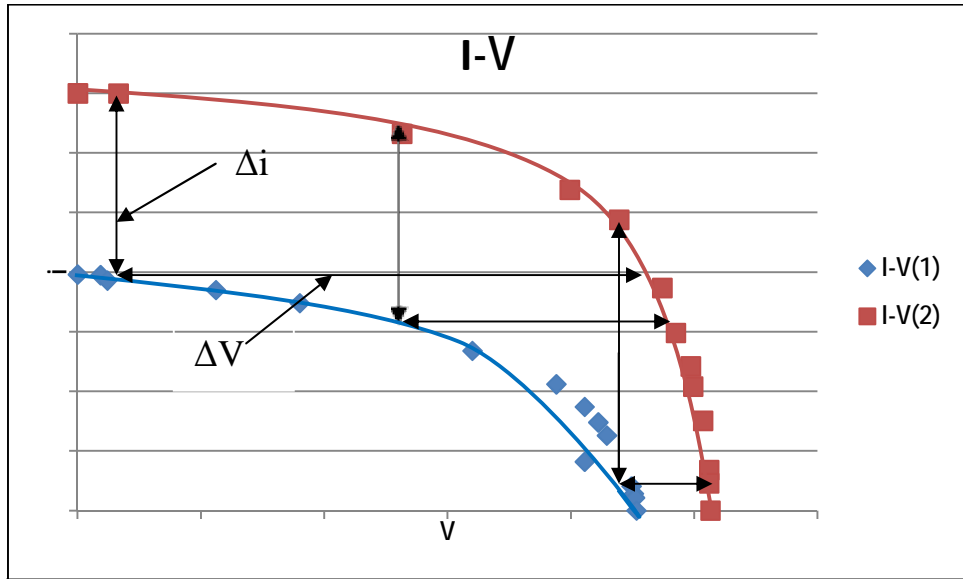
Η εν σειρά αντίσταση καθορίζεται από την τομή της ευθείας $R_s=f(1/I)$ με τον άξονα R_d .

2 Η μέθοδος της κλίσης στο σημείο $(V_{oc},0)$ - με συνεχή ακτινοβολία και χρησιμοποιώντας μοντέλο μίας διόδου, η R_s υπολογίζεται από την εξ.(3.11). Ειδική ανάλυση γίνεται από (Karlanis and Karlani ,2011).

$$R_s = \frac{dV}{dI} = \frac{mkT}{q} \frac{1}{i_{ph}+i_0} \quad (3.11)$$

3 Η μέθοδος με τις δύο χαρακτηριστικές I-V. είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιεί δύο χαρακτηριστικές I-V του στοιχείου, οι οποίες έχουν ληφθεί για την ίδια θερμοκρασία για δύο διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας (I_{T1} , I_{T2}), όπως οι καμπύλες του Σχ.3.6. Η εν σειρά αντίσταση υπολογίζεται ως εξής από την εξ.(3.12):

$$R_s = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta i_{sc}} \quad (3.12)$$



Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστικές I-V για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας και ίδια θερμοκρασία

4 Η μέθοδος του μεγίστου σημείου ισχύος, MPP. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί το μοντέλο της μίας διόδου και τη χαρακτηριστική I-V για σταθερή ακτινοβολία. Στην περίπτωση αυτή η εν παραλλήλω αντίσταση θεωρείται άπειρη. Η εν σειρά αντίσταση, R_s , υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V - I R_s}{n V_T}} - 1 \right) + I_{sh} \quad (3.13)$$

όπου
$$I_{sh} = \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3.14)$$

Η μέθοδος των 5 σημείων. Αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο για το κύκλωμα μίας διόδου (Σχ.2.2 και εξ.2.6). Οι παράμετροι που αναφέρονται περιγράφονται με τις εξής σχέσεις (Chan at al, 1986):

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{n V_T}} - 1 \right) + I_{sh} \quad (3.15)$$

Όπου $V_T = kT/q$.

$$V_{oc} = n V_T \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.16)$$

$$\text{όπου } \left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=0} = -\frac{1}{R_{s0}}$$

$R_{sh}=R_{sh0}$, όπου R_{sh0} η αντίσταση του κυκλώματος σε ανοικτό κύκλωμα.

$$i_s \exp \frac{V_{oc}}{mV_T} + \frac{V_{oc}-V_m}{R_{sh}} - i_m - i_s \exp \frac{V_m+R_s i_m}{mV_T} = 0 \quad (3.17)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει για το m:

$$m = \frac{V_m+R_{s0}i_m-V_{oc}}{V_T \left[\ln \left(i_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh0}} - i_m \right) - \ln \left(i_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) + \left(\frac{i_m}{i_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh0}}} \right) \right]} \quad (3.18)$$

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Τα πειράματα για τον προσδιορισμό της εσωτερικής αντίστασης R_s και του συντελεστή ιδεατότητας m έγιναν με δύο ανεξάρτητες πειραματικές διατάξεις:

- α) Απλή πειραματική διάταξη λήψης μετρήσεων των μεγεθών i_{sc} , V_{oc} , T_c .
- β) Αυτοματοποιημένη πειραματική διάταξη λήψης μετρήσεων των μεγεθών i_{sc} , V_{oc} , T_c .

4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΛΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

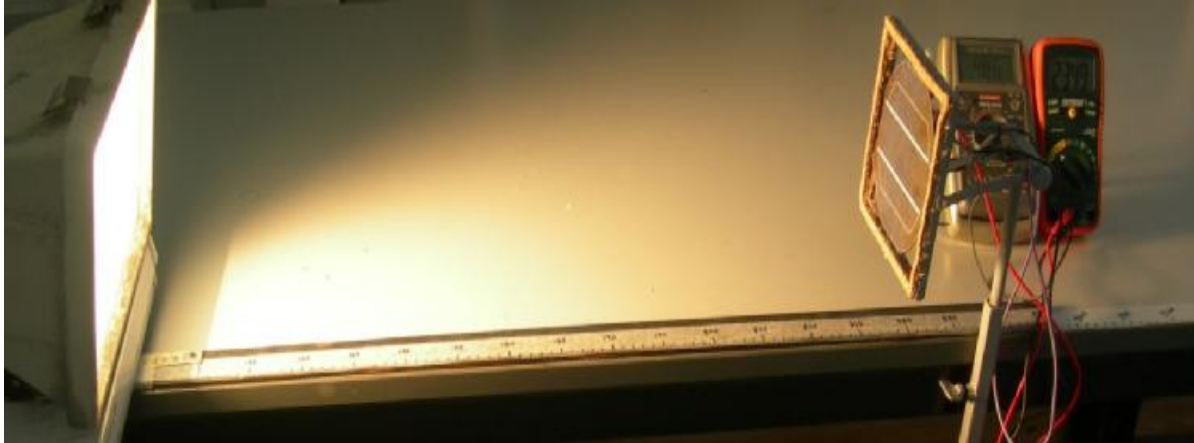
Σχεδιάστηκε μια πειραματική διάταξη με σκοπό, την μέτρηση των ηλεκτρικών παραμέτρων i_{sc} και V_{oc} , για τον προσδιορισμό της εσωτερικής αντίστασης και του συντελεστή ιδεατότητας ϕ/β στοιχείων. Επιπλέον είχε σκοπό την εξοικείωση του πειραματιστή με την πειραματική διαδικασία, την λήψη έγκυρων και αξιόπιστων μετρήσεων και την επεξεργασία των δεδομένων.

Περιγραφή οργάνων

Οι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη, όπως φαίνονται στην Εικ.4.1 είναι:

1. Προβολέας με δέσμη η οποία αποκλίνει, δηλαδή με διαχεόμενη φωτεινή ροή και με λαμπτήρα τύπου αλογόνου.

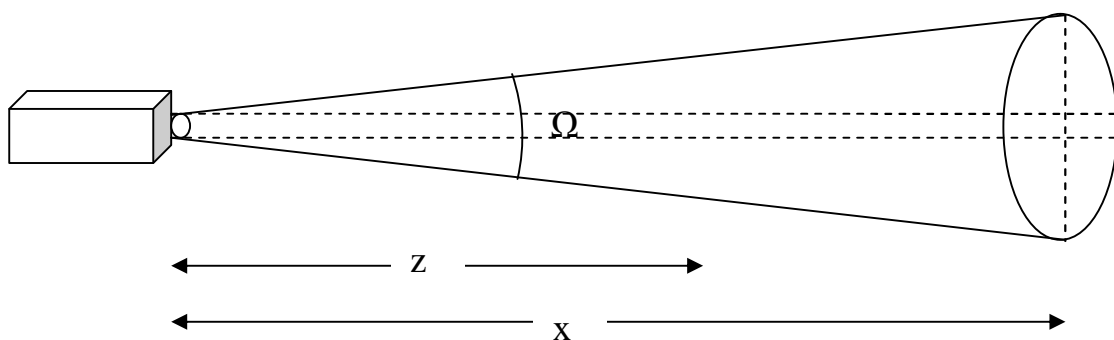
2. Φ/β στοιχεία τύπου sc-Si και pc-Si.
3. 2 πολύμετρα που λειτουργούν ως βολτόμετρα ή αμπερόμετρα.
4. Κινητό μεταλλικό σύστημα στήριξης του φ/β στοιχείου.
5. Θερμόμετρο υπέρυθρης ακτινοβολίας τύπου BP20.



Εικόνα 4.1: Απλή πειραματική διάταξη για τη λήψη μετρήσεων i_{sc}, V_{oc}, T_c (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας)

Έστω μια φωτεινή πηγή που εκπέμπει με ροή Φ φωτόνια/s, σε μια στερεά γωνία Ω . Η Ω μπορεί να έχει τιμή από 4π όταν η πηγή εκπέμπει ισότροπα σ'όλο το χώρο γύρω απ'αυτήν ή να έχει τιμή Ω (rad) όταν εκπέμπει εντός μιας περιοχής κώνου. Έστω μια επιφάνεια μικρή A_c πχ. $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ που είναι το φ/β στοιχείο σε απόσταση x από την πηγή, βλ. Σχ.4.1, τότε αυτή ορίζει στερεά γωνία $d\omega_x = \frac{A_c}{z^2}$.

Ομοίως όταν η επιφάνεια αυτή A_c βρίσκεται σε απόσταση z , ορίζει στερεά γωνία $d\omega_z = \frac{A_c}{z^2}$.



Σχήμα 4.1: Μεταβολή της ακτίνας της φωτεινής δέσμης σε σχέση με την απόσταση

Στις θέσεις x και z η ροή των φωτονίων/s που φθάνει στην επιφάνεια A_c δίδεται από τις σχέσεις:

$$I_x = \frac{\Phi \delta \omega_x}{\Omega} = \frac{\Phi A_c}{\Omega x^2}$$

$$I_z = \frac{\Phi \delta \omega_z}{\Omega} = \frac{\Phi A_c}{\Omega z^2}$$

Διαιρούμε τις δύο σχέσεις και προκύπτει η εξ.(4.1).

$$\frac{I_x}{I_z} = \frac{z^2}{x^2} \quad (4.1)$$

Είναι προφανές ότι ο λόγος αυτός της ροής των φωτονίων στις θέσεις x και z είναι ανάλογος και της έντασης του φωτός στις θέσεις x και z.

Προϋπόθεση ώστε να ισχύει ο παραπάνω νόμος της εξ.(4.1), θα πρέπει η φωτεινή ροή να διαχέεται ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις. Κάνοντας αυτήν την παραδοχή υπολογίζουμε την ένταση της ακτινοβολίας με βάση την απόσταση λαμπτήρα και στοιχείο. Την απόσταση την μετράμε με βαθμονομημένο κανόνα με ακρίβεια 0.5cm.

Για λόγους πραγματικής και όχι σχετικής βαθμονόμησης της έντασης του λαμπτήρα, μετρήθηκε η ένταση της ακτινοβολίας σε μια θέση 2m από τον λαμπτήρα ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη, με το όργανο irradiance sensor τύπου Si 01TCext που απεικονίζεται στην Εικ.4.2.



Εικόνα 4.2: Irradiance sensor (εργαστήριο Α.Π.Ε, ΤΕΙ Πάτρας)

Για τον υπολογισμό της I_T στις υπόλοιπες θέσεις χρησιμοποιήθηκε ο τύπος της εξ.(4.2).

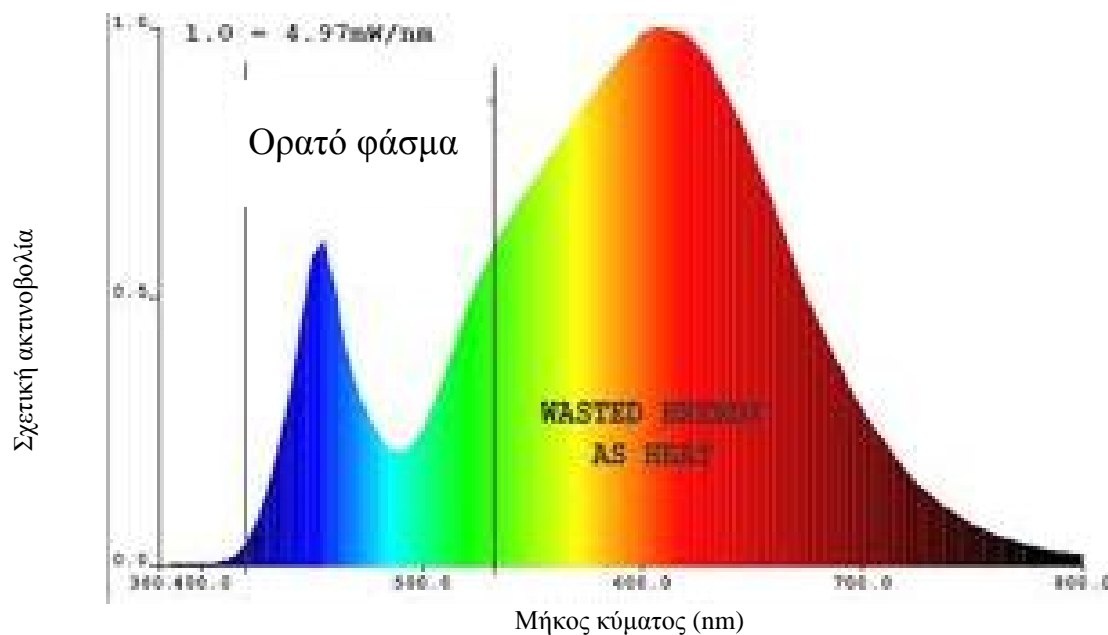
1. Προβολέας

Ο προβολέας που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές διατάξεις απεικονίζεται στην Εικ.4.3 και έχει προσαρμοσμένο ένα λαμπτήρα ιωδίνης με τα εξής χαρακτηριστικά: $I=1000W$, $V=225V$, $I=4.4A$, $3000K$. Ο προβολέας δίνει ένταση ακτινοβολίας $47.58W/m^2$ στα $2m$, όπως μετρήθηκε με τον αισθητήρα ακτινοβολίας, που αναφέρθηκε προηγουμένως.



Εικόνα 4.3: Προβολέας αλογόνου-ιωδίνης (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας).

Ο λαμπτήρας ιωδίνης είναι τύπου αλογόνου με φάσμα εκπεμπόμενου φωτός που δίδεται στο Σχ.4.2.



Σχήμα 4.2: Φάσμα λάμπας αλογόνου

2. Φ/β στοιχεία

Τα φ/β στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά τα πειράματα με αυτή τη διάταξη ήταν δύο: μονοκρυσταλλικό φ/β στοιχείο sc-Si 11cmX11cm και ένα πολυκρυσταλλικό φ/β στοιχείο pc-Si 6cmX6cm.

Στα στοιχεία αυτά όπως φαίνεται στις εικόνες 4.4 και 4.5 έχει γίνει συγκόλληση ακροδεκτών, αφού καθαρίστηκαν πρώτα οι περιοχές n και p των στοιχείων στο σημείο του κεντρικού αγωγού (bus bar) συλλογής e.



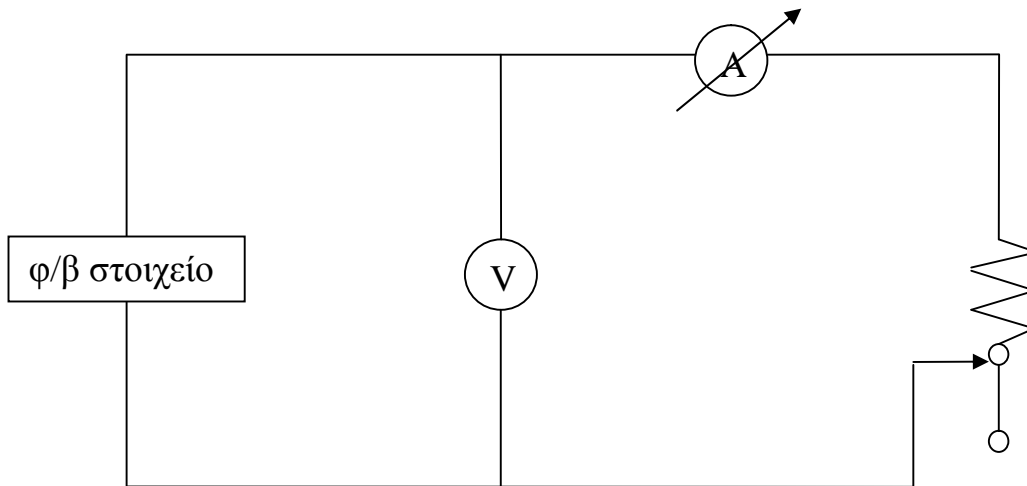
Εικόνα 4.4: pc-Si στοιχείο 6cmX6cm (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας).



Εικόνα 4.5: c-Si στοιχείο 11cmX11cm (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας).

3. Πολύμετρα.

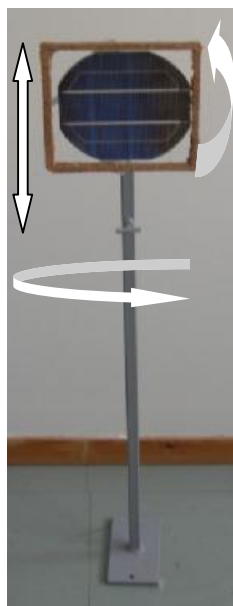
Για τις μετρήσεις των μεγεθών i_{sc} και V_{oc} χρησιμοποιήθηκαν 2 ψηφιακά πολύμετρα τύπου RE840D και EXTECH, το ένα ως αμπερόμετρο με ακρίβεια 0.1mA και το δεύτερο ως βολτόμετρο με ακρίβεια 1mV όπως φαίνεται στο κύκλωμα του Σχ.4.3.



Σχήμα 4.3: Ηλεκτρικό κύκλωμα της πειραματικής διάταξης.

4. Κινητό μεταλλικό στήριγμα

Χρησιμοποιήθηκε κινητό στήριγμα με τετράγωνη βάση ώστε να στηρίζεται στο πάτωμα. Στην κορυφή του έχει μεταλλικό πλαίσιο με δικτυωτό πλέγμα για να στηρίζεται το φ/β στοιχείο χωρίς να προκαλείται θερμική μόνωση. Έχει επίσης τη δυνατότητα περιστροφής και ανύψωσης του πλαισίου ώστε να επιτυγχάνεται κάθε δυνατή κλίση του πλαισίου όπως φαίνεται στην Εικ.4.6, για να μπορεί να τοποθετηθεί ακριβώς κάθετα του λαμπτήρα επί του κεντρικού του άξονα.



Εικόνα 4.6:Κινητό μεταλλικό στήριγμα για φ/β στοιχείο (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας).

5. Θερμόμετρο υπέρυθρης ακτινοβολίας IR, τύπου BP20

Το θερμόμετρο υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR:INFRA RED) BP20 έχει τη δυνατότητα να μετρήσει τη θερμοκρασία T_c του φ/β στοιχείου το οποίο φαίνεται στην Εικ.4.7. Για την ακρίβεια της μέτρησης απαιτείται η ρύθμιση του οργάνου βάσει του συντελεστή εκπομπής ε του φ/β στοιχείου. Το θερμόμετρο BP20 έχει ακρίβεια μετρήσεων 1°C .

Κάθε σώμα όταν προσπίπτει ακτινοβολία επ'αυτό απορροφά ένα μέρος αυτής ενώ το άλλο το ανακλά. Ολόκληρη την ακτινοβολία μπορεί να απορροφήσει μόνο το «Μέλαν Σώμα» (Black Body), το οποίο είναι κάτι το ιδεατό. Ως συντελεστής εκπομπής, ε , ορίζουμε τον αριθμό εκείνο, που είναι ο λόγος του ρυθμού με τον οποίο η ενέργεια \dot{Q} ακτινοβολείται από μια επιφάνεια δεδομένης θερμοκρασίας T_c , προς το μέγιστο ρυθμό ακτινοβολούμενης ενέργειας που αντιστοιχεί στην περίπτωση Μέλανος Σώματος, που έχει τη μέγιστη θερμοκρασία:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}_{r,bb}}$$

Στη περίπτωση μας, ενδιαφέρει ο συντελεστής εκπομπής του πυριτίου, ο οποίος είναι $\varepsilon=0.67$. (Καπλάνης, 2004)



Εικόνα 4.7: Θερμόμετρο IR BP20 (εργαστήριο Α.Π.Ε.,ΤΕΙ Πάτρας).

Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Διεξήχθη μία σειρά πειραμάτων με την ίδια ακριβή διαδικασία, και για τα δύο φ/β στοιχεία που δίδονται στις Εικ. 4.4 και 4.5. Για κάθε περίπτωση

ρυθμίζεται η επιθυμητή απόσταση μεταξύ προβολέα-λαμπτήρα για την εκκίνηση των μετρήσεων και ακολουθούν οι παρακάτω σειρές μετρήσεων.

Η πρώτη σειρά μετρήσεων ξεκινά σε απόσταση λαμπτήρα-στοιχείου ίση με 570cm. Τη στιγμή που ανάβει ο προβολέας, διαβάζουμε ακαριαία την ένδειξη της τάσης V_{oc} και αμέσως μετά την ένδειξη του ρεύματος i_{sc} . Οι μετρήσεις των τάσεων V_{oc} γίνονται όσο το δυνατόν ακαριαία καθώς για κοντινές αποστάσεις λαμπτήρα-στοιχείου μεταβάλλονται με τον χρόνο κυρίως λόγω της θερμοκρασίας, T_c , την οποία και μετράμε με το θερμομέτρο IR.

Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για διαφορετικές αποστάσεις μέχρι την απόσταση λαμπτήρα-στοιχείου ίση με 40cm μετακινώντας το στοιχείο με το στήριγμά του και χωρίς να μετακινούμε το λαμπτήρα. Όπως προαναφέραμε με τη μετακίνηση του στοιχείου κατά μήκος του νοητού άξονα λαμπτήρα-στοιχείου, πιο κοντά στον λαμπτήρα αυξάνεται η ένταση της ακτινοβολίας και ως επακόλουθο επιτυγχάνεται αύξηση των τιμών τάσης V_{oc} και ρεύματος i_{sc} .

Μεταβολή στη θερμοκρασία T_c , αρχίζει να παρουσιάζεται σε απόσταση μικρότερη των 2m. Η οποιαδήποτε μεταβολή της θερμοκρασίας T_c μεταβάλλει τις μετρήσεις μας οι οποίες διορθώνονται με την βοήθεια της εξ.(2.3).

Αξίζει να σημειωθεί ότι είχαν πραγματοποιηθεί κι άλλες μετρήσεις με διάφορα στοιχεία πριν τις τελικές, ώστε να εξοικειωθεί ο σπουδαστής με τη πειραματική διαδικασία και την επεξεργασία των δεδομένων.

Οι συνθήκες των μετρήσεων για το κάθε φ/β στοιχείο πρέπει να είναι ίδιες. Για αυτό το λόγο πριν την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων, προηγείται μέτρηση της απόστασης λαμπτήρα-στοιχείου. Ελέγχεται η ομοκεντρία μεταξύ του στοιχείου και του λαμπτήρα, δηλαδή να βρίσκονται στο ίδιο ύψος και στην ίδια ευθεία έτσι ώστε η ακτινοβολία του προβολέα να πέφτει κάθετα στο στοιχείο και να συμπίπτουν τα κέντρα τους.

Πέρα από τον έλεγχο της ακτινοβολίας, πρέπει να αποκλειστεί η ύπαρξη άλλων ακτινοβολιών στο χώρο. Για αυτό το σκοπό οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο σκοτάδι, ώστε να μην υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία. Διαφορετικά θα πρέπει να υπάρξει διόρθωση ως προς τη συνεισφορά της διάχυτης ακτινοβολίας

4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

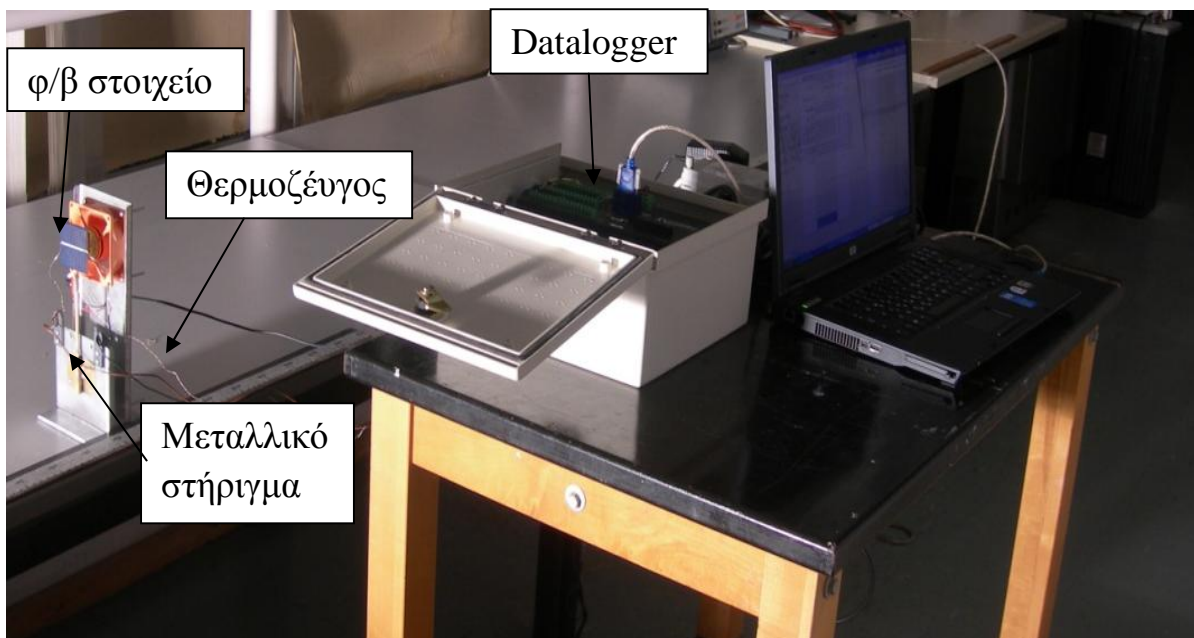
Για την ταυτόχρονη μέτρηση των μεγεθών i_{sc} , V_{oc} , T_c καθώς και της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V των φ/β στοιχείων χρησιμοποιήθηκε μια αυτοματοποιημένη πειραματική διάταξη που επιτυγχάνει να ελαχιστοποιείται το ανθρώπινο σφάλμα στις μετρήσεις αυτές, με τη βοήθεια της αυτόματης λήψης και καταγραφής των μετρήσεων.

Τα όργανα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη αυτή, φαίνονται στην Εικ.4.8 και είναι

1. Προβολέας με δέσμη η οποία αποκλίνει.
2. Μονοκρυσταλλικό φ/β στοιχείο sc-Si διαστάσεων 5cmX5cm.
3. Καταχωρητής (Datalogger).
4. Μεταλλική βάση στήριξης του φ/β στοιχείου με ανεμιστήρα, προσαρμοσμένο κοντά στην πίσω πλευρά του φ/β πλαισίου.

Το πείραμα με την αυτοματοποιημένη πειραματική διάταξη λήψης μετρήσεων γίνεται κάτω από τις ίδιες συνθήκες με αυτές της απλής. Δηλαδή οι συνθήκες των μετρήσεων i_{sc} , V_{oc} , T_c για το κάθε φ/β στοιχείο πρέπει να είναι ίδιες. Για αυτό το λόγο πριν την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων, προηγήθηκε μέτρηση της απόστασης προβολέα-στοιχείου. Πρέπει επίσης να υπάρχει ομοκεντρία του φ/β στοιχείου και του λαμπτήρα, δηλαδή να βρίσκονται στο ίδιο ύψος και στην ίδια ευθεία έτσι ώστε η ακτινοβολία του προβολέα να πέφτει κάθετα στο στοιχείο και να συμπίπτουν τα κέντρα τους.

Πέραν από τον έλεγχο της ακτινοβολίας, έπρεπε να αποκλειστεί η ύπαρξη άλλων ακτινοβολιών στο χώρο. Για αυτό το σκοπό οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο σκοτάδι, ώστε να μην υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία. Αλλιώς θα πρέπει να παίρνουμε κάθε φορά 2 μετρήσεις τάσης και 2 έντασης ρεύματος. Η μία θα είναι η διάχυτη μέτρηση $i_{sc,b}$, $V_{oc,b}$ και η άλλη η μέτρηση με αναμμένη τη λάμπα i_{sc} , V_{oc} . Έπειτα το τελικό αποτέλεσμα θα είναι $i_{sc,R} = i_{sc} - i_{sc,b}$ και $V_{oc,R} = V_{oc} - V_{oc,b}$.



Εικόνα 4.8: Πειραματικά διάταξη με αυτόματο σύστημα (εργαστήριο Α.Π.Ε.)

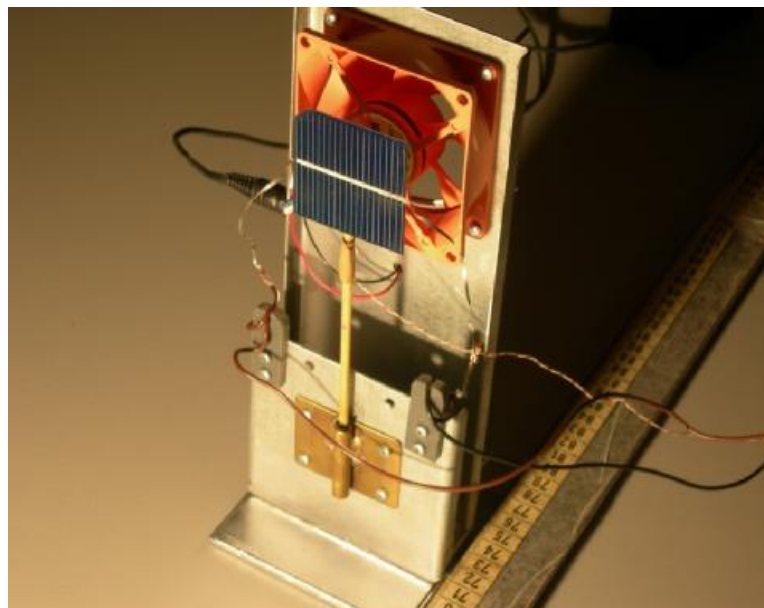
1. Προβολέας

Με αυτό το σύστημα χρησιμοποιήθηκε λαμπτήρας αλογόνου-ιωδίνης 1000W ο οποίος περιγράφηκε στην ενότητα 4.1.

2. Φ/β-στοιχείο τύπου Sc-Si 5 cmX5cm

Το φ/β στοιχείο τοποθετήθηκε σε μεταλλική βάση με ανεμιστήρα προσαρμοσμένο στο πίσω μέρος. Οι ακροδέκτες του στοιχείου από τις επιφάνειες p και n του ημιαγωγού μαζί με την μία άκρη του θερμοζεύγους είναι συνδεδεμένα με το Datalogger. Το στοιχείο είναι μονοκρυσταλλικό (sc-Si) με διαστάσεις 5cmX5cm.

Στο θερμοζεύγος τύπου χαλκού-κωνσταντίνης (Cu-Const) διαμέτρου 0.2mm είναι συνδεδεμένο στην πίσω πλευρά του στοιχείου για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του, Στις Εικ 4.9 και 4.10 παρουσιάζεται το στοιχείο πάνω στη μεταλλική βάση και χωρίς αυτή.

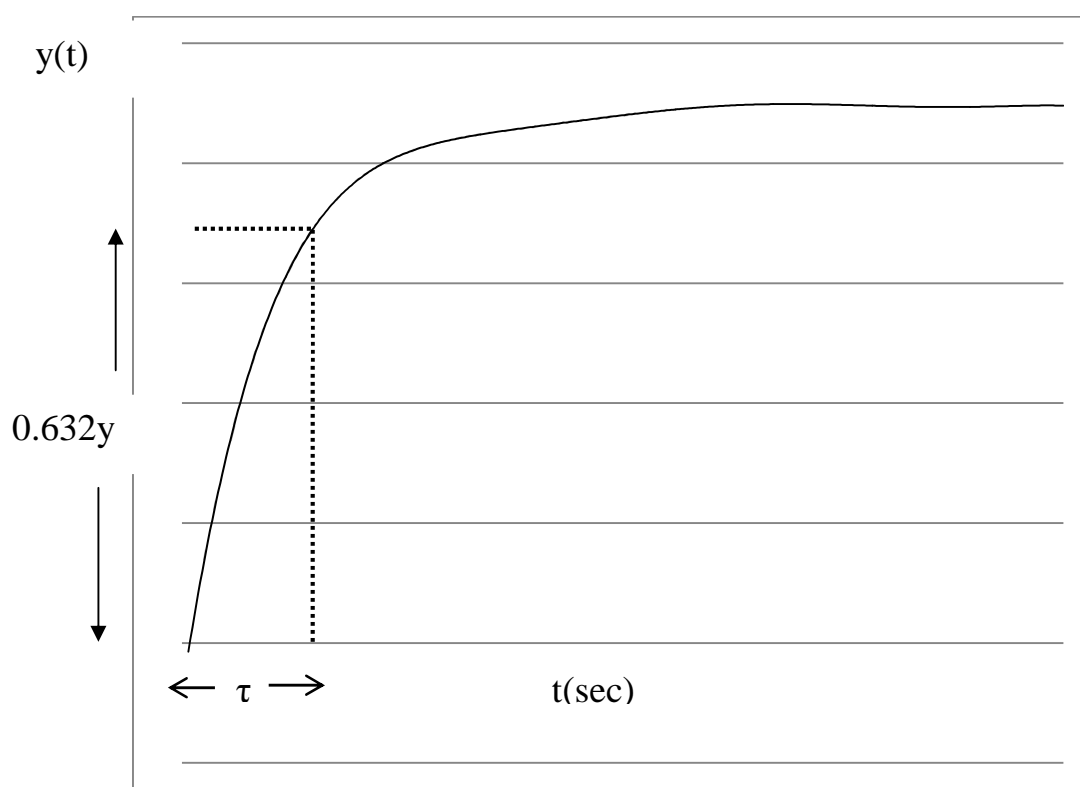


Εικόνα 4.9: Φ/β στοιχείο τύπου sc-Si διαστάσεων 5cmX5cm με τη μεταλλική βάση (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας)



Εικόνα 4.10: Φ/β στοιχείο τύπου sc-Si διαστάσεων 5cmX5cm (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας)

Στο Σχ. 4.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα της μεταβολής των μετρήσεων της T_c από το θερμοζεύγος σε σχέση με το χρόνο.



Σχήμα 4.4: Απόκριση των μετρήσεων θερμοζεύγους συναρτήσει με το χρόνο

Η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4, μπορεί να περιγραφεί με την εξής μαθηματική σχέση εξ.(4.3):

$$T_c = T_{c,0}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.3)$$

όπου $\lambda=1/\tau$ και τ η σταθερά χρόνου η οποία περιγράφεται ως εξής:

Η ταχύτητα απόκρισης του θερμοζεύγους με την οποία προσεγγίζει την αληθή τιμή της θερμοκρασίας, καθορίζεται από την σταθερά χρόνου. Όταν το $t=\tau$, η τιμή στον άξονα y έχει προσεγγίσει το 63.2% της τελικής του τιμής. Όταν $t=5\tau$, η αντίστοιχη τιμή στον άξονα y έχει προσεγγίσει το 99.3% της τελικής τιμής.

3. Datalogger CR1000

Ο καταχωρητής Datalogger CR 1000 της Campbell Scientific που δίδεται στην Εικ. 4.11 είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων με ικανότητα παροχής μετρήσεων ακριβείας και εκτέλεσης προγράμματος. Το λογισμικό χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του υπολογιστή με τον καταχωρητή, LoggerNet Ver.3.4, και δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο κατά την εκτέλεση του πειράματος καθώς και τη συλλογή δεδομένων σε μορφή txt αρχείων για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Με ενσωματωμένο αισθητήρα ο datalogger έχει τη δυνατότητα καταγραφής της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, T_a , στον χώρο των πειραμάτων.



Εικόνα 4.11: Datalogger συνδεδεμένος σε υπολογιστή (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας).

Οι μετρήσεις λαμβάνονται ανά δευτερόλεπτο δίνοντας για κάθε φορά μέγεθος ρεύματος i_{sc} ή τάσης V_{oc} . Κάθε δύο δευτερόλεπτα λαμβάνεται ένα ζεύγος τιμών i_{sc} και V_{oc} , καθώς και η αντίστοιχη θερμοκρασία T_c του φ/β στοιχείου και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_a .

Οι μετρήσεις οι οποίες λαμβάνουμε, είναι εξής:

1. Timerstamp: η χρονική στιγμή στην οποία έγινε η μέτρηση
2. i_{sc} (mA): το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης.
3. V_{oc} (mV): η μετρούμενη τάση ανοιχτού κυκλώματος.
4. T_c (°C): η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου.
5. T_a (°C): η θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο χώρο των πειραμάτων.

Οι μετρήσεις στο σύστημα αυτό, λόγω της χρήσης του Datalogger για τη λήψη μετρήσεων, γίνεται ακαριαία με αποτέλεσμα να μην απαιτείται διόρθωση στα δεδομένα, λόγω παρέμβασης του πειραματιστή.

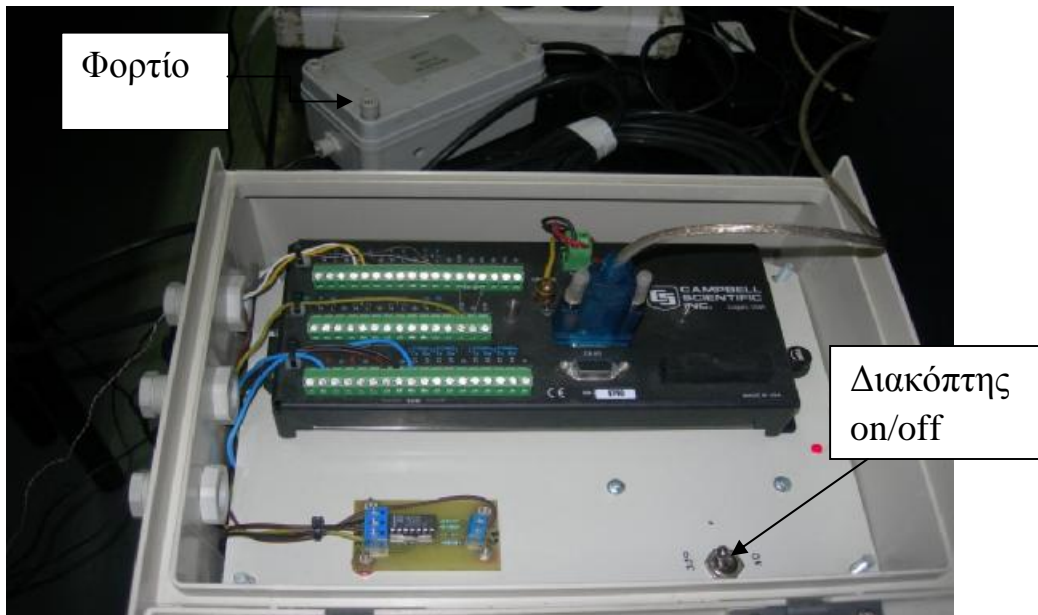
4. Μεταλλική βάση

Το φ/β στοιχείο είναι τοποθετημένο σε σταθερή μεταλλική βάση όπως φαίνεται στην Εικ.4.9 Πίσω από το φ/β στοιχείο είναι τοποθετημένος ανεμιστήρας ώστε να ψύχεται αρχικά το στοιχείο, ιδιαίτερα στις πολύ κοντινές αποστάσεις όπου η θερμοκρασία αυξάνεται πολύ και με γρήγορο ρυθμό. Αυτό είναι αναγκαίο ώστε τα πειράματα να διεξάγονται σε ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας.

Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Με αυτή τη πειραματική διαδικασία διεξήχθη μια σειρά πειραμάτων, για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας μεταβάλλοντας την απόσταση στοιχείου-λαμπτήρα.

Η πρώτη σειρά μετρήσεων ξεκινά από απόσταση 570cm μεταξύ λαμπτήρα-στοιχείου. Με αυτή τη πειραματική διάταξη και τη χρήση Datalogger γινόταν λήψη μετρήσεων κάθε δευτερόλεπτο των τιμών της τάσης V_{oc} , ρεύματος i_{sc} και θερμοκρασίας T_c του στοιχείου. Τη στιγμή έναυσης της λάμπας άνοιγα το διακόπτη και μετά από 10 περίπου δευτερόλεπτα (5 ζεύγη τιμών ρεύματος-τάσης) κλείνουμε το διακόπτη, που φαίνεται στην Εικ.4.12. Η τελευταία μέτρηση γίνεται και πάλι σε απόσταση 40cm.



Εικόνα 4.12:Datalogger (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας).

Με το πέρας κάθε μέτρησης και την διακοπή του φωτισμού του στοιχείου ενεργοποιείται ο μικρός ανεμιστήρας και ψύχεται το φ/β στοιχείο, ώστε για κάθε απόσταση η μέτρηση να γίνεται για την ίδια αρχική θερμοκρασία T_c .

4.3 ΛΗΨΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ I-V.

Στο κεφάλαιο 2.1 έγινε αναφορά στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φ/β στοιχείου. Με τη χρήση του Datalogger έγιναν μετρήσεις τάσεως και ρεύματος για διάφορα φορτία.

Ο Datalogger χρησιμοποιεί σύστημα μεταβλητού φορτίου για τις μετρήσεις που απαιτούνται για τη χάραξη της χαρακτηριστική I-V, το οποίο φαίνεται στην Εικ.4.12. Η λήψη ζευγών τιμών τάσης και έντασης ρεύματος έγιναν ανά 1 sec. Οι μετρήσεις για τη λήψη της I-V έγιναν και για τα 3 φ/β στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μετρήσεις μας, τύπου sc-Si διαστάσεων 5cmX5cm, τύπου pc-Si διαστάσεων 6cmX6cm και τύπου sc-Si διαστάσεων 11cmX11cm για απόσταση λαμπτήρα-στοιχείου 2m. Ο λαμπτήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ίδιος λαμπτήρας ιωδίνης-αλογόνου, ο οποίος περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.1 και ο οποίος στα 2m απόσταση δίδει ένταση ακτινοβολίας 47.58W/m², όπως μετρήθηκε με τον αισθητήρα ακτινοβολίας (irradiance sensor) τύπου Si.

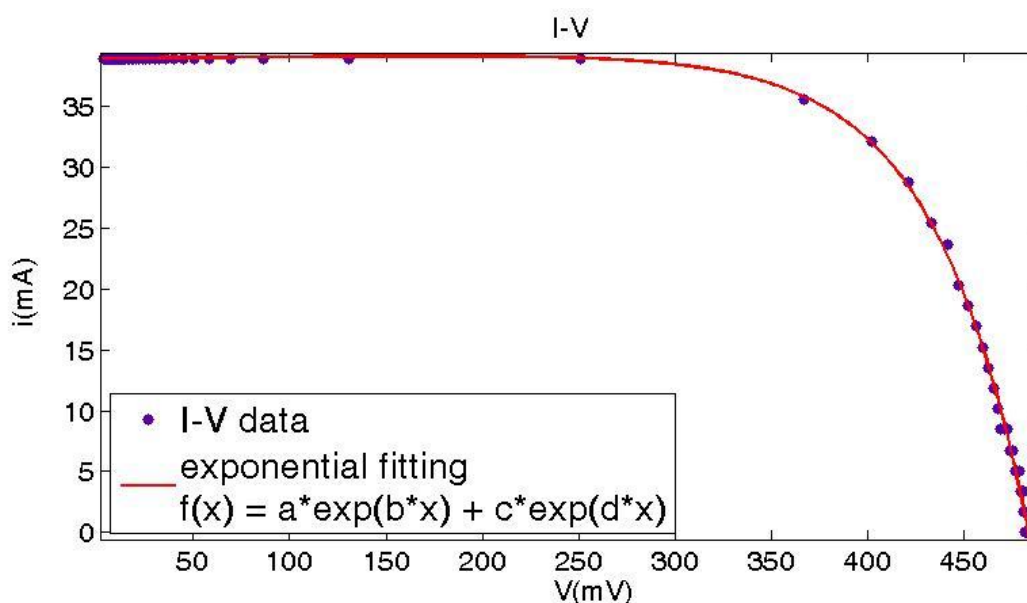
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι πειραματικές μετρήσεις ελήφθησαν σύμφωνα με τις πειραματικές διαδικασίες οι οποίες περιγράφηκαν στα κεφάλαια 4.1 και 4.2. Στη συνέχεια τα δεδομένα επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν σύμφωνα με την θεωρητική ανάλυση της μεθόδου όπως αυτή παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 Πείραμα 3.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων επιτεύχθηκε με το λογισμικό MATLAB 2011b και το curve fitting toolbox, με το οποίο χαράχθηκαν τα διαγράμματα που ακολουθούν και εξήχθησαν τα αποτελέσματα των R_s και m .

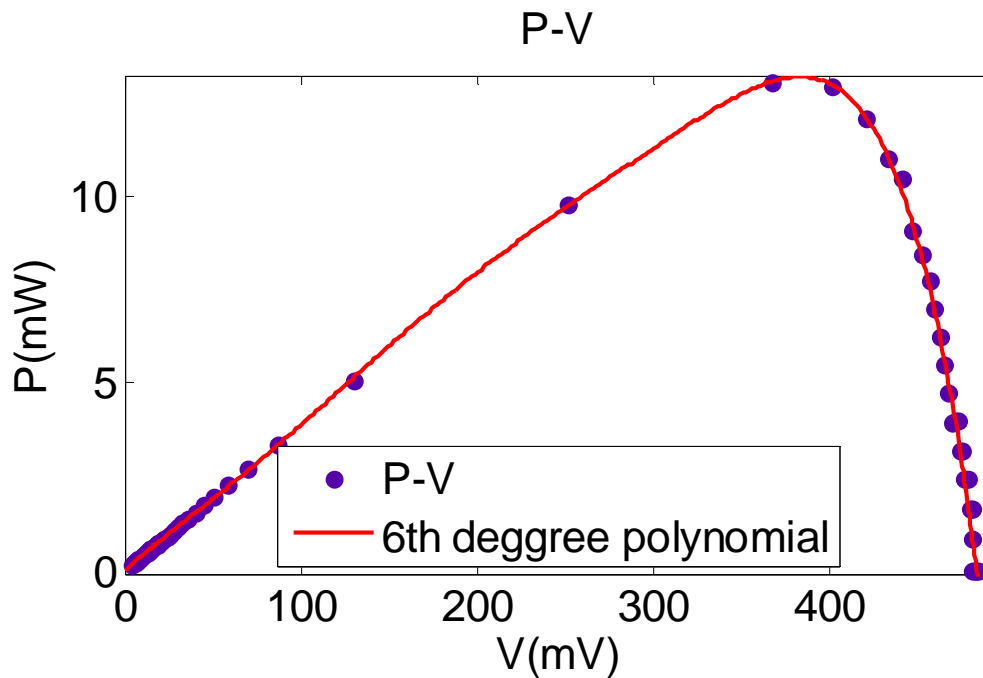
5.1 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΤΥΠΟΥ pc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 6cmX6cm

Το φ/β στοιχείο τύπου pc-Si διαστάσεων 6cmX6cm μελετήθηκε με το απλό σύστημα, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.2. Για το στοιχείο ελήφθη η χαρακτηριστική καμπύλη I-V με το ηλεκτρονικό σύστημα που περιγράφηκε στο Κεφ.4.3 η οποία δίδεται στο Σχ.5.1.



Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V του pc-Si διαστάσεων 6cmx6cm στοιχείου, που ελήφθη στο εργαστήριο των ΑΠ.Ε.

Στο Σχ. 5.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος P συναρτήσει της τάσης V του ίδιου στοιχείου.



Σχήμα 5.2: Καμπύλη P-V του pc-Si στοιχείου $6\text{cm} \times 6\text{cm}$, όπου φαίνεται η πολυωνυμική προσαρμογή 6^{ου} βαθμού στα πειραματικά σημεία.

Η χαρακτηριστική αυτή ελήφθη για θερμοκρασία στοιχείου $T_c=39^\circ\text{C}$ και από το Σχ. 5.2 προσδιορίζονται οι τιμές $P_m=13.1\text{W}$ για $i_m=29.2\text{mA}$ και $V_m=383\text{mV}$. Επίσης η τάση ανοιχτού κυκλώματος του στοιχείου είναι $V_{oc}=484.1\text{mV}$ και το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι $i_{sc}=38.88\text{mA}$. Ο συντελεστής πλήρωσης FF είναι 0.59, σύμφωνα με την εξ.(2.1). Το αναμενόμενο αποτέλεσμα για συντελεστή πλήρωσης είναι 0.6-0.8 για καινούρια στοιχεία, δηλαδή παρουσιάζει ένα συντελεστή πλήρωσης στα ανεχτά πλαίσια.

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν για την χάραξη της καμπύλης I-V και της P-V δίδονται στον Πίνακα I του Παραρτήματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το μήνα Ιούνιο, με αποτέλεσμα την υψηλή θερμοκρασία T_c .

Με βάση την απόσταση πηγής-στοιχείου υπολογίσθηκε κάθε φορά η ένταση ακτινοβολίας I_T της λάμπας. Έγινε μικρή διόρθωση των τιμών της τάσης με βάση της εξ.(2.4) λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας T_c , η οποία επηρεάζει την τάση όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 2.3, όπου η $T_0=9.4^\circ\text{C}$, που είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία που είχε το στοιχείο στο πείραμα και την οποία ορίζουμε σαν σημείο αναφοράς για την μετατροπή της τάσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σειρά των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο, γεγονός που εξηγεί τη χαμηλή αυτή θερμοκρασία. Τα δεδομένα που εξάγουμε από το πείραμα δίνονται στον Πίνακα II του Παραρτήματος.

Από τις μετρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει το διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$. Βάσει του διαγράμματος σχεδιάζουμε την εφαιτομένη της καμπύλης στο πεδίο των αρχικών πειραματικών σημείων, που δίδονται στον

Πίν.5.1. Η ευθεία αυτή μας δίνει τις τιμές του φωτορεύματος i_{ph} και οι οποίες είναι ανάλογες της ακτινοβολίας I_T .

Πίνακας 5.1: Αρχικά πειραματικά σημεία

Μετρήσεις	$V_{oc}(mV)$	$i_{sc}(mA)$
1	328	56.4
3	333	61.1
8	349	72.5

Με βάση τη θεωρία των ελαχίστων τετραγώνων, η εφαπτομένη είναι εξίσωση της μορφής ευθείας ελαχίστων τετραγώνων, η οποία δίδεται από την εξ.(5.1)

$$f(x) = p1*x + p2 \quad (5.1)$$

όπου $p1=1.476[mA*m^2/W]$ και ανήκει στο πεδίο τιμών (0.9736, 1.978) με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και $p2=-1.366[mA]$ στο πεδίο τιμών (-4.696, 1.964).

Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχ.5.3 προκύπτει μέσω επεξεργασίας και μετρήσεων στο MATLAB και παρουσιάζει συντελεστή συσχέτισης $R^2=0.9993$, όπου το R^2 χαρακτηρίζεται το πόσο καλή είναι η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης που έχει γίνει στα πειραματικά δεδομένα. Η εξίσωση της καμπύλης η οποία χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζει σχεδόν άριστη προσαρμογή, διότι μια άριστη προσαρμογή δίνει $R^2=1$ και η τιμή του κυμαίνεται [0,1].

Το R δίνεται από την εξ.(5.2).

$$R = \frac{N(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)}{\sqrt{(N(\Sigma x^2) - (\Sigma x)^2)(N(\Sigma y^2) - (\Sigma y)^2)}} \quad (5.2)$$

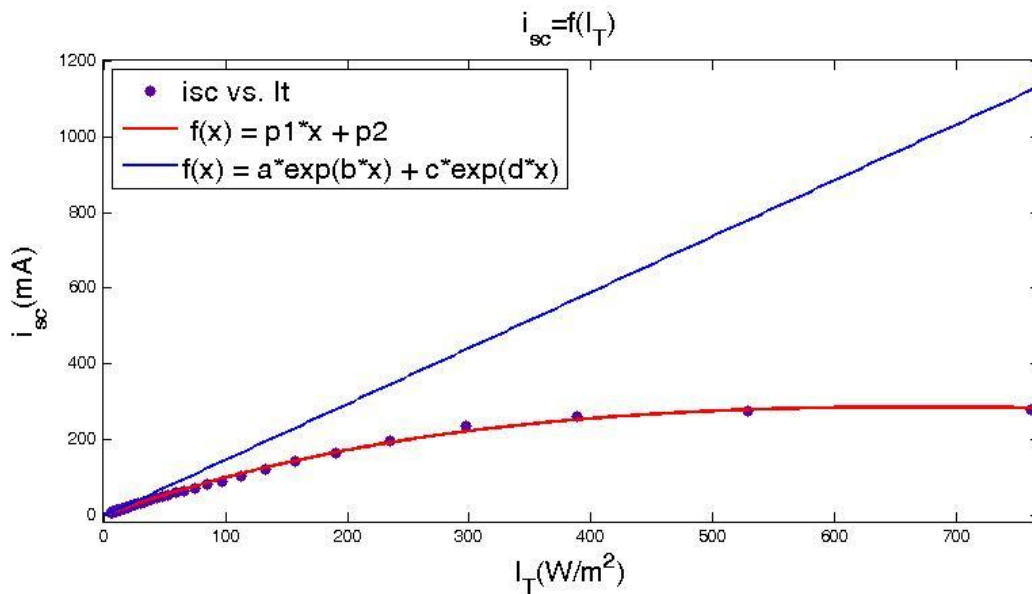
Το πεδίο τιμών από το επίπεδο εμπιστοσύνης για μία εξίσωση δίνονται δίνεται από την σχέση (Matlab).

$$C = b \pm t(sqr(S)) \quad (5.3)$$

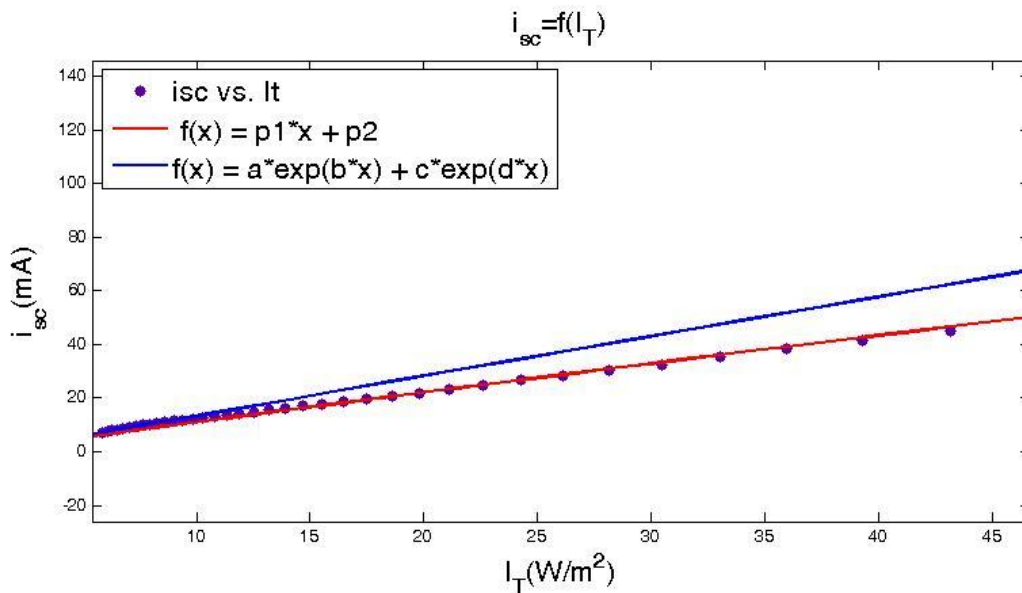
Όπου b είναι παράμετρος που δίνεται από τη προσαρμογή, το t εξαρτάται από το επίπεδο εμπιστοσύνης και το $S=(X*X^T)^{-1}s^2$, όπου s^2 το σφάλμα στο τετράγωνο.

Στο Σχ.5.4 φαίνεται το διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$ του Σχ.5.3 εστιασμένο στην περιοχή των αρχικών τιμών, όπου φαίνεται η χάραξη της εφαπτόμενης, στο

πεδίο των πρώτων πειραματικών μετρήσεων, σε χαμηλές εντάσεις ακτινοβολίας I_T .



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$, και η εφαπτόμενη $i_{ph}=f(I_T)$ στα αρχικά σημεία, όπου η μαθηματική αυτή έκφραση $f(x)=a*\exp(b*x)+c*\exp(d*x)$, συμφωνεί με την εξ.(2.7) του μοντέλου δύο διόδων



Σχήμα 5.4: Παρουσίαση του διαγράμματος του Σχ.5.3 στη περιοχή των αρχικών τιμών όπου φαίνεται η χάραξη της εφαπτομένης στο πεδίο των πρώτων πειραματικών μετρήσεων.

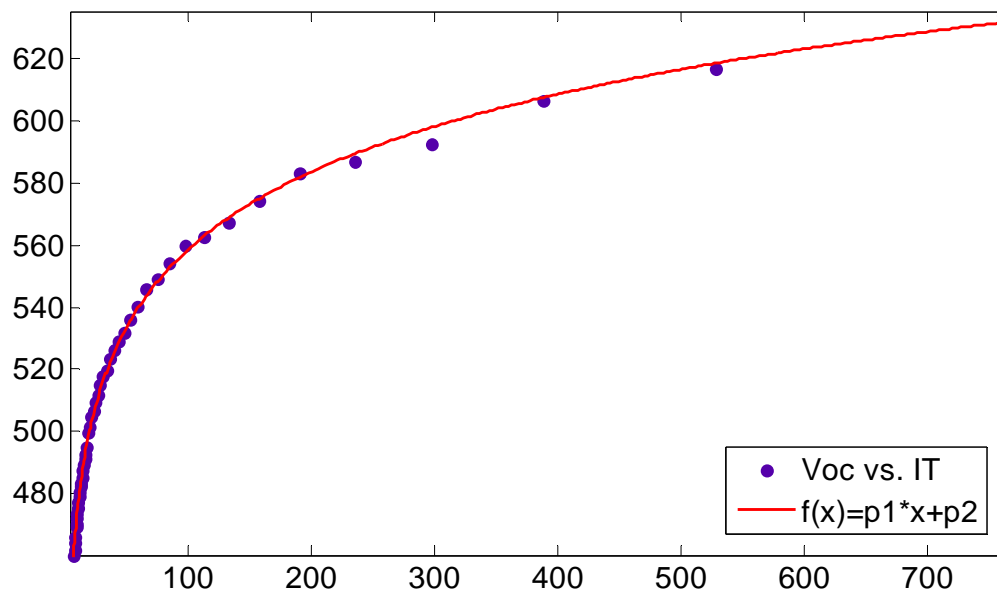
5.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ, m

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή ιδεατότητας m σχεδιάζεται το διάγραμμα των τιμών V_{oc} συναρτήσει της έντασης I_T , βάσει των μετρήσεων που παρατίθενται στον Πίνακα II του παραρτήματος όπως φαίνεται στο Σχ.5.5. Με χρήση του curve fitting toolbar στο Matlab γίνεται προσαρμογή καμπύλης της μορφής που δίδεται στην εξ.(5.4) στα δεδομένα με χρήση του curve fitting του Matlab.

$$f(x)=p1*\ln(x)+p2 \quad (5.4)$$

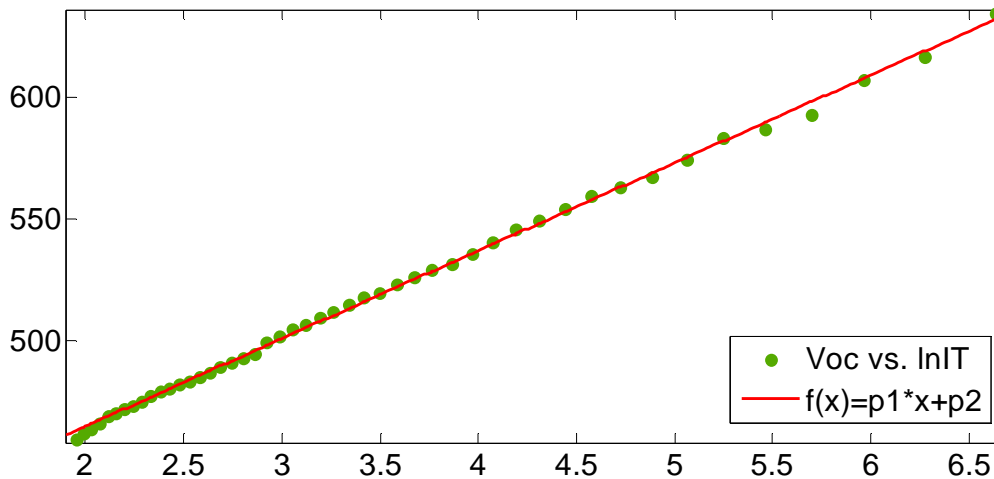
όπου $p1=35.99[mV]$ ανήκει στο πεδίο τιμών (35.61, 36.36) και $p2=-354.4[mV]$ που ανήκει στο πεδίο τιμών (344.3, 364.4) με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Ο συντελεστής R^2 της καμπύλης είναι $R^2=0.9988$ η οποία είναι μία σχεδόν άριστη προσαρμογή στα δεδομένα μας. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.2 γίνεται διόρθωση της τάσης V_{oc} λόγω αύξησης της θερμοκρασίας των στοιχείων T_c με βάση την εξ.(2.3). Συνεπώς προκύπτει η διορθωμένη τιμή τάσης $V_{oc,corr}$. Στο γράφημα του Σχ.5.5 καθώς και στην ανάλυση που ακολουθεί, ως V_{oc} εννοείται ότι έχει ληφθεί η διορθωμένη τιμή $V_{oc,corr}$.



Σχήμα 5.5: Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} , συναρτήσει της έντασης της ακτινοβολίας, I_T .

Εναλλακτικά ο προσδιορισμός του p_1 μπορεί να επιτευχθεί σχεδιάζοντας το διάγραμμα V_{oc} συναρτήσει του λογαρίθμου I_T , όπως παρουσιάζεται στο Κεφ.3. Οπότε σχεδιάζεται ευθεία ελαχίστων τετραγώνων της μορφής $f(x)=p_1 \cdot x+p_2$ που διέρχεται από τα πειραματικά σημεία και φαίνονται στο Σχ.5.6. Η κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων δίνει $p_1=35.99[mV]$.



Σχήμα 5.6: Η τάση ανοιχτού κυκλώματος συναρτήσει του λογαρίθμου της έντασης της ακτινοβολίας.

Με βάση το συντελεστή $p_1=35.99[mV]$ που υπολογίστηκε προσδιορίζουμε τον συντελεστή ιδεατότητας m με βάση την εξ.(5.5).

$$p_1 = \frac{mkT_m}{q} \Rightarrow m = \frac{p_1 q}{kT_m} = \frac{35.99[V] \cdot 10^{-3} \cdot 1.602[C] \cdot 10^{-19}}{1.38 \left[\frac{J}{K} \right] \cdot 297.5[K] \cdot 10^{-23}} = 1.4 \quad (5.5)$$

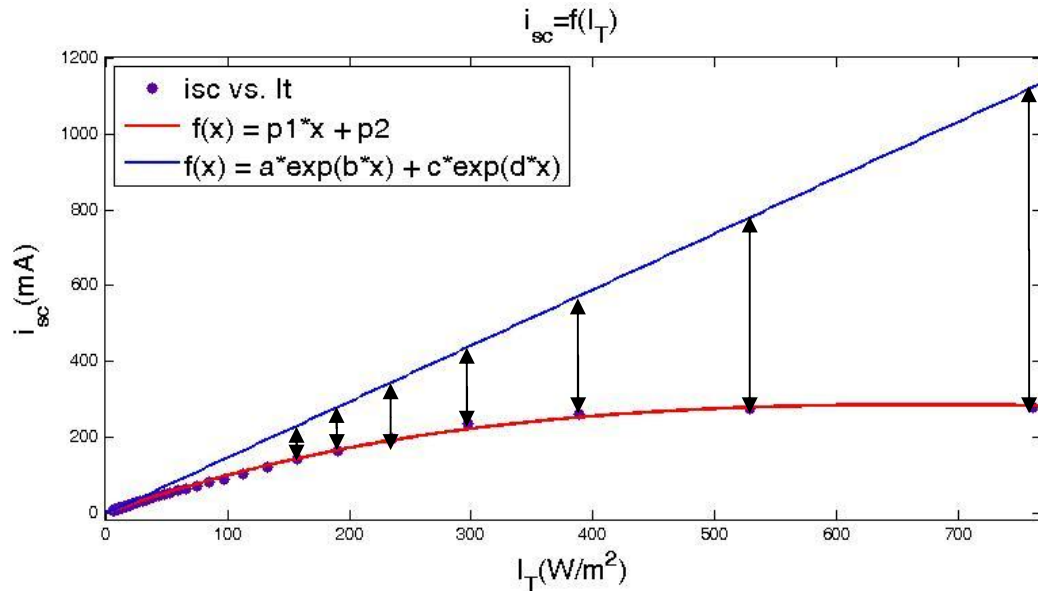
όπου το φορτίο του ηλεκτρονίου $q=1.602 \cdot 10^{-19}[C]$, η σταθερά του Boltzman $k=1.38 \cdot 10^{-23}[J/K]$, μέση θερμοκρασία στοιχείο: $T_m=24.5+273=297.5[K]$

Σύμφωνα με το πεδίο διακυμάνσεως που ορίζει η κλίση p_1 , τα αντίστοιχα όρια του συντελεστή ιδεατότητας m είναι $[1.39, 1.42]$.

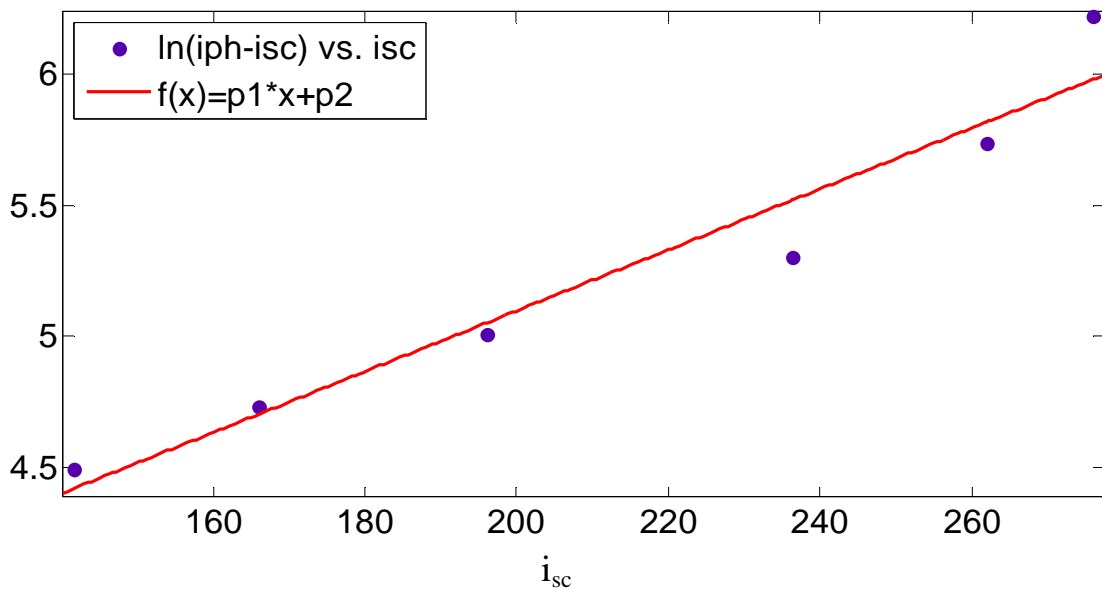
5.1.2.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ, R_s

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφ.3, το φωτόρευμα υπολογίζεται με βάση την εφαπτομένη της καμπύλης $i_{sc}=f(I_t)$ στα πρώτα πειραματικά σημεία.

Παίρνοντας τη διαφορά του φωτορεύματος και της μετρούμενης έντασης του ρεύματος βραχυκύκλωσης ($i_{ph}-i_{sc}$) όπως φαίνεται στο Σχ.5.7, υπολογίζουμε τον αντίστοιχο λογάριθμο για τον υπολογισμό της εσωτερικής αντίστασης του φ/β στοιχείου. Κατόπιν σχεδιάζεται το διάγραμμα $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ όπως φαίνεται στο Σχ.5.8 στο οποίο εφαρμόζεται μία ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που διέρχεται από τα σημεία και δίδεται από την εξ.(5.6).



Σχήμα 5.7: Οι διαφορές ρεύματος βραχυκύκλωσης i_{sc} και φωτοτεύματος i_{ph} για τον υπολογισμό του λογαρίθμου της διαφοράς τους $\ln(i_{ph}-i_{sc})$.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα της λογαριθμικής διαφοράς φωτορεύματος-ρεύματος βραχυκύκλωσης $\ln(i_{ph}-i_{sc})$ και του ρεύματος βραχυκυκλώματος

$$f(x) = p1 * x + p2 \quad (5.6)$$

όπου $p1=0.01164[\text{mA}^{-1}]$ ανήκει σε πεδίο τιμών (0.007663, 0.01561) και $p2=2.77$ και ανήκει σε πεδίο τιμών (1.901, 3.639) με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 της καμπύλης είναι $R^2=0.9429$ που υποδηλώνει μια καλή τιμή προσαρμογής θεωρητικής καμπύλης στα πειραματικά δεδομένα.

Με βάση την κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ $p1=0.01164[\text{mA}^{-1}]$ υπολογίζουμε την εν σειρά αντίσταση R_s σύμφωνα με την εξ (5.7).

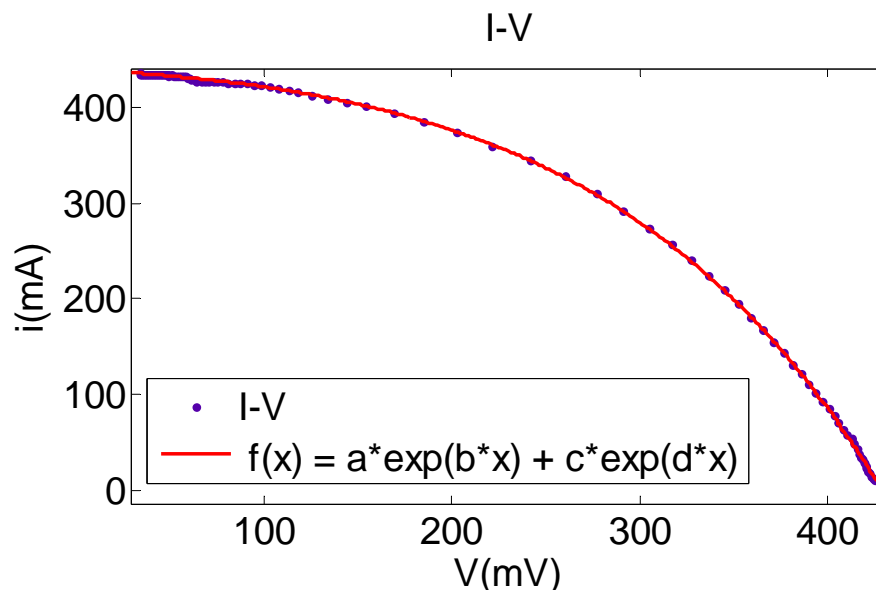
$$p_1 = \frac{qR_s}{mkT_m} \Rightarrow R_s = \frac{p_1 mkT_m}{q} = \frac{0.01164 [\text{A}^{-1}] 1.38 \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right] 297.5 [\text{K}] 1.4 \cdot 10^{-23}}{1.602 \cdot 10^{-22}} = 0.41 \Omega \quad (5.7)$$

Σύμφωνα με το πεδίο τιμών της $p1$ για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% το πεδίο τιμών της εν σειρά αντίστασης υπολογίζεται σε [0.27,0.55].

5.2 ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΤΥΠΟΥ sc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11cmX11cm ΜΕ ΑΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

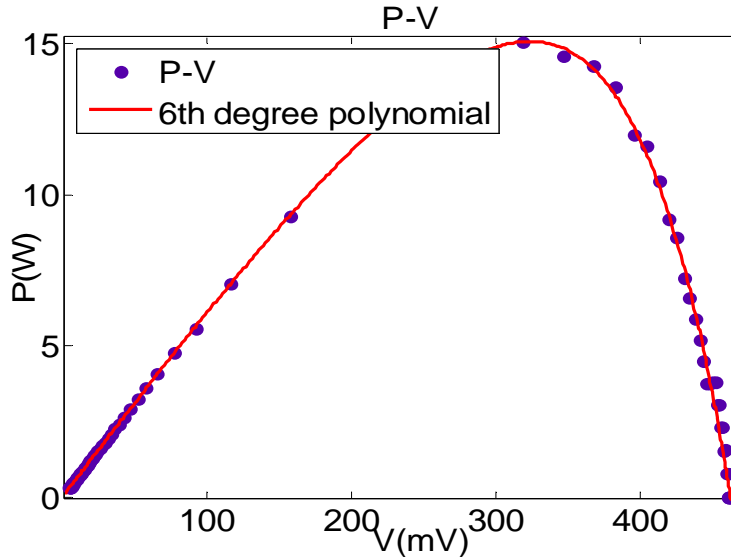
Το φ/β στοιχείο sc-Si 11cmX11cm μελετήθηκε με το απλό σύστημα, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.2. Για το στοιχείο ελήφθη η χαρακτηριστική καμπύλη I-V με το ηλεκτρονικό σύστημα που περιγράφηκε στο Κεφ.4.3, η οποία δίδεται στο Σχ. 5.9.

Για το στοιχείο αυτό η χαρακτηριστική I-V του είναι η εξής:



Σχήμα 5.9: Χαρακτηριστική I-V του sc-Si στοιχείου 11cmx11cm.

Στο Σχ. 5.10 παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος P συναρτήσει της τάσης V.



Σχήμα 5.10: Καμπύλη P-V του sc-Si στοιχείου 11cmx11cm, όπου φαίνεται η πολυωνυμική προσαρμογή 6^{ου} βαθμού στα πειραματικά σημεία.

Η- χαρακτηριστική αυτή ελήφθη για θερμοκρασία στοιχείου $T_c=39^\circ\text{C}$ και από το σχ.5.10 προσδιορίζονται οι τιμές $P_m=85.6\text{mW}$ για $i_m=309\text{mA}$ και $V_m=276.9\text{mV}$. Επίσης η τάση ανοιχτού κυκλώματος του στοιχείου είναι $V_{oc}=428.1\text{mV}$ και το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι $i_{sc}=436.2\text{mA}$. Ο συντελεστής πλήρωσης είναι 0.46, σύμφωνα με την εξ.(2.1). Το αναμενόμενο αποτέλεσμα για συντελεστή πλήρωσης FF είναι 0.6-0.8 για καινούρια στοιχεία, δηλαδή παρουσιάζει ένα αρκετά χαμηλό συντελεστή πλήρωσης, FF, κυρίως λόγω των εμφανών στοιχείων γήρανσης, τα οποία θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 6.

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν για τη χάραξη της καμπύλης I-V και της P-V δίδονται στον Πίνακα III του Παραρτήματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το μήνα Ιούνιο, με αποτέλεσμα την υψηλή θερμοκρασία T_c .

Με βάση την απόσταση λαμπτήρα-στοιχείου υπολογίστηκε η ένταση ακτινοβολίας I_T της λάμπας. Έγινε μικρή διόρθωση των τιμών της τάσης με βάση της σχ.2.4 λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας T_c , η οποία επηρεάζει τη τάση όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 2.3, όπου η $T_c=9.4^\circ\text{C}$ η χαμηλότερη θερμοκρασία που είχε το στοιχείο στο πείραμα και την οποία ορίζουμε ως σημείο αναφοράς για την μετατροπή της τάσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σειρά των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο το οποίο και εξηγεί τη χαμηλή θερμοκρασία.

Τα δεδομένα που εξάγουμε από το πείραμα δίνονται στον Πίνακα IV του Παραρτήματος.

Από τις μετρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει το διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$. Βάσει του διαγράμματος σχεδιάζουμε την εφαιτομένη της καμπύλης στο πεδίο των αρχικών πειραματικών σημείων, που δίδονται στον Πίν.5.2. Η ευθεία αυτή μας δίνει τις τιμές του φωτορεύματος i_{ph} και οι οποίες είναι ανάλογες της ακτινοβολίας I_T .

Πίνακας 5.2: Αρχικά πειραματικά σημεία

Μετρήσεις	$V_{oc}(mV)$	$i_{sc}(mA)$
1	450	7.31
3	453	7.88
4	455	8.33

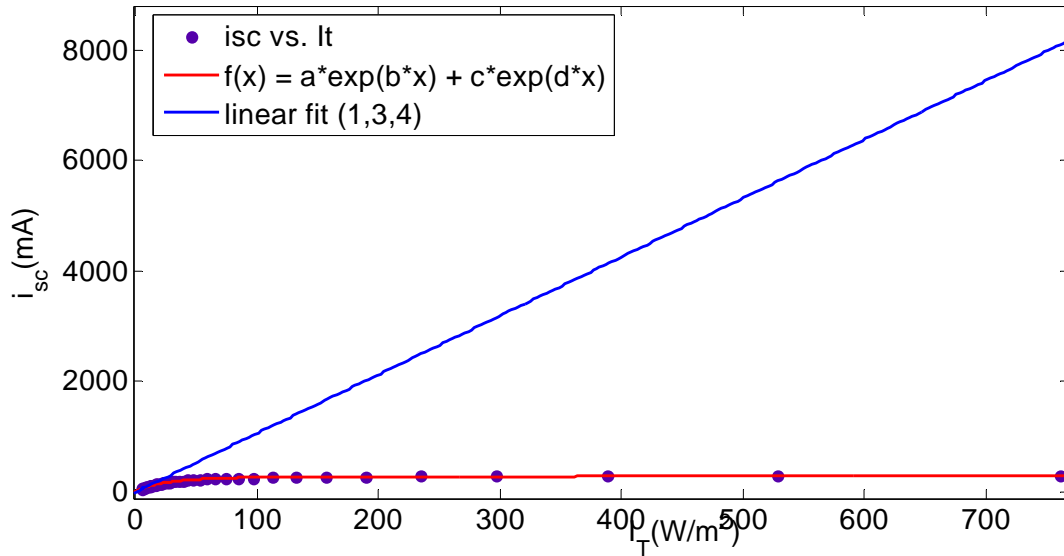
Με βάση τη θεωρία των ελαχίστων τετραγώνων η εφαιτομένη έχει εξίσωση της μορφής της εξ.(5.8).

$$f(x) = p1 * x + p2 \quad (5.8)$$

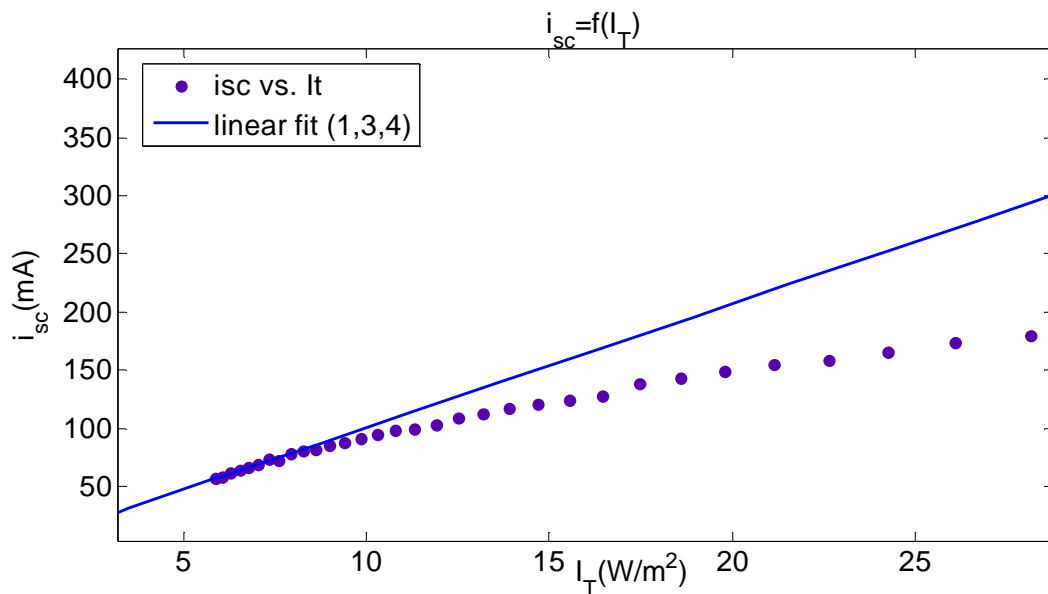
όπου $p1=10.64[mA * m^2/W]$ που ανήκει στο πεδίο τιμών (8.593, 12.69) και $p2=-5.913[mA]$ σε πεδίο τιμών (-18.67, 6.849) με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχ.5.11 προκύπτει μέσω επεξεργασίας των μετρήσεων στο MATLAB και παρουσιάζει συντελεστή συσχέτισης $R^2=0.9998$, όπου το R^2 χαρακτηρίζει το πόσο καλή είναι η προσαρμογή της μαθηματικής σχέσης που έχει γίνει στα πειραματικά δεδομένα.

Στο Σχ.5.12 φαίνεται το διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$ του Σχ.5.11 εστιασμένο στην περιοχή των αρχικών τιμών, όπου φαίνεται η χάραξη της εφαιτομένης στο πεδίο των πρώτων πειραματικών μετρήσεων.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$, και η εφαπτόμενη $i_{ph}=f(I_T)$ στα αρχικά σημεία.



Σχήμα 5.12: Παρουσίαση του διαγράμματος Σχ.5.11 στη περιοχή των αρχικών τιμών όπου φαίνεται η χάραξη της εφαπτομένης στο πεδίο των πρώτων πειραματικών μετρήσεων.

5.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ, m

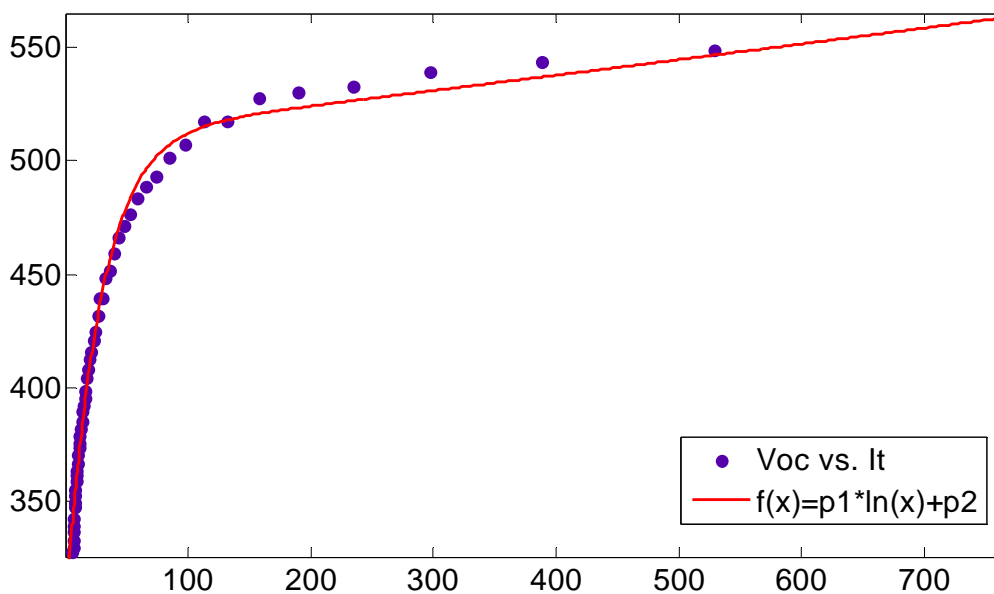
Για τον προσδιορισμό του συντελεστή ιδεατότητας σχεδιάζεται το διάγραμμα των τιμών V_{oc} συναρτήσει της έντασης I_T στο Σχ.5.13 βάσει των στοιχείων που παρατίθενται στον Πίνακα IV του Παραρτήματος. Με τη χρήση

του curve fitting toolbox στο Matlab γίνεται προσαρμογή στα πειραματικά σημεία της καμπύλης της μορφής που δίδεται στην εξ.(5.9) όπως φαίνεται στο Σχ.(5.13).

$$f(x)=p1*\ln(x)+p2 \quad (5.9)$$

όπου $p1=52.96[\text{mV}]$ με όρια σιγουριάς 95% (50.04, 55.88) και $p2=-250.1[\text{mV}]$ με όρια σιγουριάς (239.7, 260.5).

Η R^2 της καμπύλης είναι 0.9629 η οποία είναι μια καλή προσαρμογή στα δεδομένα μας. Στα γραφήματα και την ανάλυση που ακολουθεί όπου V_{oc} θα εννοείται ότι έχει ληφθεί υπόψιν η διορθωμένη τιμή $V_{oc,corr}$.



Σχήμα 5.13: Η τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} , συναρτήσει της έντασης της Ακτινοβολίας, I_T .

Με βάση το συντελεστή $p1=52.96[\text{mV}]$ που υπολογίστηκε από την προσαρμοσμένη καμπύλη, προσδιορίζουμε τον συντελεστή ιδεατότητας m με βάση την εξ.(5.10).

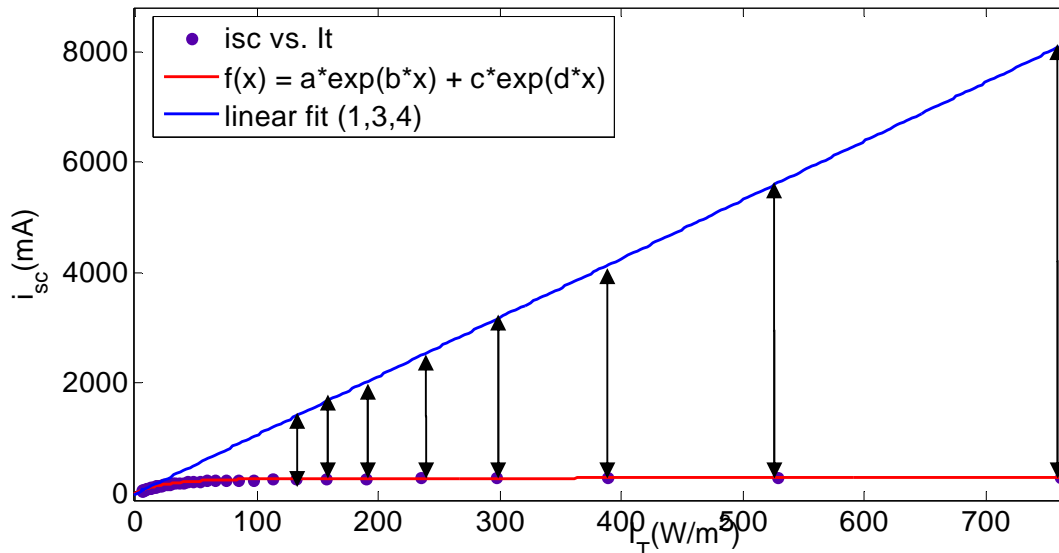
$$p1 = \frac{mkT_m}{q} \Rightarrow m = \frac{p1q}{kT_m} = \frac{52.96[\text{V}] \cdot 10^{-3} \cdot 1.602[\text{C}] 10^{-19}}{1.38 \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right] 286[\text{K}] 10^{-23}} = 2.1 \quad (5.10)$$

όπου το φορτίο του ηλεκτρονίου $q=1.602 \cdot 10^{-19}[\text{C}]$, η σταθερά του Boltzmann $k=1.38 \cdot 10^{-23}[\text{J/K}]$, μέση θερμοκρασία στοιχείο: $T_m=13+273=286[\text{K}]$.

Σύμφωνα με τα όρια που ορίζει η κλίση $p1$, το πεδίο τιμών του συντελεστή ιδεατότητας m είναι [2, 2.26]

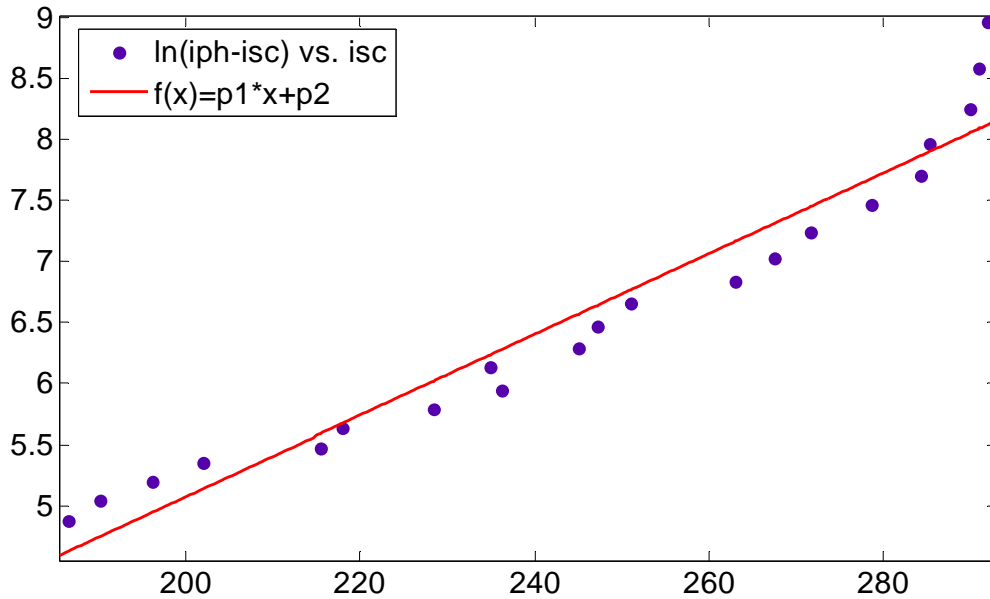
5.2.2.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ, R_s

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.3 το φωτόρρευμα υπολογίζεται με βάση την εφαπτομένη της καμπύλης $i_{sc}=f(I_t)$ στα πρώτα πειραματικά σημεία, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.14.



Σχήμα 5.14: Οι διαφορές ρεύματος βραχυκύκλωσης i_{sc} και φωτορεύματος i_{ph} ώστε να υπολογίσουμε το λογάριθμό τους.

Υπολογίζουμε την λογαριθμική διαφορά του φωτορεύματος και της μετρούμενης έντασης του ρεύματος $\ln(i_{ph}-i_{sc})$ για τον υπολογισμό της εσωτερικής αντίστασης του φ/β στοιχείου. Κατόπιν σχεδιάζεται το διάγραμμα $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ όπως φαίνεται στο Σχ.5.15.



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα της λογαριθμικής διαφοράς ρεύματος βραχυκυκλώματος-φωτορεύματος και του ρεύματος βραχυκυκλώματος.

Η προσαρμογή που έγινε στο διάγραμμα του Σχ. 5.15 είναι ευθείας ελαχίστων τετραγώνων της μορφής που δίδεται από την εξ.(5.11).

$$f(x) = p1 * x + p2 \quad (5.11)$$

όπου $p1=0.0299 \text{ [mA}^{-1}\text{]}$ με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (0.02713, 0.03268) και $p2=-0.839$ με επίπεδο εμπιστοσύνης (-1.515, -0.1626).

Η R^2 της καμπύλης είναι 0.9368 η οποία είναι μια καλή τιμή για προσαρμογή στα δεδομένα μας.

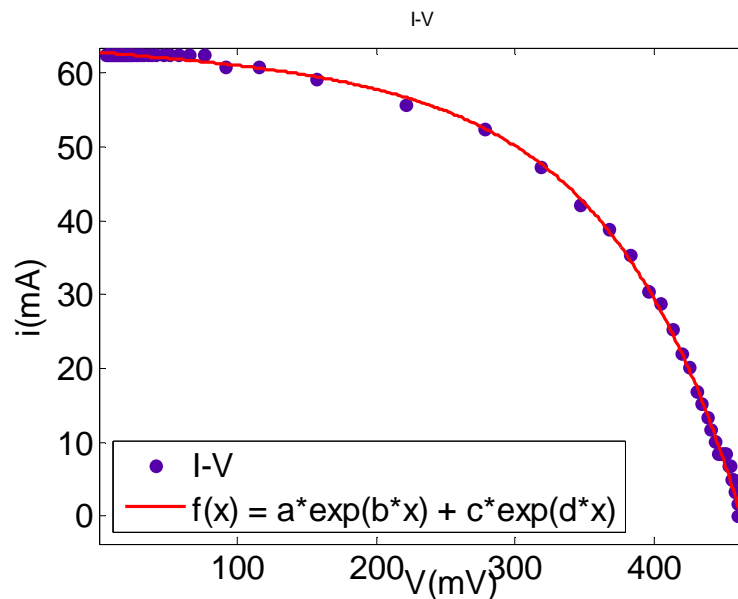
Με τη κλίση του διαγράμματος $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ η οποία είναι $p1=0.0299[\text{mA}^{-1}]$ υπολογίζουμε την εν σειρά αντίσταση R_s σύμφωνα με τη εξ.(5.12).

$$p1 = \frac{qR_s}{mkT_m} \Rightarrow R_s = \frac{p1mkT_m}{q} = \frac{0.0299[\text{A}^{-1}]1.38\left[\frac{\text{J}}{\text{K}}\right]286[\text{K}]\cdot 2.1\cdot 10^{-23}}{1.602\cdot 10^{-22}} = 1.54\Omega \quad (5.12)$$

Σύμφωνα με το πεδίο τιμών της $p1$ του Σχ.5.15, τα αντίστοιχα όρια της εν σειρά αντίστασης είναι [1.4, 1.69] για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Το φ/β στοιχείο sc-Si 11cmX11cm παρουσιάζει μια μεγάλη τιμή σε σχέση με την αναφερόμενη στο Κεφάλαιο 2.3 Πίν.2.1. Το ζήτημα αυτό θα αναλυθεί στο Κεφ.6.

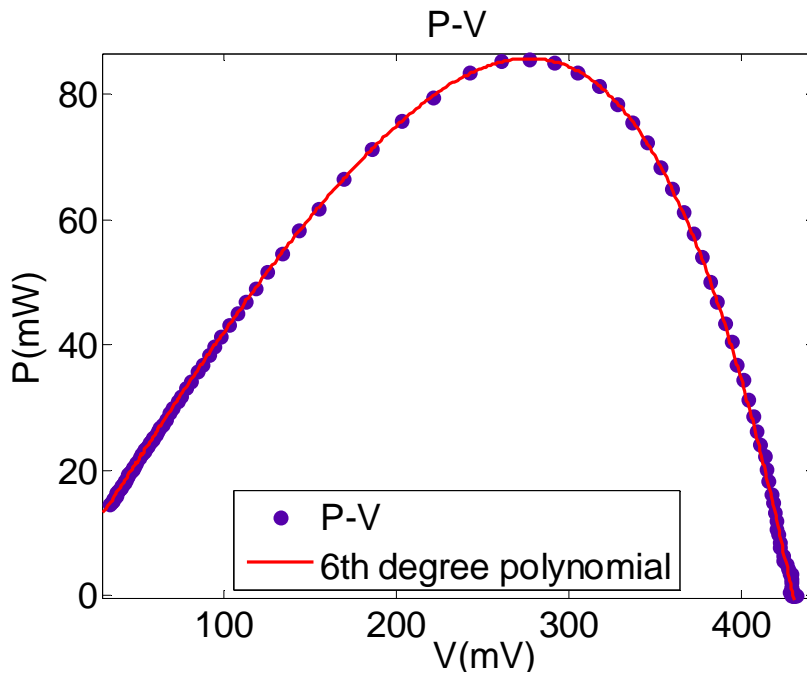
5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΤΥΠΟΥ sc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 5cmX5cm ΜΕ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το φ/β στοιχείο 5cmX5cm sc-Si μελετήθηκε με το αυτοματοποιημένο σύστημα, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.2. Για το στοιχείο ελήφθη η χαρακτηριστική καμπύλη I-V με το ηλεκτρονικό σύστημα που περιγράφεται στο Κεφ.4.3, η οποία δίδεται στο Σχ.5.16.



Σχήμα 5.16: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για το φ/β στοιχείο τύπου sc-Si διαστάσεων 5cmx5cm.

Στο Σχ. 5.17 παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος P συναρτήσει της τάσης V, του ίδιου στοιχείου.



Σχήμα 5.17: Καμπύλη P-V για το φ/β στοιχείο τύπου sc-Si στοιχείο διαστάσεων 5cmx5cm, όπου φαίνεται η πολυωνυμική προσαρμογή 6^{ου} βαθμού στα πειραματικά σημεία.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ελήφθη σε συνθήκες θερμοκρασίας στοιχείου 40°C και από το Σχ.5.17. προσδιορίζονται οι τιμές $P_m=15.1\text{mW}$ για $i_m=46.6\text{mA}$ και $V_m=324\text{mV}$. Επίσης η τάση ανοικτού κυκλώματος του στοιχείου είναι $V_{oc}=461.9\text{mV}$ και το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι $i_{sc}=62.57\text{mA}$. Ο συντελεστής πλήρωσης FF είναι 0.52, σύμφωνα με την εξ.(2.1). Το αναμενόμενο αποτέλεσμα για συντελεστή FF είναι 0.6-0.8 για καινούρια στοιχεία, κάτι που δηλώνει σημάδια γήρανσης ή κατασκευαστικά ελαττώματα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το μήνα Ιούνιο, με αποτέλεσμα του χρόνου την υψηλή θερμοκρασία.

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν για την χάραξη της καμπύλης I-V και της P-V δίδονται στον Πίνακα V του Παραρτήματος. Και οι μετρήσεις που ελήφθησαν βρίσκονται στον Πίνακα VI του Παραρτήματος.

Με βάση την απόσταση υπολογίζουμε την ένταση ακτινοβολίας I_T της λάμπας. Έγινε μικρή διόρθωση των τιμών της τάσης με βάση τη σχέση 2.4 λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας η οποία παρέμενε στα ίδια επίπεδα λόγω της χρήσης του μικρού ανεμιστήρα ώστε να ψύχεται το στοιχείο.

Από τις μετρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει το διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$ του Σχ.5.18. Βάσει του διαγράμματος σχεδιάζουμε την εφαιτομένη της καμπύλης στο πεδίο των αρχικών πειραματικών σημείων, που δίδονται στον Πίν.5.3. Η ευθεία αυτή μας δίνει τις τιμές του φωτορεύματος i_{ph} και οι οποίες είναι ανάλογες της ακτινοβολίας I_T .

Πίνακας 5.3: Αρχικά πειραματικά σημεία

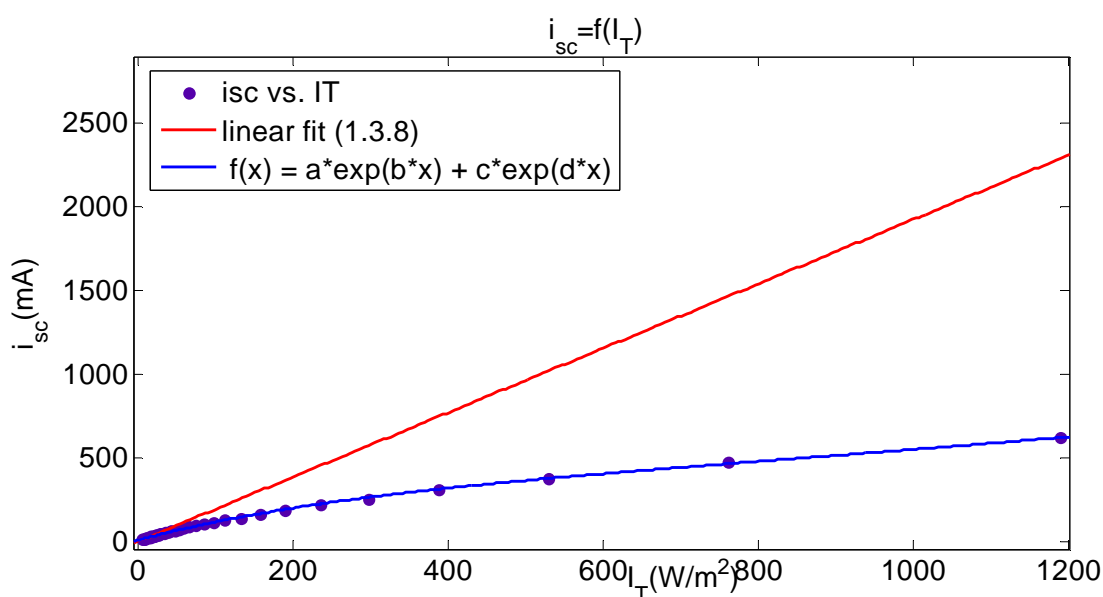
Μετρήσεις	i_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)
1	10.15	313.60
3	10.15	323
8	13.53	346.7

Με βάση τη θεωρία των ελαχίστων τετραγώνων, η εφαπτομένη είναι εξίσωση της μορφής ευθείας ελαχίστων τετραγώνων:

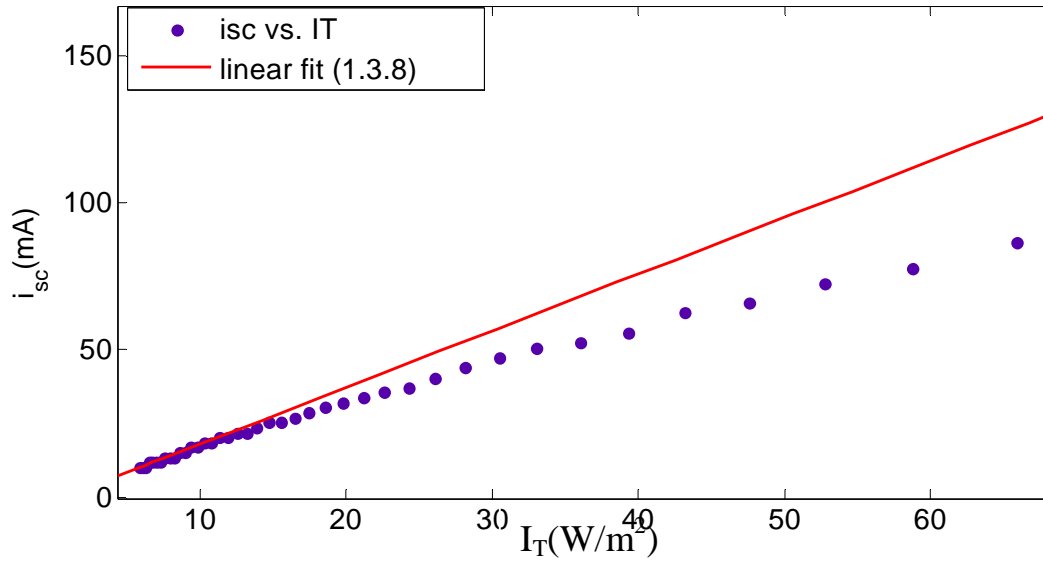
$$f(x) = p1*x + p2 \quad (5.13)$$

όπου $p1=2.074[\text{mA}*\text{m}^2/\text{W}]$ και ανήκει στο πεδίο 95% (-4.362,8.509) και $p2=-2.384[\text{mA}]$ με πεδίο τιμών (-45.05, 40.28)

Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχ.5.18 προκύπτει μέσω επεξεργασίας των μετρήσεων στο MATLAB και παρουσιάζει συντελεστή συσχέτισης $R^2=0.9437$, που αντιστοιχεί σε μια καλή προσαρμογή της εξ.(5.12) στα δεδομένα. Στο Σχ.5.19 παρουσιάζεται το Σχ.5.18 εστιασμένο στην περιοχή των αρχικών τιμών, όπου φαίνεται η χάραξη της εφαπτομένης στο πεδίο των πρώτων πειραματικών μετρήσεων.



Σχήμα 5.18: Διάγραμμα $i_{sc}=f(I_T)$, και η εφαπτόμενη $i_{ph}=f(I_T)$ στα αρχικά σημεία, όπου η μαθηματική αυτή έκφραση $f(x)=a*\exp(b*x)+c*\exp(d*x)$, συμφωνεί με την εξ.(2.7) του μοντέλου δύο διόδων



Σχήμα 5.19: Παρουσίαση του διαγράμματος του Σχ.5.18 στην περιοχή των αρχικών τιμών, όπου φαίνεται η χάραξη της εφαπτομένης στο πεδίο των πρώτων πειραματικών μετρήσεων.

5.3.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΔΕΑΤΟΤΗΤΑΣ, m

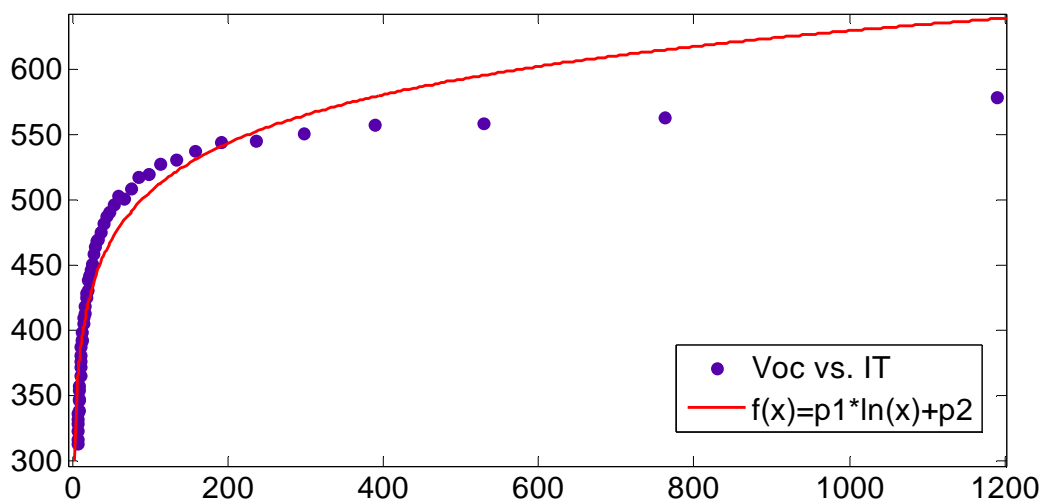
Για το προσδιορισμό του συντελεστή ιδεατότητας m σχεδιάζεται το διάγραμμα των τιμών V_{oc} συναρτήσει της έντασης I_T βάσει των μετρήσεων που παρατίθενται στον Πίνακα VI του Παραρτήματος. Με χρήση του curve fitting toolbox στο Matlab γίνεται προσαρμογή καμπύλης της μορφής που δίδεται στην εξ.(5.14) στα δεδομένα.

$$f(x)=p1*\ln(x)+p2 \quad (5.14)$$

όπου $p1=53.51[mV]$ ανήκει στο πεδίο τιμών (48.76, 58.26) και $p2=-354.4[mV]$ στο πεδίο τιμών (344.3, 364.4) με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Ο συντελεστής R^2 της καμπύλης είναι 0.9077 η οποία είναι μια σχεδόν καλή τιμή για προσαρμογή στα δεδομένα μας. Παρατηρούμε από το Σχ. 5.20 ότι η προσαρμογή της καμπύλης δεν είναι καλή, έχει κάποια απόκλιση από τα τελευταία δεδομένα. Αυτή η απόκλιση θα συζητηθεί στο Κεφάλαιο 6.

Καθώς στην αυτοματοποιημένη διάταξη χρησιμοποιείται ο ανεμιστήρας για την ψύξη του στοιχείου στην αρχική θερμοκρασία, η ανάγκη για διόρθωση της τάσης είναι πολύ μικρή. Αυτό φαίνεται από τη σύγκριση των τιμών V_{oc} και $V_{oc,corr}$ του Πίνακα VI του Παραρτήματος.



Σχήμα 5.20: η τάση ανοιχτού κυκλώματος συναρτήσει της έντασης της ακτινοβολίας.

Με βάση το συντελεστή $p_1=53.51[\text{mV}]$ του διαγράμματος που υπολογίστηκε, προσδιορίζουμε τον συντελεστή ιδεατότητας m με βάση την εξ.(5.15).

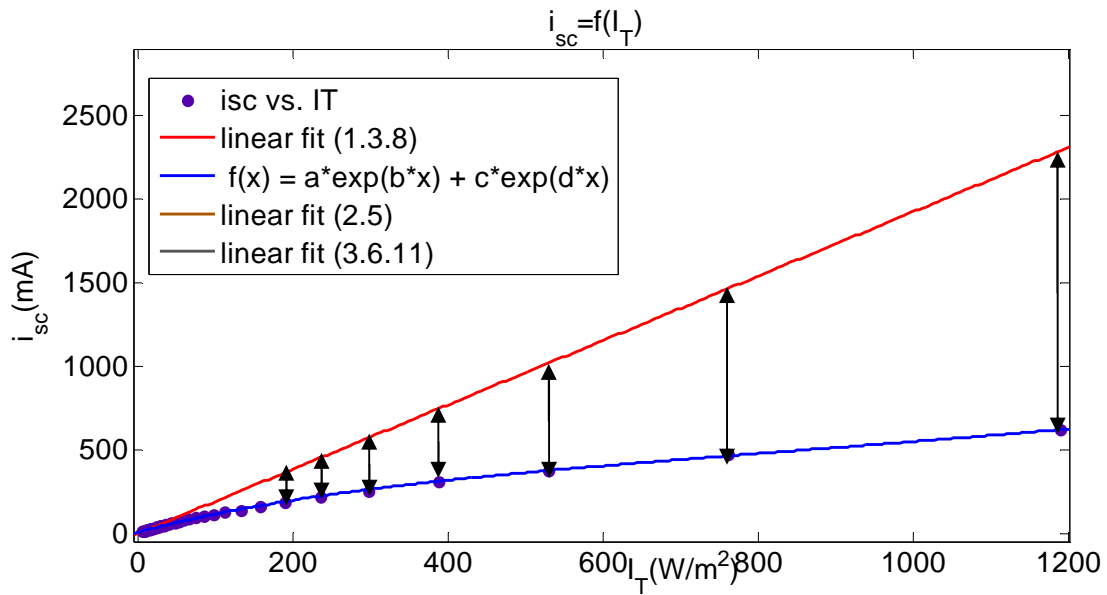
$$p_1 = \frac{mkT_m}{q} \Rightarrow m = \frac{p_1 q}{kT_m} = \frac{53.51[\text{V}] \cdot 10^{-3} \cdot 1.602[\text{C}] \cdot 10^{-19}}{1.38 \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right] 297.5[\text{K}] \cdot 10^{-23}} = 2.1 \quad (5.15)$$

όπου το φορτίο ηλεκτρονίου $q=1.602 \cdot 10^{-19}[\text{C}]$, σταθερά του Boltzman $k=1.38 \cdot 10^{-23}[\text{J/K}]$, μέση θερμοκρασία στοιχείο: $T_m=24.5+273=297.5[\text{K}]$

Σύμφωνα με το πεδίο διακύμανσης που ορίζει η κλίση p_1 , τα αντίστοιχα όρια του συντελεστή ιδεατότητας m είναι $[1.9, 2.27]$.

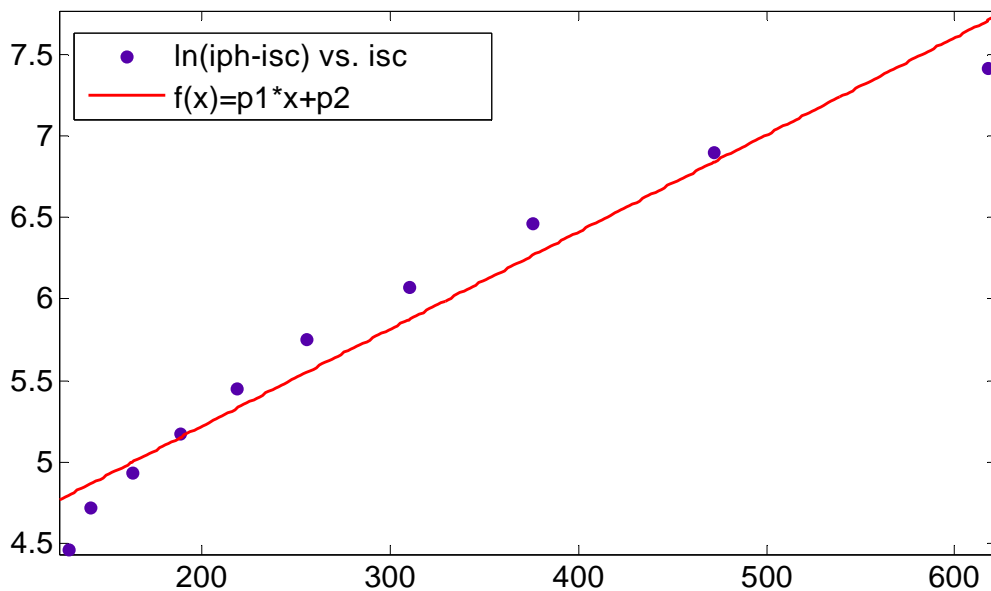
5.3.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ, R_s

Το φωτόρευμα υπολογίζεται με βάση την εφαπτομένη της καμπύλης $i_{sc}=f(I_t)$ στα πρώτα πειραματικά σημεία (Σχ. 5.21)



Σχήμα 5.21: Οι διαφορές ρεύματος βραχυκύκλωσης i_{sc} και φωτορεύματος i_{ph} ώστε να υπολογίσουμε το λογάριθμό τους.

Υπολογίζουμε την λογαριθμική διαφορά του φωτορεύματος και της μετρούμενης έντασης του ρεύματος βραχυκύκλωσης, $\ln(i_{ph} - i_{sc})$, για τον υπολογισμό της εσωτερικής αντίστασης του φ/β στοιχείου. Κατόπιν σχεδιάζεται το διάγραμμα $\ln(i_{ph} - i_{sc}) = f(i_{sc})$ όπως φαίνεται στο Σχ.5.22.



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα της λογαριθμικής διαφοράς φωτορεύματος-ρεύματος βραχυκύκλωσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων του Σχ.5.22 είναι της μορφής που δίδεται από την εξ.(5.16).

$$f(x) = p_1 \cdot x + p_2 \quad (5.16)$$

όπου $p_1=0.00533[\text{mA}^{-1}]$ με όρια σιγουριάς 95% (0.004416, 0.006243) και $p_2=4.417$ με όρια σιγουριάς (3.699, 4.357).

Ο συντελεστής R^2 της καμπύλης είναι 0.9582, η οποία είναι μια πολύ καλή τιμή για προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα.

Με τη κλίση του διαγράμματος $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ (Σχ.5.22), η οποία είναι $p_1=0.00596[\text{mA}^{-1}]$ υπολογίζουμε την εν σειρά αντίσταση R_s σύμφωνα με τη εξ.(5.17).

$$p_1 = \frac{qR_s}{mkT_m} \Rightarrow R_s = \frac{p_1 mkT_m}{q} = \frac{0.00533 [\text{A}^{-1}] 1.38 \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right] 297.5 [\text{K}] \cdot 2.1 \cdot 10^{-23}}{1.602 \cdot 10^{-22}} = 0.28 \Omega \quad (5.17)$$

Σύμφωνα με το πεδίο τιμών της p_1 για το επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, το πεδίο τιμών της εν σειρά αντίστασης υπολογίζεται σε [0.23, 0.34].

6.ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα πειράματα τα οποία περιγράφηκαν έως και την ανάλυση που έγινε, η εκτέλεση των πειραμάτων απαιτεί μεγάλη εμπειρία πέρα από την προσοχή που απαιτείται να επιδείξει κανείς, ώστε να πάρει αποτελέσματα έγκυρα, αξιόπιστα και να εξοικειωθεί με τη χρήση των πειραματικών οργάνων και τη πειραματική διαδικασία.

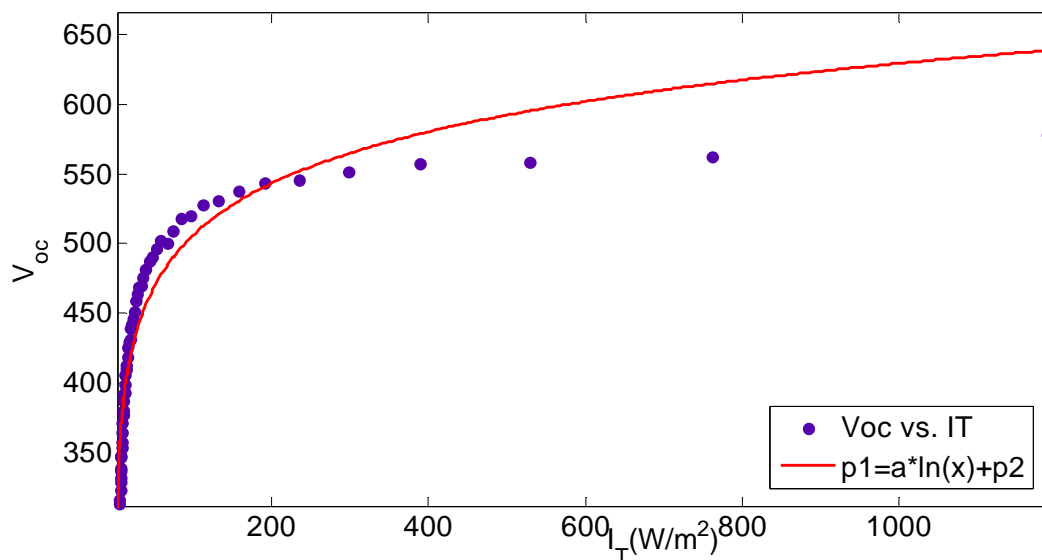
Γι' αυτό το λόγο, πριν από τα πειράματα που περιγράφονται στην παρούσα πτυχιακή εργασία, έγιναν 2 σειρές πειραμάτων με διάφορα φ/β στοιχεία και υπό διαφορετικές συνθήκες ώστε να αποκτηθεί εμπειρία.

6.1 Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ sc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 5cmX5cm ΜΕ ΤΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Με το αυτοματοποιημένο σύστημα λήψης μετρήσεων, ελαχιστοποιείται το ανθρώπινο σφάλμα, διότι οι μετρήσεις καταγράφονται αυτόματα κάθε

δευτερόλεπτο από το Datalogger και απουσιάζει ο υποκειμενικός παράγοντας κατά την ανάγνωση, καταγραφή και λήψη μετρήσεων.

Στο διάγραμμα τάσης V_{oc} συναρτήσεως του λογαρίθμου της έντασης ακτινοβολίας I_T που παρουσιάστηκε στο Σχ.5.20, τα δεδομένα του πειράματος ακολουθούν τη γενική μορφή της προσαρμοσμένης καμπύλης $y=a*\ln(x)+c$ μέχρι τα τελευταία 9 σημεία, τα οποία αποκλίνουν από τη προσαρμοσμένη καμπύλη και αντιστοιχούν σε αποστάσεις στοιχείου-λαμπτήρα από 40cm έως 140cm. Παρατηρούμε από το Σχ.6.1 ότι όσο αυξάνει η ένταση της ακτινοβολίας αυξάνει και η διαφορά της προσαρμοσμένης καμπύλης με τα δεδομένα (Karlanı et al,2011).



Σχήμα 6.1: Διαφορές των τιμών μετρούμενης τάσης και τάσης της εφαρμοσμένης καμπύλης $y=a*\ln(x)+c$.

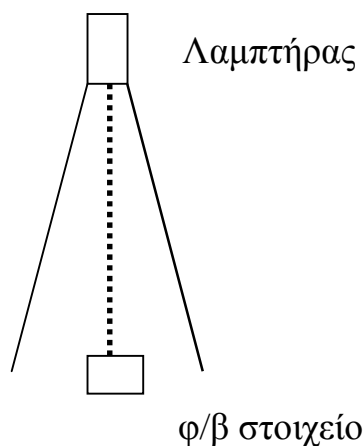
Η διαφορά ανάμεσα στις τιμές της προσαρμοσμένης καμπύλης και των δεδομένων στις κοντινές αποστάσεις, δηλαδή για μεγάλες εντάσεις ακτινοβολίας, οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την καταγραφή των δεδομένων το στοιχείο δεν είχε προλάβει να αποκτήσει τη θερμοκρασία που θα είχε εάν βρισκόταν σε θερμική ισορροπία, η οποία θα ήταν $T_c=T_a+0.03*I_T$. Για παράδειγμα για ένταση ακτινοβολίας $1,189.5W/m^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_a=25.4^{\circ}C$, η θερμοκρασία σε θερμική ισορροπία υπολογίζεται $T_c=61^{\circ}C$. Σύμφωνα με τη θερμοκρασία $T_c=61^{\circ}C$, η διόρθωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος υπολογίζεται σύμφωνα με την εξ.(2.3) $dV_{oc}/dT=83[mV]$. Αυτής της τάξεως είναι και η διαφορά που παρατηρείται ανάμεσα στη θεωρητική (προσαρμοσμένη καμπύλη) και την αντίστοιχη πειραματική τιμή για αυτήν την ένταση ακτινοβολίας όπως φαίνεται στο Σχ.6.1. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η προσαρμοσμένη καμπύλη προσεγγίζει την αναμενόμενη

πραγματική τιμή καθώς όπως φαίνεται στο Σχ.6.1 το μεγάλο πλήθος των πειραματικών δεδομένων στις μακρινές αποστάσεις, για τις οποίες η διόρθωση λόγω θερμοκρασίας θα ήταν μικρή, καθορίζει τη προσαρμοσμένη καμπύλη.

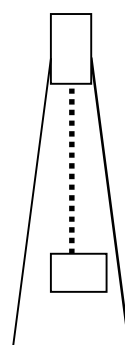
Από τις μετρήσεις που συλλέγουμε από το Datalogger παρατηρούμε ότι σε αυτά τα σημεία το πρόγραμμα δίνει πρώτα την ένταση i_{sc} και έπειτα την τάση V_{oc} . Αυτή η καθυστέρηση της τάξης του 1 δευτερολέπτου είναι αρκετή για να υποστεί η τάση μείωση της τάξεως αυτής όπως αναφέρεται στην εργασία (Karlanı et al,2011).

Μια βελτίωση της πειραματικής μεθόδου, οπότε και των πειραματικών αποτελεσμάτων όπου αυτά θα μπορούσαν να συγκλίνουν περισσότερο στα θεωρητικά, είναι να παραμείνει ανοιχτός ο ανεμιστήρας καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Έστω ότι κατά το πείραμα παρουσιάζεται κάποιο μικρό σφάλμα στην ευθυγράμμιση λαμπτήρα-φ/β στοιχείου όπως απεικονίζεται στα Σχ.6.2 και Σχ.6.3. Παρατηρούμε ότι το κέντρο της φωτεινής δέσμης της λάμπας δεν προσπίπτει στο κέντρο του στοιχείου. Αυτό σε μεγάλη απόσταση (Σχ. 6.2) δεν επηρεάζει τόσο τις μετρήσεις καθώς: α) η δέσμη του φωτός καλύπτει όλο το στοιχείο ομοιόμορφα και β) η σχετική μεταβολή λόγω απόστασης από τον άξονα ή σφάλματος της απόστασης κατά dr θα δεχθεί μεγάλη διόρθωση σε μακρινή απόσταση σε σύγκριση με μια κοντινή.



Σχήμα 6.2



Σχήμα 6.3

Πιο συγκεκριμένα. Η ακτινοβολία της λάμπας σε κάθε θέση δίνεται από τον τύπο $I_T = \lambda/r^2$. Οπότε το σφάλμα της ακτινοβολίας ως προς την απόσταση είναι:

$$\frac{\delta I_T}{\delta r} = \frac{\delta \lambda \frac{1}{r^2}}{\delta r} = -\frac{2\lambda}{r^3} \quad (6.1)$$

Και τελικά το σφάλμα στις μετρήσεις για την ακτινοβολία είναι

$$\frac{\delta I_T}{I_T} = \frac{-\lambda \frac{2}{r^3} \delta r}{\lambda \frac{1}{r^2}} = -\frac{2}{r} \delta r \quad (6.2)$$

Ο βαθμονομημένος κανόνας έχει διακριτική ικανότητα 1cm. Επομένως το σφάλμα μέτρησης της απόστασης λαμπτήρα-στοιχείου είναι $\pm 0.5\text{cm}$.

Για την κοντινή απόσταση 100cm το σφάλμα είναι σύμφωνα με τα παραπάνω $\pm(0.5\text{cm}/100)*100\%=0.5\%$. Οπότε σύμφωνα με την εξ.(6.2) προκύπτει $\delta I_T/I_T=2*0.5\%=1\%$. Λόγω της γραμμικής αναλογίας ανάμεσα στην ένταση ακτινοβολίας I_T και την ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης i_{sc} , ισχύει ότι $\delta i_{sc}/i_{sc}=1\%$.

Όσον αφορά κατά πόσο επηρεάζει το σφάλμα της απόστασης r την τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} , δηλαδή πόσο είναι το δV_{oc} λόγω της μεταβολής της απόστασης της r κατά δr , προκύπτει από την εξ.(6.3) (Καπλάνης,2004).

$$V_{oc} = \frac{mkT_m}{q} \ln(I_T) = \frac{mkT_m}{q} \ln\left(\frac{i_{sc}}{I_0}\right) \quad (6.3)$$

Σύμφωνα με την εξ.(6.3) προκύπτει η εξ.(6.4).

$$\delta V_{oc} = \frac{mkT_m}{q} \frac{\delta i_{sc}}{i_{sc}} \quad (6.4)$$

Για $\delta i_{sc}/i_{sc}=1\%$ και $\frac{mkT_m}{q}=0.026[\text{mV}]$, σύμφωνα με την εξ.(6.4) το $\delta V_{oc}=0.026\%$. Για αυτής της τάξεως σφάλμα αν το $V_{oc}=500\text{mV}$ τότε το αντίστοιχο σφάλμα της μέτρησης είναι 0.13mV. Όμως για μικρή απόσταση λαμπτήρα-στοιχείου όπου $\delta i_{sc}/i_{sc}=10\%$, τότε το σφάλμα είναι $\delta V_{oc}=0.26\%$ και το $\delta V_{oc}=1.3\text{mV}$.

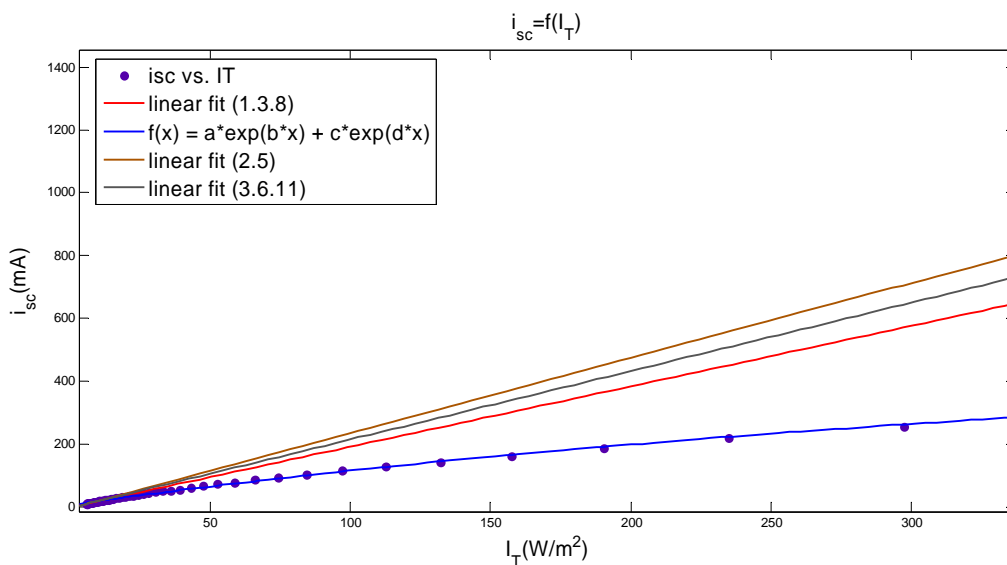
Τούτο δείχνει ότι το σφάλμα στην απόσταση λαμπτήρα-στοιχείου και στην εκκεντρότητα ολίγον επηρεάζει το σφάλμα στον προσδιορισμό της V_{oc} . Συνεπώς ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά το σφάλμα των μετρήσεων τάσης ανοικτού κυκλώματος V_{oc} είναι η καθυστέρηση μέτρησης έστω και κατά 1 δευτερόλεπτο, καθώς η T_c αυξάνεται αμέσως όταν το στοιχείο φωτίζεται.

Ο συντελεστής ιδεατότητας $m=2.1$ που προκύπτει από την κλίση του διαγράμματος $V_{oc}=f(\ln I_T)$ σύμφωνα με την εξ.(5.14) είναι μια επιτρεπτή τιμή με όρια τιμών [1.9, 2.27].

Το διάγραμμα του Σχ.5.22 λαμβάνεται για λογαριθμικές διαφορές του φωτορεύματος και του ρεύματος βραχυκύκλωσης για μετρήσεις σε σημεία με εμφανή την διαφορά μεταξύ των τιμών, όπως φαίνεται Σχ.5.21, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα κατά τον υπολογισμό της εν σειρά αντίστασης R_s . Συγκριμένα λαμβάνουμε τη λογαριθμική διαφορά για τα σημεία στα οποία

αντιστοιχούν οι αποστάσεις φ/β στοιχείου-λαμπτήρα 40cm-130cm και εντάσεις ακτινοβολίας αντίστοιχα 112.6W/m^2 - 1189.5W/m^2 .

Η εφαπτομένη στο Σχ.5.18 επίσης επηρεάζει τα αποτελέσματα του πειράματος. Αν επιλέγαμε κάποια άλλη εφαπτομένη όπως η εφαπτομένη στα σημεία (2.5) ή στα σημεία (3,6,11) του Σχ.6.4 τα αποτελέσματα της εν σειρά αντίστασης R_s θα προέκυπταν 0.3 και 0.31 αντίστοιχα. Η επιλογή της εφαπτομένης έγινε με πολύ προσοχή ώστε να εφάπτεται όσο το δυνατόν καλύτερα στα αρχικά πειραματικά σημεία. Η εκτίμηση αυτή είναι από τα ευπαθή σημεία της μεθόδου αυτής. Πράγματι όλες οι μέθοδοι που έχουν δημοσιευτεί, η κάθε μία χωριστά έχει εγγενή ασθενή σημεία. Για αυτό το λόγο, τα αποτελέσματα της εν σειρά αντίστασης R_s παρουσιάζουν το εύρος τιμών, όπως θα παρουσιαστεί στο Κεφ.6.5.



Σχήμα.6.4: Διάγραμμα όπου παρουσιάζονται διάφορες εφαπτόμενες στην πειραματική καμπύλη.

Η εν σειρά αντίσταση R_s που προκύπτει από την κλίση του διαγράμματος $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ του Σχ.5.22 είναι 0.28Ω , η οποία είναι αποδεκτή τιμή αντίστασης για sc-Si στοιχείο και με πεδίο τιμών $[0.23, 0.34]$ για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ενδεικτική τιμή είναι 0.17Ω - 0.26Ω για sc-Si στοιχεία, οπότε και το πεδίο τιμών στο οποίο έχουμε καταλήξει εκφράζει αποδεκτές τιμές αντίστασης (Καπλάνης 2004).

Η εσωτερική αντίσταση του στοιχείου επηρεάζεται και από την πρόσθετη αντίσταση στην καλωδίωση. Επίσης, υπάρχουν ψυχρές επαφές των ακροδεκτών του στοιχείου με τα καλώδια που καταλήγουν στον Datalogger οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την εν σειρά αντίσταση του.

Από την χαρακτηριστική καμπύλη I-V όπως φαίνεται στο Σχ. 5.16 του στοιχείου θα περίμενε κανείς μια καλή τιμή εν σειρά αντίστασης, διότι η

καμπύλη παρουσιάζει ένα αποδεκτό για φ/β στοιχείο συντελεστή πλήρωσης $FF=0.52$.

6.2 Φ/β ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ pc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 6cmX6cm ΜΕ ΤΟ ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Από την χαρακτηριστική I-V στο Σχ.5.1 του στοιχείου παρατηρούμε ότι παρουσιάζει μια πολύ καλή συμπεριφορά με συντελεστή $FF=0.59$ και άρα θα παρουσιάσει και μια μικρή εν σειρά αντίσταση R_s , όπως φαίνεται από την κλίση της καμπύλης στο σημείο $V=V_{oc}$.

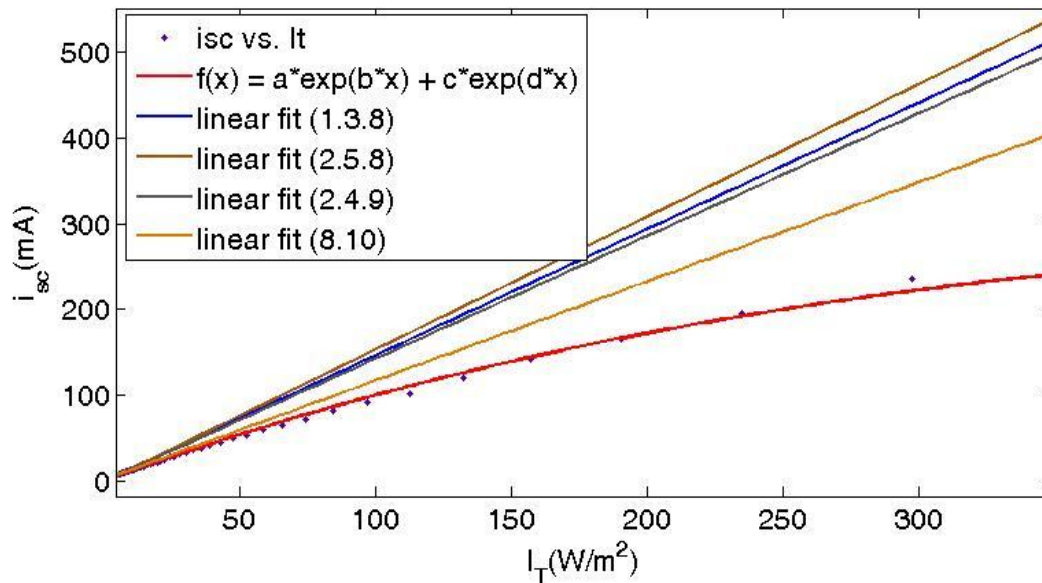
Στο διάγραμμα $V_{oc}=f(\ln I_T)$ (Σχ.5.6) προκύπτει ότι βάσει των δεδομένων παίρνουμε μια πολύ καλή προσαρμοσμένη ευθεία με μόνο μερικά σημεία στην αρχή να μην υπακούν σε αυτή όπως φαίνεται από προσαρμογή της καμπύλης της μορφής $y=a*\ln(x)+c$ στο Σχ.5.5

Η απόκλιση οφείλεται και σε όσα σφάλματα αναφέραμε προηγουμένως στο αυτοματοποιημένο σύστημα αλλά και σφάλματα λόγω αύξησης της θερμοκρασίας που με αυτή την πειραματική διάταξη και για κοντινές αποστάσεις στοιχείου-λαμπτήρα είναι μεγάλη, το οποίο διορθώσαμε σύμφωνα με την εξ.(5.3). Σε αυτό προστίθεται ένα ακόμα σφάλμα, του μετρητικού μας οργάνου. Η ακρίβεια του βολτόμετρου είναι της τάξεως του 1mV και του αμπερομέτρου 0.1mA. Τέλος στις μετρήσεις αυτές περιλαμβάνεται το ανθρώπινο σφάλμα καθώς και η υποκειμενικότητα στην ταχύτητα ανάγνωσης καταγραφής και λήψης μετρήσεων.

Ο συντελεστής ιδεατότητας προκύπτει από την κλίση του διαγράμματος $V_{oc}=f(\ln I_T)$ της μορφής $y=a*x+c$ (Σχ. 5.6) και είναι $m=1.46$ με πεδίο τιμών [1.39,1.42], η οποία είναι μια πολύ καλή τιμή συντελεστή ιδεατότητας.

Στο διάγραμμα $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ του Σχ.5.8 λαμβάνουμε υπόψη μας τα σημεία στα οποία η κλίση της καμπύλης σε σχέση με την εφαπτόμενη γίνεται εμφανής. Συγκριμένα λαμβάνουμε τη λογαριθμική διαφορά για τα σημεία σε αποστάσεις 40cm-90cm και 190.3 W/m^2 - 1189.5 W/m^2 αντίστοιχες τιμές.

Η εφαπτομένη στο Σχ.5.3 επηρεάζει τα αποτελέσματα του πειράματος. Αν επιλέγαμε κάποια άλλη εφαπτομένη όπως η εφαπτομένη σημεία (2,5,8), σημεία (2,4,9) και σημεία (8,10) του Σχ.6.5 τα αποτελέσματα της εν σειρά αντίστασης R_s θα προέκυπταν 0.41Ω , 0.43Ω και 0.51Ω αντίστοιχα. Η επιλογή της εφαπτομένης έγινε με πολύ προσοχή ώστε να εφάπτεται κατά το μέγιστο δυνατό στην πειραματική καμπύλη.



Σχήμα.6.5: Διάγραμμα όπου παρουσιάζονται διάφορες εφαπτόμενες στην πειραματική καμπύλη.

Η εν σειρά αντίσταση R_s που προκύπτει από την κλίση του διαγράμματος $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ του Σχ. 5.8 είναι 0.41Ω με όρια $[0.27,0.55]$ μια πολύ καλή τιμή αντίστασης για πολυκρυσταλλικό στοιχείο. Ενδεικτική τιμή είναι 0.75Ω για pc-Si στοιχείου (Καπλάνης, 2004).

6.3 Φ/β ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΥΠΟΥ sc-Si ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11cmX11cm ΜΕ ΤΟ ΑΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

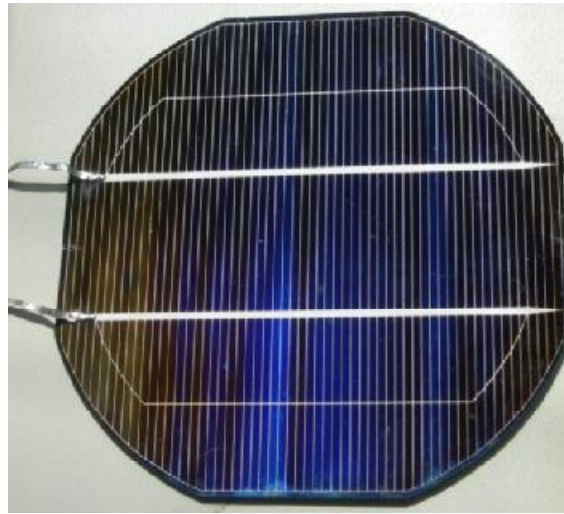
Από την χαρακτηριστική I-V όπως φαίνεται στο Σχ.5.9 του στοιχείου παρατηρούμε ότι παρουσιάζει μορφή, που σε σύγκριση με τις χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των άλλων φ/β στοιχείων, θα ήταν αναμενόμενο να έχει υψηλότερη τιμή εν σειρά αντίστασης R_s , κάτι και το οποίο συμβαίνει.

Στο διάγραμμα $V_{oc}=f(I_T)$ του Σχ. 5.13 παρατηρούμε ότι βάση των δεδομένων δεν λαμβάνεται μια καλή ευθεία ελαχίστων τετραγώνων η οποία επηρεάζεται από τα τελευταία πειραματικά δεδομένα, δηλαδή για αποστάσεις 50-110cm.

Αυτό είναι κάτι που οφείλεται και σε όσα σφάλματα αναφέραμε προηγουμένως τόσο στο αυτόματο σύστημα, όσο και στο χειροκίνητο.

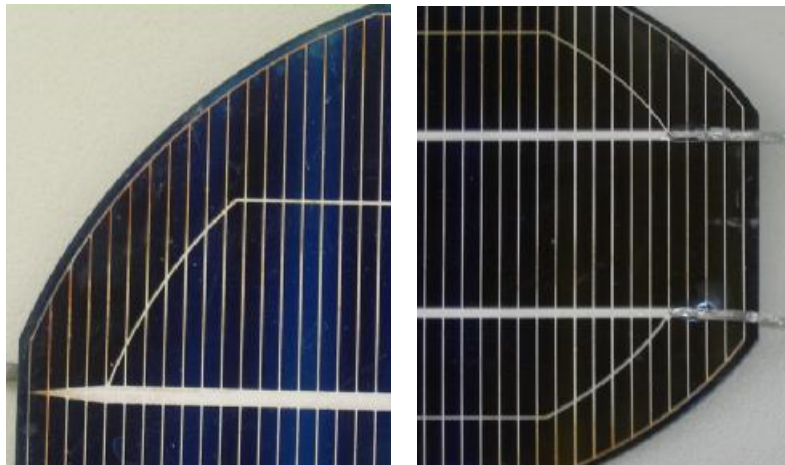
Από την Εικ.6.1 μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι το στοιχείο παρουσιάζει σοβαρά σημάδια γήρανσης, τα οποία παρουσιάζονται με τη μορφή αλλοίωσης του χρώματος που είναι εμφανές σε πολλά σημεία της επιφάνειας του στοιχείου. Η αλλοίωση του χρώματος επιδρά στην διαπερατότητα της

μεμβράνης από το φως και στην απορροφητικότητα της επιφάνειας και επομένως στην ένταση ρεύματος i που αποδίδει το ϕ/β στοιχείο.



Εικόνα 6.1: sc-Si στοιχείο 11cmX11cm (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας).

Στην Εικ.6.2 παρατηρούνται περιοχές της επιφάνειας του στοιχείου που παρουσιάζουν σημάδια οξείδωσης. Τα σημάδια αυτά οφείλονται σε γήρανση του ϕ/β στοιχείου. Η οξείδωση αυτή επηρεάζει σημαντικά τις ηλεκτρικές παραμέτρους του στοιχείου, όπως η εν σειρά αντίσταση R_s και μειώνει την απόδοση του.



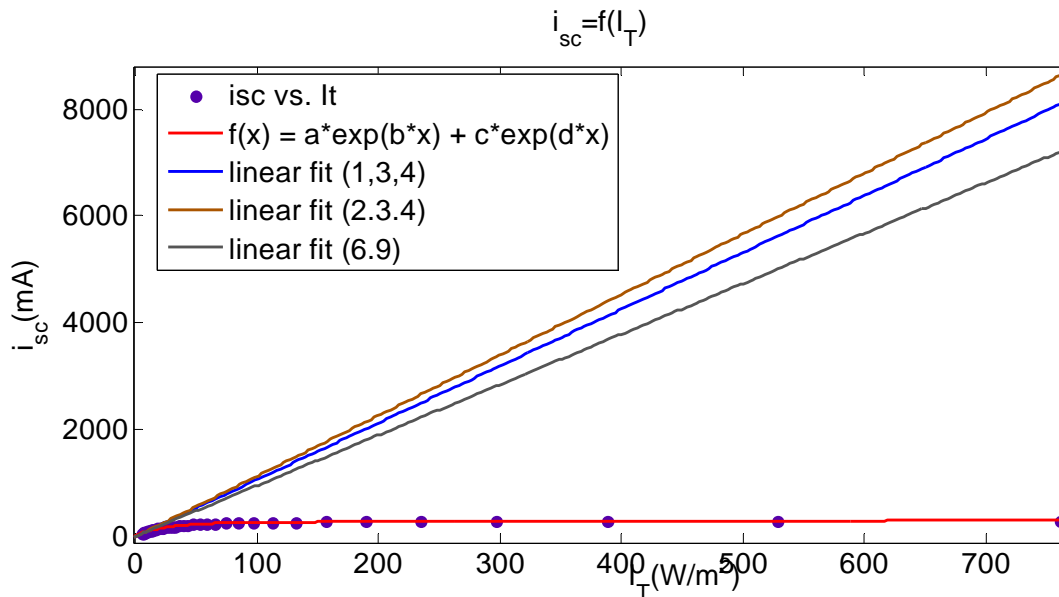
Εικόνα 6.2: Περιοχές με σημάδια σκουριάς στο sc-Si 11cmX11cm στοιχείο (εργαστήριο Α.Π.Ε., ΤΕΙ Πάτρας).

Ο συντελεστής ιδεατότητας που προκύπτει από την προσαρμογή καμπύλης της μορφής $y=a*\ln(x)+c$ στα δεδομένα του διαγράμματος $V_{oc}=f(I_T)$ είναι $m=2.1$ με πεδίο τιμών $[2, 2.26]$, η οποία είναι μια επιτρεπτή τιμή.

Στο διάγραμμα $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ της μορφής $y=a*x+c$ (Σχ.5.15) λαμβάνουμε υπόψη μας τα σημεία στα οποία η κλίση της καμπύλης μας σε σχέση με την εφαπτόμενη γίνεται εμφανής. Συγκεκριμένα λαμβάνουμε τη λογαριθμική διαφορά για τα σημεία σε αποστάσεις 50cm-250cm και 30.451 W/m^2 - 761.28 W/m^2 αντίστοιχες τιμές εντάσεις ακτινοβολίας.

Η εν σειρά αντίσταση R_s που προκύπτει από την κλίση του διαγράμματος $\ln(i_{ph}-i_{sc})=f(i_{sc})$ είναι 1.54Ω μια πολύ υψηλή τιμή αντίστασης για μονοκρυσταλλικό στοιχείο και πεδίο τιμών [1.4, 1.69] με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ενδεικτική τιμή είναι 0.16 - 0.26Ω για sc-Si στοιχεία (Καπλάνης, 2004).

Η εφαπτομένη στο Σχ.5.11 επηρεάζει τα αποτελέσματα του πειράματος. Αν επιλέγαμε κάποια άλλη εφαπτομένη όπως η εφαπτομένη στα σημεία (2,3,4) και στα σημεία (6,9) του Σχ.6.6 τα αποτελέσματα της εν σειρά αντίστασης R_s θα προέκυπταν $1,69\Omega$ και $1,76\Omega$ αντίστοιχα. Η επιλογή της εφαπτομένης έγινε με πολύ προσοχή ώστε να εφάπτεται κατά το μέγιστο δυνατό στην πειραματική καμπύλη.



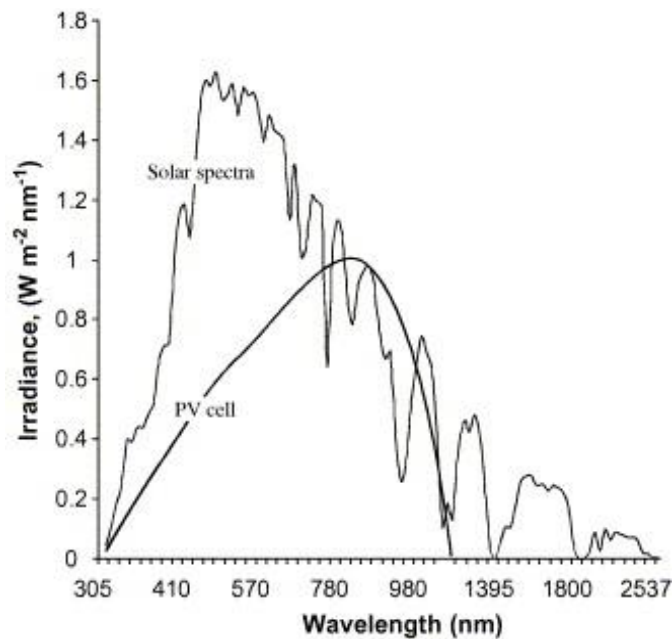
Σχήμα 6.6: Διάγραμμα όπου παρουσιάζονται διάφορες εφαπτόμενες στην πειραματική καμπύλη.

6.4 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η ένταση της ακτινοβολίας σε απόσταση 2m από τον λαμπτήρα μετρήθηκε με έναν αισθητήρα ακτινοβολίας (Irradiance Sensor) τύπου πυριτίου, ίση με 47.58 W/m^2 . Προαναφέρθηκε το φάσμα του λαμπτήρα αλογόνου-ιωδίνης που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα παρουσιάζεται στο Σχ.4.2.

Παρατηρούμε ότι το φάσμα που δίνει ο λαμπτήρας αλογόνου είναι μετατοπισμένο προς το υπέρυθρο.

Ο αισθητήρας ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από μονοκρυσταλλικό φ/β στοιχείο που αποκρίνεται σε μήκη κύματος [300-1200nm], όπως παρουσιάζεται στο Σχ.6.7. Τα φ/β στοιχεία που μελετήθηκαν στα πειράματα αποκρίνονται στο ίδιο φάσμα. Ο αισθητήρας έχει βαθμονομηθεί με χρήση εξομοιωτή ηλιακής ακτινοβολίας.

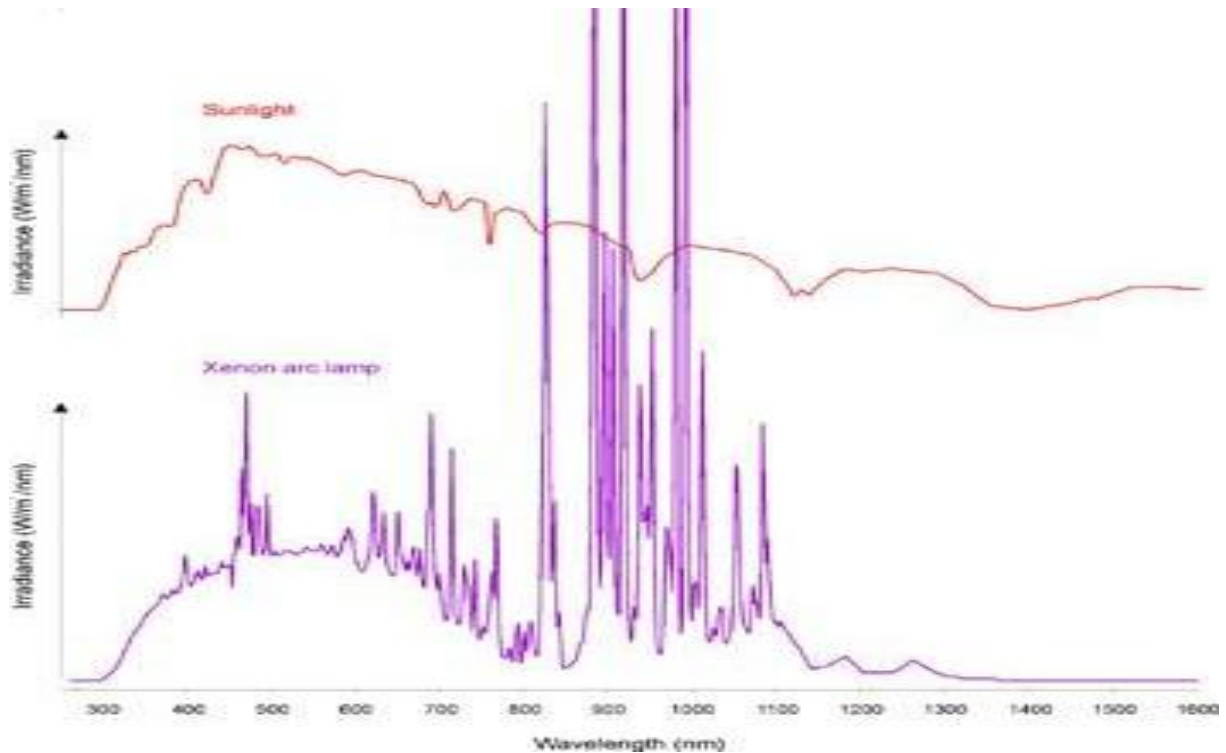


Σχήμα 6.7: Φάσμα πυριτίου (King,1997).

Από την άλλη μεριά όπως φαίνεται στο Σχ.4.2 ο λαμπτήρας αλογόνου-ιωδίνης που χρησιμοποιήθηκε. Το μετατοπισμένο αυτό φάσμα προκαλεί μικρότερη κβαντική απόδοση του στοιχείου με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η χαρακτηριστική του καμπύλη I-V. Επίσης το μετατοπισμένο φάσμα στο υπέρυθρο αυξάνει τη θερμοκρασία του φ/β στοιχείου, όπως αναλύσαμε στο κεφάλαιο 2.2.

Ακριβείς μετρήσεις ως προς το φάσμα του λαμπτήρα, μπορεί να υλοποιηθεί κανείς με λάμπες Xenon, οι οποίες προσεγγίζουν αυτό του ηλιακού φάσματος (Σχ.6.7). Ο λόγος που δεν χρησιμοποιήθηκε λαμπτήρας Xenon είναι το εξειδικευμένο και ακριβό σύστημα έναυσης.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχει γίνει διεθνώς αποδεκτή η χρήση των λαμπτήρων αλογόνου σε πειράματα και μετρήσεις σε φ/β στοιχεία.



Σχήμα 6.7: Φάσμα λαμπτήρα Xenon σε σχέση με το φ/β φάσμα.

6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η πειραματική μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή ιδεατότητας m και της εν σειρά αντίστασης R_s , όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 που ακολουθήθηκε είναι μια από τις πολλές μεθόδους που υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία

Γενική παραδοχή είναι ότι οι διάφορες πειραματικές μέθοδοι καταλήγουν σε διαφορετικά αποτελέσματα που αφορούν την εν σειρά αντίσταση R_s και τον συντελεστή ιδεατότητας m για το ίδιο στοιχείο. Πιο συγκεκριμένα για ένα φ/β πλαίσιο με 4 διαφορετικές μεθόδους καταλήγουμε σε 4 διαφορετικά αποτελέσματα (Karlanı and Karlanis, 2011):

1. Η προσαρμογή της εξ.(6.5) στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V καταλήγει σε τιμή εν σειρά αντίστασης $R_s=0.968$ και 1.29 , για συντελεστή ιδεατότητας m 1.5 και 2 .

$$i = i_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V+iR_s}{mV_T}} - 1 \right] - \frac{(V-iR_s)}{R_{sh}} \quad (6.5)$$

2. Η πειραματική μέθοδος προσδιορισμού της R_s και της R_{sh} με τον προσδιορισμό των κλίσεων της χαρακτηριστικής καμπύλης στα σημεία $V=V_{oc}$

και στα $i=i_{sc}$, καταλήγει σε αποτελέσματα αντίστοιχα: $R_s=2.2\pm 0.4\Omega$ και $R_{sh}=110\pm 10\Omega$.

3. Η μέθοδος Swanson όπου για το ίδιο στοιχείο παίρνουμε δύο χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας. Η εν σειρά αντίσταση δίνεται από τη σχέση $R_s = \frac{\Delta V}{\Delta i}$ με αποτέλεσμα $R_s=1.4\pm 0.4\Omega$.

4. Η μέθοδος της επανάληψης δίνει τιμή εν σειρά αντίστασης $R_s=2.3\pm 0.5\Omega$ σύμφωνα με τη εξ.(6.6):

$$V = V_{oc} - iR_s + \left[\ln\left(\frac{i_{sc}-i}{i_{sc}}\right) + e^{A(i_{sc}-R_s-V_{oc})} \right] / A \quad (6.6)$$

όπου $A=q/(FF \cdot k \cdot T_c)$.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σ.Ν. Καπλάνης, *Ήπιες Μορφές Ενέργειας II: Ηλιακή Μηχανική*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 2004.
2. Σ.Ν. Καπλάνης, *Ήπιες Μορφές Ενέργειας III: Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 2004.
3. C. Hu and R. M. White, *Solar cell, from basic to advanced systems*, McGraw-Hill Book Company, 1983.
4. D.S.H. Chan, J.R. Phillips and J.C.H. Phang, *A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters*, Solid-State Electronics, vol.29(3), pp.329-337, 1986.
5. T.T. Chow, *A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology*, Applied Energy, Vol.87, pp365-379, 2010.
6. D. Cotfas, P. Cotfas, S. Kaplanis, D. Ursutiu, *Results on series and shunt Resistance in a c-Si PV cell. Comparison using existing methods and a new one*, Journal of optoelectronics and advanced materials vol. 10(11), pp.3124-3130, 2008.
7. J. Ferber, R. Stangl, J. Luther, *An electrical model of dye-sensitized solar cell*, Solar Energy Materials and Solar cells, Vol. 53(1-2), p.29-54, 1998.
8. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, *Solar cell efficiency tables (Version 39)*, Vol.20(1), pp.12-20, 2012.
9. E. Kaplani, *Detection of Degradation Effects in Field-Aged c-Si Solar Cells through IR Thermology and Digital Image Processing*, International Journal of Photoenergy, Vol. 2012, article ID 396792, pp.1-11, 2011.
10. E. Kaplani, P. Papadouris and S. Kaplanis, *Pc-Si and c-Si Cell Studies at Transient and Steady State Conditions in Various Illumination Levels*, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.5, pp.48-54, 2011.

11. S. Kaplanis and E. Kaplani, *Prediction of Solar Radiation Intensity for Cost-Effective PV Sizing and Intelligent Energy Buildings*, Chapter in Book *Solar Power*, INTECH, Croatia, pp.3-22, 2012.
12. E. Kaplani and S.Kaplanis, *Energy performance and degradation over 20 years performance of BP c-Si PV modules*, *Simulation Modeling Practice And Theory*, Vol.19, pp.1201-1211,2011.
13. S.Kaplanis and E Kaplani, *A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar Radiation $I(h;n_j)$ values*, *Renewable Energy* Vol. 32(8), pp.1414-1425, 2007.
14. E. Kaplani, S. Kaplanis, *PV-ageing effects and performance degradation of c-Si PV cells* Proc. 6th Int. Workshop on Teaching in Photovoltaics IWTPV'12, Czech Republic, p.17-21, 2012.
15. S.Kaplanis and E.Kaplani, *Stochastic prediction of hourly global solar Radiation for Patra, Greece*, *Applied Energy*, Vol. 87(12), pp3748-3578, 2010.
16. M.Tucker, *Carbon dioxide emissions and global GDP*, *Ecological Economics*, Vol.15, pp.215-223,195.
17. Aleo, Company Presentation, Innovation Week on Renewable Energy Systems, TEI of Patras, Greece, 1-12 July 2012.
18. 14 V. Benda, *Photovoltaic cell and module physics and technology*, Proc. Innovation Week on Renewable Energy Systems, TEI of Patras, Greece, 1-12 July 2012.
19. A.W. Bett, C. Caur, F. Dimroth, G. Lange, M. Meusel, S. Van Riesen, G. Siefer, V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev, N.A. Sadchikov, *FLATCON MODULES: technology and characterization*, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11-18 2003.
20. E. Kaplani, *PV Systems Engineering and the other Renewable Energy Systems*, Proc. Innovation Week on Renewable Energy Systems, TEI of Patras, Greece, 1-12 July 2012.
21. D.L.King, J.A.Krarochevil, *Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors*, Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conferenc, Sandia National Laborations, Anaheim, California,1997.

22. E.Stathatos, *High efficient Dye sensitized solar cells: A new perspective to the solar energy conversion*, Proc. Innovation Week on Renewable Energy Systems, TEI of Patras, Greece, 1-12 July 2012.
23. H.R. Meitner, [EFG-Silicium: MateRial, Technologie und zukünftige Entwicklung](#), Forschungs Verbund Sonnenenergie, 2000.
24. S. KR. Gupta, M. KR. Srivastava and A. Gupta, *Mathematical Formulation and Comparative Analysis of Losses in Solar cells*, Department Of Electronics Engineering, MPEC.
25. Joint Research centre (JRC), Institute for Energy and transport, *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*, [http://Re.jRc.ec.euRopa.eu/pvgis/cmeps/eu_opt/pvgis_solaR_optimum GR.png](http://Re.jRc.ec.euRopa.eu/pvgis/cmeps/eu_opt/pvgis_solaR_optimum_GR.png).
26. Meteonorm, Software Global metereological database for solar energy and applied climatology, <http://meteonorm.com/>.
27. *Kyoto Protocol*, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, 1998.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι: Πειραματικές μετρήσεις των i, V για διαφορετικές τιμές φορτίου και υπολογιζόμενης ισχύς για ϕ/β στοιχείο τύπου $pc-Si$ διαστάσεων $6cm \times 6cm$.

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
1	0.00	483.5	0.00	34	1.69	481.4	0.81
2	0.00	484.1	0.00	35	3.38	480.8	1.63
3	0.00	484.1	0.00	36	3.38	480.8	1.63
4	0.00	484.1	0.00	37	3.38	480.1	1.62
5	0.00	484.1	0.00	38	3.38	479.4	1.62
6	0.00	484.1	0.00	39	5.07	478.7	2.43
7	0.00	484.1	0.00	40	5.07	477.4	2.42
8	0.00	484.1	0.00	41	5.07	476.7	2.42
9	0.00	484.1	0.00	42	6.76	475.4	3.21
10	0.00	484.1	0.00	43	6.76	474.0	3.21
11	0.00	483.8	0.00	44	8.45	472.7	3.99
12	0.00	483.5	0.00	45	8.45	471.3	3.98
13	0.00	483.5	0.00	46	8.45	469.3	3.97
14	0.00	483.5	0.00	47	10.14	467.3	4.74
15	0.00	483.5	0.00	48	11.83	465.2	5.50
16	0.00	483.5	0.00	49	13.52	462.5	6.25
17	0.00	483.5	0.00	50	15.21	459.8	6.99
18	0.00	482.8	0.00	51	16.91	456.5	7.72
19	0.00	482.8	0.00	52	18.60	452.4	8.41
20	0.00	482.8	0.00	53	20.29	447.3	9.08
21	0.00	482.8	0.00	54	23.67	441.3	10.45
22	0.00	482.1	0.00	55	25.36	433.2	10.99
23	0.00	482.1	0.00	56	28.74	421.0	12.10
24	0.00	482.1	0.00	57	32.12	401.8	12.91
25	0.00	481.8	0.00	58	35.50	367.0	13.03
26	0.00	481.4	0.00	59	38.88	251.2	9.77
27	0.00	481.4	0.00	60	38.88	130.3	5.07
28	1.69	481.4	0.81	61	38.88	86.4	3.36
29	1.69	481.4	0.81	62	38.88	69.2	2.69
30	1.69	481.4	0.81	63	38.88	58.4	2.27
31	1.69	481.4	0.81	64	38.88	50.6	1.97
32	1.69	481.4	0.81	65	38.88	44.6	1.73
33	1.69	481.1	0.81	66	38.88	39.8	1.55

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
67	38.88	35.8	1.39	62.57	100	38.88	6.8
68	38.88	32.4	1.26	62.57	101	38.88	6.8
69	38.88	29.7	1.16	62.57	102	38.88	6.4
70	38.88	27.0	1.05	62.57	103	38.88	6.1
71	38.88	25.0	0.97	62.57	104	38.88	6.1
72	38.88	23.6	0.92	62.57	105	38.88	6.1
73	38.88	21.6	0.84	62.57	106	38.88	6.1
74	38.88	20.3	0.79	62.57	107	38.88	5.4
75	38.88	18.9	0.74	62.57	108	38.88	5.4
76	38.88	17.9	0.70	62.57	109	38.88	5.4
77	38.88	16.9	0.66	62.57	110	38.88	5.4
78	38.88	16.2	0.63	62.57	111	38.88	5.4
79	38.88	14.9	0.58	62.57	112	38.88	5.4
80	38.88	14.2	0.55	62.57	113	38.88	4.7
81	38.88	13.5	0.52	62.57	114	38.88	4.7
82	38.88	12.8	0.50	62.57	115	38.88	4.7
83	38.88	12.2	0.47	62.57	116	38.88	4.7
84	38.88	11.5	0.45	62.57	117	38.88	4.7
85	38.88	10.8	0.42	62.57	118	38.88	4.7
86	38.88	10.5	0.41	62.57	119	38.88	4.7
87	38.88	10.1	0.39	62.57	120	38.88	4.7
88	38.88	9.5	0.37	62.57	121	38.88	4.1
89	38.88	9.5	0.37	62.57	122	38.88	4.1
90	38.88	8.8	0.34	62.57	123	38.88	4.1
91	38.88	8.8	0.34	62.57	124	38.88	4.1
92	38.88	8.1	0.31	62.57	125	38.88	4.1
93	38.88	8.1	0.31	62.57	126	38.88	4.1
94	38.88	8.1	0.31	62.57	127	38.88	4.1
95	38.88	7.4	0.29	62.57	128	38.88	4.1
96	38.88	7.4	0.29	62.57	129	38.88	4.1
97	38.88	7.4	0.29	62.57	130	38.88	4.1
98	38.88	7.1	0.28	62.57	131	38.88	4.1
99	38.88	6.8	0.26	62.57	132	38.88	4.1

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
133	38.88	4.1	0.16	166	38.88	3.4	0.13
134	38.88	4.1	0.16	167	38.88	3.4	0.13
135	38.88	4.1	0.16	168	38.88	3.4	0.13
136	38.88	4.1	0.16	169	38.88	3.4	0.13
137	38.88	4.1	0.16	170	38.88	3.4	0.13
138	38.88	4.1	0.16	171	38.88	3.4	0.13
139	38.88	4.1	0.16	172	38.88	3.4	0.13
140	38.88	4.1	0.16	173	38.88	3.4	0.13
141	38.88	4.1	0.16	174	38.88	3.4	0.13
142	38.88	4.1	0.16	175	38.88	3.4	0.13
143	38.88	4.1	0.16				
144	38.88	4.1	0.16				
145	38.88	4.1	0.16				
146	38.88	4.1	0.16				
147	38.88	4.1	0.16				
148	38.88	4.1	0.16				
149	38.88	4.1	0.16				
150	38.88	4.1	0.16				
151	38.88	4.1	0.16				
152	38.88	4.1	0.16				
153	38.88	4.1	0.16				
154	38.88	4.1	0.16				
155	38.88	4.1	0.16				
156	38.88	3.7	0.14				
157	38.88	3.4	0.13				
158	38.88	3.4	0.13				
159	38.88	3.4	0.13				
160	38.88	3.4	0.13				
161	38.88	3.4	0.13				
162	38.88	3.4	0.13				
163	38.88	3.4	0.13				
164	38.88	3.4	0.13				
165	38.88	3.4	0.13				

Πίνακας II: Πειραματικές μετρήσεις των i_{sc} , V_{oc} , T_c για κάθε απόσταση ϕ/β στοιχείου-λαμπτήρα για το στοιχείο τύπο pc-Si διαστάσεων 6cmX6cm με το χειροκίνητο σύστημα.

l(cm)	Voc(mv)	isc(mA)	Tc(°C)	Voc,corr(mv)	It(W/m2)
570	328	56.4	14	328	5.9
560	330	58.3	14	330	6.1
550	333	61.1	14	333	6.3
540	337	63.5	14	337	6.5
530	339	65.8	14	339	6.8
520	342	69.2	14.3	342.3	7.0
510	347	73.2	14.3	347.3	7.3
500	349	72.5	14.3	349.3	7.6
490	351	77.6	14.6	351.6	7.9
480	354	80	14.6	354.6	8.3
470	357	81.9	14.8	357.8	8.6
460	360	85.3	14.8	360.8	9.0
450	362	87.9	14.8	362.8	9.4
440	365	91.6	14.8	365.8	9.8
430	369	94.7	14.8	369.8	10.3
420	372	98.5	14.8	372.8	10.8
410	374	99.5	14.8	374.8	11.3
400	377	102.7	14.8	377.8	11.9
390	380	108.8	14.8	380.8	12.5
380	383	112.7	15.1	384.1	13.2
370	387	116.7	15.1	388.1	13.9
360	390	121	15.1	391.1	14.7
350	393	123.8	15.1	394.1	15.5
340	396	127.5	15.1	397.1	16.5
330	402	138	15.1	403.1	17.5
320	406	143.1	15.1	407.1	18.6
310	410	149.5	15.1	411.1	19.8
300	413	155	15.2	414.2	21.1
290	418	158.6	15.2	419.2	22.6
280	422	166	15.2	423.2	24.3

l(cm)	Voc(mv)	isc(mA)	Tc(°C)	Voc,corr(mv)	It(W/m2)
270	428	173.3	15.6	429.6	26.1
260	435	179.4	15.9	436.9	28.2
250	435	186.5	16.1	437.1	30.5
240	443	190.2	16.3	445.3	33.0
230	446	196.2	16.4	448.4	36.0
220	454	202	16.4	456.4	39.3
210	459	215.4	17.2	462.2	43.2
200	463	218	17.7	466.7	47.6
190	467	228.4	18.2	471.2	52.7
180	473	236.2	18.5	477.5	58.7
170	478	235	18.8	482.8	65.9
160	482	245	19	487	74.3
150	490	247.2	19	495	84.6
140	496	251	19	501	97.1
130	506	263	19	511	112.6
120	506	267.5	19	511	132.2
110	516	271.6	19	521	157.3
100	519	278.7	19	524	190.3
90	521	284.3	19	526	235.0
80	528	285.3	19	533	297.4
70	532	290	19	537	388.4
60	537	291	19	542	528.7
50	542	292	19	547	761.3

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ: Πειραματικές μετρήσεις των i, V για διαφορετικές τιμές φορτίου και υπολογιζόμενη ισχύς του στοιχείου $sc-Si$ διαστάσεων $1\text{cm} \times 1\text{cm}$.

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
1	0.00	429.50	0.00	34	1.69	427.80	0.72
2	0.00	430.90	0.00	35	1.69	427.50	0.72
3	0.00	430.90	0.00	36	3.38	428.10	1.45
4	0.00	430.90	0.00	37	3.38	428.10	1.45
5	0.00	430.90	0.00	38	3.38	428.10	1.45
6	0.00	430.50	0.00	39	3.38	428.10	1.45
7	0.00	430.20	0.00	40	5.07	428.10	2.17
8	0.00	430.20	0.00	41	5.07	428.10	2.17
9	0.00	429.50	0.00	42	6.76	428.10	2.90
10	0.00	429.50	0.00	43	6.76	428.10	2.90
11	0.00	429.50	0.00	44	8.45	428.10	3.62
12	0.00	429.50	0.00	45	8.45	427.80	3.61
13	0.00	428.80	0.00	46	8.45	427.50	3.61
14	0.00	428.80	0.00	47	10.14	426.80	4.33
15	0.00	428.80	0.00	48	10.14	426.10	4.32
16	0.00	428.80	0.00	49	11.84	425.40	5.04
17	0.00	428.80	0.00	50	13.53	424.10	5.74
18	0.00	428.80	0.00	51	15.22	423.40	6.44
19	0.00	428.80	0.00	52	18.60	422.10	7.85
20	0.00	429.50	0.00	53	20.29	421.40	8.55
21	0.00	429.50	0.00	54	23.67	420.70	9.96
22	0.00	430.20	0.00	55	25.36	420.00	10.65
23	0.00	430.20	0.00	56	28.74	419.40	12.05
24	0.00	430.20	0.00	57	32.12	418.70	13.45
25	0.00	430.20	0.00	58	35.51	417.70	14.83
26	0.00	430.20	0.00	59	38.89	416.70	16.21
27	0.00	430.20	0.00	60	43.96	415.30	18.26
28	0.00	429.50	0.00	61	49.03	414.30	20.31
29	1.69	429.50	0.73	62	54.10	412.60	22.32
30	1.69	428.80	0.73	63	59.18	410.60	24.30
31	1.69	428.80	0.73	64	64.25	408.60	26.25
32	1.69	428.10	0.72	65	71.01	405.90	28.82
33	1.69	428.10	0.72	66	77.77	403.20	31.36

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
67	86.20	400.50	34.52	100	422.70	94.50	39.95
68	93.00	397.10	36.93	101	424.40	90.80	38.54
69	103.10	393.70	40.59	102	424.40	87.10	36.97
70	111.60	389.70	43.49	103	424.40	84.40	35.82
71	121.70	385.60	46.93	104	424.40	81.00	34.38
72	131.90	380.90	50.24	105	426.10	78.00	33.24
73	143.70	376.50	54.10	106	426.10	74.96	31.94
74	155.50	371.40	57.75	107	426.10	72.93	31.08
75	167.40	365.70	61.22	108	427.80	70.23	30.04
76	180.90	359.30	65.00	109	427.80	68.21	29.18
77	194.40	352.50	68.53	110	427.80	66.18	28.31
78	209.70	344.70	72.28	111	427.80	64.15	27.44
79	224.90	336.30	75.63	112	429.40	62.80	26.97
80	240.10	327.20	78.56	113	429.40	61.45	26.39
81	257.00	316.70	81.39	114	431.10	60.10	25.91
82	273.90	304.90	83.51	115	431.10	58.75	25.33
83	292.50	291.10	85.15	116	432.80	58.08	25.14
84	309.40	276.90	85.67	117	432.80	57.40	24.84
85	328.00	260.00	85.28	118	432.80	56.73	24.55
86	344.90	241.80	83.40	119	432.80	55.38	23.97
87	360.10	221.20	79.65	120	432.80	54.70	23.67
88	373.70	202.60	75.71	121	432.80	54.02	23.38
89	385.50	185.00	71.32	122	432.80	53.35	23.09
90	393.90	168.80	66.49	123	432.80	52.67	22.80
91	400.70	154.30	61.83	124	432.80	52.00	22.51
92	405.80	143.50	58.23	125	432.80	51.32	22.21
93	409.20	133.70	54.71	126	434.50	50.65	22.01
94	412.50	125.30	51.69	127	432.80	49.30	21.34
95	415.90	117.80	48.99	128	434.50	48.96	21.27
96	417.60	112.80	47.11	129	434.50	47.95	20.83
97	419.30	107.40	45.03	130	434.50	47.95	20.83
98	421.00	102.60	43.19	131	434.50	47.27	20.54
99	422.70	97.90	41.38	132	434.50	46.60	20.25

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
133	434.50	45.92	19.95	166	434.50	35.12	15.26
134	434.50	45.25	19.66	167	434.50	35.12	15.26
135	434.50	45.25	19.66	168	434.50	35.12	15.26
136	434.50	44.57	19.37	169	434.50	34.44	14.96
137	434.50	43.89	19.07	170	434.50	34.44	14.96
138	434.50	43.22	18.78	171	434.50	34.44	14.96
139	434.50	43.22	18.78	172	434.50	34.44	14.96
140	434.50	42.54	18.48	173	434.50	33.77	14.67
141	434.50	42.21	18.34	174	436.20	33.77	14.73
142	434.50	41.87	18.19	175	436.20	33.77	14.73
143	434.50	41.87	18.19				
144	434.50	41.19	17.90				
145	434.50	40.52	17.61				
146	434.50	40.52	17.61				
147	434.50	39.84	17.31				
148	434.50	39.84	17.31				
149	434.50	39.17	17.02				
150	434.50	39.17	17.02				
151	434.50	38.83	16.87				
152	434.50	38.49	16.72				
153	434.50	38.49	16.72				
154	434.50	37.82	16.43				
155	434.50	37.82	16.43				
156	434.50	37.14	16.14				
157	434.50	37.14	16.14				
158	434.50	37.14	16.14				
159	434.50	37.14	16.14				
160	434.50	36.47	15.85				
161	434.50	36.47	15.85				
162	434.50	36.47	15.85				
163	434.50	35.79	15.55				
164	434.50	35.79	15.55				
165	434.50	35.12	15.26				

Πίνακας IV: Πειραματικές μετρήσεις των i_{sc} , V_{oc} , T_c για κάθε απόσταση ϕ/β στοιχείου-λαμπτήρα για το ϕ/β στοιχείο τύπου sc-Si διαστάσεων 11cmX11cm με το χειροκίνητο σύστημα.

l(cm)	Voc(mv)	isc(mA)	Tc(°C)	Voc,corr(mv)	IT(W/m2)
570	450	7.31	9.4	450	5.9
560	450	7.48	9.4	450	6.1
550	453	7.88	9.4	453	6.3
540	455	8.33	9.4	455	6.5
530	458	8.7	9.4	458	6.8
520	460	9.06	9.4	460	7
510	462	9.49	9.4	462	7.3
500	464	9.88	9.4	464	7.6
490	466	10.2	9.4	466	7.9
480	467	10.63	10.4	468	8.3
470	468	10.94	10.4	469	8.6
460	470	11.43	10.4	471	9
450	471	11.78	10.4	472	9.4
440	473	12.11	10.4	474	9.8
430	475	12.7	10.4	476	10.3
420	477	13.29	10.4	478	10.8
410	478	13.47	10.4	479	11.3
400	480	14.18	10.4	481	11.9
390	481	14.81	10.4	482	12.5
380	483	15.42	10.4	484	13.2
370	485	16.13	10.4	486	13.9
360	487	16.93	10.4	488	14.7
350	489	17.71	10.4	490	15.5
340	491	18.68	10.2	492	16.5
330	493	19.71	10.2	494	17.5
320	495	20.82	11.4	497	18.6
310	497	21.94	11.4	499	19.8
300	500	23.33	11.4	502	21.1
290	502	24.8	11.4	504	22.6

l(cm)	Voc(mv)	isc(mA)	Tc(°C)	Voc,corr(mv)	I _T (W/m ²)
280	505	27	11.4	507	24.3
270	506	28.12	12	509	26.1
260	509	30.37	12	512	28.2
250	511	32.34	12.3	514	30.5
240	513	35.4	12.3	516	33.0
230	516	38.24	12.6	519	36.0
220	518	41.2	13	522	39.3
210	521	45.1	13	525	43.2
200	523	49	13.2	527	47.6
190	526	53.5	13.7	530	52.7
180	528	59.1	14.8	533	58.7
170	531	65.2	15.8	537	65.9
160	533	72	16.4	540	74.3
150	535	81	17.7	543	84.6
140	537	90.9	19.3	547	97.1
130	540	102	19.3	550	112.6
120	543	120	19.9	554	132.2
110	545	141.6	20.1	556	157.3
100	546	166	21.6	558	190.3
90	548	196	24.3	563	235.0
80	550	236.4	25.9	567	297.4
70	561	262	27.3	579	388.4
60	567	276	29.4	587	528.7
50	571	278	36.8	598	761.3

ΠΙΝΑΚΑΣ V: Πειραματικές μετρήσεις των i, V για διαφορετικές τιμές φορτίου και υπολογιζόμενη ισχύς για ϕ/β στοιχείο τύπου $sc-Si$. Διαστάσεων $5cm \times 5cm$

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
1	0.00	461.30	0.00	34	1.69	459.60	0.78
2	0.00	459.90	0.00	35	1.69	459.20	0.78
3	0.00	459.90	0.00	36	3.38	458.60	1.55
4	0.00	460.60	0.00	37	3.38	457.90	1.55
5	0.00	460.60	0.00	38	3.38	457.90	1.55
6	0.00	461.30	0.00	39	3.38	456.90	1.55
7	0.00	461.30	0.00	40	5.07	455.90	2.31
8	0.00	461.90	0.00	41	5.07	455.20	2.31
9	0.00	461.90	0.00	42	6.76	453.80	3.07
10	0.00	461.90	0.00	43	6.76	452.50	3.06
11	0.00	461.90	0.00	44	8.45	451.10	3.81
12	0.00	461.90	0.00	45	8.45	449.10	3.79
13	0.00	461.90	0.00	46	8.45	447.10	3.78
14	0.00	461.90	0.00	47	8.45	445.40	3.76
15	0.00	461.90	0.00	48	10.15	443.00	4.50
16	0.00	461.90	0.00	49	11.84	440.30	5.21
17	0.00	461.90	0.00	50	13.53	437.60	5.92
18	0.00	461.90	0.00	51	15.22	433.20	6.59
19	0.00	461.30	0.00	52	16.91	429.50	7.26
20	0.00	461.30	0.00	53	20.29	424.40	8.61
21	0.00	461.30	0.00	54	21.98	419.00	9.21
22	0.00	461.30	0.00	55	25.36	412.30	10.46
23	0.00	460.90	0.00	56	28.75	404.20	11.62
24	0.00	460.60	0.00	57	30.44	394.70	12.01
25	0.00	460.60	0.00	58	35.51	382.60	13.59
26	0.00	460.60	0.00	59	38.89	367.40	14.29
27	0.00	460.60	0.00	60	42.27	345.80	14.62
28	0.00	460.60	0.00	61	47.35	318.40	15.08
29	1.69	460.60	0.78	62	52.42	277.60	14.55
30	1.69	460.60	0.78	63	55.80	221.20	12.34
31	1.69	460.60	0.78	64	59.18	157.00	9.29
32	1.69	459.90	0.78	65	60.87	115.80	7.05
33	1.69	459.90	0.78	66	60.87	91.80	5.59

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
67	62.57	76.65	4.80	100	62.57	11.48	0.72
68	62.57	65.17	4.08	101	62.57	10.81	0.68
69	62.57	57.74	3.61	102	62.57	10.81	0.68
70	62.57	51.66	3.23	103	62.57	10.13	0.63
71	62.57	46.60	2.92	104	62.57	10.13	0.63
72	62.57	41.87	2.62	105	62.57	10.13	0.63
73	62.57	38.83	2.43	106	62.57	9.45	0.59
74	62.57	36.13	2.26	107	62.57	9.45	0.59
75	62.57	33.43	2.09	108	62.57	9.45	0.59
76	62.57	31.07	1.94	109	62.57	8.78	0.55
77	62.57	29.04	1.82	110	62.57	8.78	0.55
78	62.57	27.35	1.71	111	62.57	8.78	0.55
79	62.57	25.66	1.61	112	62.57	8.10	0.51
80	62.57	24.31	1.52	113	62.57	8.10	0.51
81	62.57	22.96	1.44	114	62.57	8.10	0.51
82	62.57	21.95	1.37	115	62.57	8.10	0.51
83	62.57	20.94	1.31	116	62.57	7.43	0.46
84	62.57	19.92	1.25	117	62.57	7.43	0.46
85	62.57	18.91	1.18	118	62.57	7.43	0.46
86	62.57	18.23	1.14	119	62.57	7.43	0.46
87	62.57	17.56	1.10	120	62.57	7.43	0.46
88	62.57	16.88	1.06	121	62.57	6.75	0.42
89	62.57	16.21	1.01	122	62.57	6.75	0.42
90	62.57	15.53	0.97	123	64.26	6.75	0.43
91	62.57	14.86	0.93	124	64.26	6.75	0.43
92	62.57	14.18	0.89	125	64.26	6.75	0.43
93	62.57	14.18	0.89	126	64.26	6.75	0.43
94	62.57	13.51	0.85	127	64.26	6.75	0.43
95	62.57	12.83	0.80	128	64.26	6.75	0.43
96	62.57	12.83	0.80	129	64.26	6.75	0.43
97	62.57	12.16	0.76	130	64.26	6.42	0.41
98	62.57	12.16	0.76	131	64.26	6.08	0.39
99	62.57	11.48	0.72	132	64.26	6.08	0.39

a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)	a/a	i(mA)	V(mV)	P(mW)
133	64.26	6.08	0.39	166	64.26	4.73	0.30
134	64.26	6.08	0.39	167	64.26	4.73	0.30
135	64.26	6.08	0.39	168	64.26	4.73	0.30
136	62.57	6.08	0.38	169	64.26	4.73	0.30
137	62.57	6.08	0.38	170	64.26	4.73	0.30
138	62.57	6.08	0.38	171	64.26	4.73	0.30
139	62.57	5.74	0.36	172	64.26	4.73	0.30
140	62.57	5.40	0.34	173	64.26	4.73	0.30
141	62.57	5.40	0.34	174	64.26	4.73	0.30
142	62.57	5.40	0.34	175	64.26	4.73	0.30
143	62.57	5.40	0.34				
144	62.57	5.40	0.34				
145	62.57	5.40	0.34				
146	64.26	5.40	0.35				
147	64.26	5.40	0.35				
148	62.57	5.40	0.34				
149	64.26	5.40	0.35				
150	64.26	5.40	0.35				
151	64.26	5.40	0.35				
152	64.26	5.40	0.35				
153	64.26	5.07	0.33				
154	64.26	4.73	0.30				
155	64.26	4.73	0.30				
156	64.26	4.73	0.30				
157	64.26	4.73	0.30				
158	64.26	4.73	0.30				
159	64.26	4.73	0.30				
160	64.26	4.73	0.30				
161	64.26	4.73	0.30				
162	64.26	4.73	0.30				
163	64.26	4.73	0.30				
164	64.26	4.73	0.30				
165	64.26	4.73	0.30				

Πίνακας VI: Πειραματικές μετρήσεις των i_{sc} , V_{oc} , T_c για κάθε απόσταση ϕ/β στοιχείου-λαμπτήρα για το ϕ/β στοιχείο τύπου sc-Si διαστάσεων 5cmX5cm

l(cm)	isc(mA)	Voc(mV)	Tc(°C)	Voc,corr(mV)	It(W/m ²)
570	10.15	313.6	24.26	313.6	5.9
560	10.15	316.3	24.34	316.38	6.1
550	10.15	323	24.56	323.3	6.3
540	11.84	329.1	24.71	329.55	6.5
530	11.84	332.5	24.85	333.09	6.8
520	11.84	336.5	24.95	337.19	7.0
510	11.84	338.6	23.89	338.23	7.3
500	13.53	346.7	24.21	346.65	7.6
490	13.53	348	23.89	347.63	7.9
480	13.53	354.1	23.82	353.66	8.3
470	15.23	357.8	24.09	357.63	8.6
460	15.23	364.9	23.94	364.58	9.0
450	16.92	371.7	24.21	371.65	9.4
440	16.92	377.1	23.99	376.83	9.8
430	18.61	380.5	23.92	380.16	10.3
420	18.61	387.2	24.19	387.13	10.8
410	20.3	392	23.87	391.61	11.3
400	20.3	393.3	24.19	393.23	11.9
390	21.99	398.7	24.09	398.53	12.5
380	21.99	405.5	24.04	405.28	13.2
370	23.69	410.2	23.99	409.93	13.9
360	25.38	412.9	24.19	412.83	14.7
350	25.38	419	24.19	418.93	15.5
340	27.07	425.7	23.99	425.43	16.5
330	28.76	429.1	24.11	428.95	17.5
320	30.45	431.2	24.19	431.13	18.6
310	32.15	439.3	24.19	439.23	19.8
300	33.84	442.6	24.14	442.48	21.1
290	35.53	446	24.28	446.02	22.6

l(cm)	isc(mA)	Voc(mV)	Tc(°C)	Voc,corr(mV)	It(W/m ²)
280	37.22	451.4	24.73	451.87	24.3
270	40.61	458.9	24.43	459.07	26.1
260	43.99	464.3	24.36	464.4	28.2
250	47.37	469	23.96	468.7	30.5
240	50.76	470.3	24.87	470.91	33.0
230	52.54	475.8	24.97	476.51	36.0
220	55.83	481.8	24.65	482.19	39.3
210	62.6	487.9	24.5	488.14	43.2
200	65.98	490.6	24.63	490.97	47.6
190	72.75	496	24.73	496.47	52.7
180	77.83	502.8	24.12	502.66	58.7
170	86.3	500.8	24.95	501.49	65.9
160	94.7	508.9	24.85	509.49	74.3
150	101.5	517.7	24.41	517.85	84.6
140	115	520.4	24.73	520.87	97.1
130	128.6	527.8	24.83	528.37	112.6
120	140.4	531.4	24.53	531.67	132.2
110	162.4	537.9	24.93	538.57	157.3
100	187.8	544	25.17	544.91	190.3
90	218.2	545.4	25.56	546.7	235.0
80	255.5	551.4	25.29	552.43	297.4
70	309.6	557.5	25.17	558.41	388.4
60	375.6	558.2	25.56	559.5	528.7
50	472	562.9	26.21	564.85	761.3
40	617.5	578.5	24.17	578.41	1189.5