



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πειραματική Μελέτη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων
Λεπτών Υμενίων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ισίδωρος Σ. Λαγόπουλος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Πειραματική Μελέτη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων Λεπτών Υμενίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ισίδωρος Σ. Λαγόπουλος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουλίου 2011.

.....
Κωνσταντίνος Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτα Βασιλείου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
Ισίδωρος Σ. Λαγόπουλος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ισίδωρος Σ.Λαγόπουλος, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν πειραματικά και θεωρητικά, φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (α -Si) και στοιχεία CIS/CIGS. Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν υπό συνθήκες μεταβλητής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για διάφορες συνδεσμολογίες στοιχείων. Βάσει των μετρήσεων βγήκαν συμπεράσματα όσον αφορά τη βέλτιστη λειτουργία των στοιχείων και την επίδραση που έχουν διάφοροι συντελεστές στην απόδοσή τους. Στο θεωρητικό μέρος, παρουσιάστηκαν οι αρχές λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου και στοιχείων χαλκοπυρίτων.

Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στην ιστορική εξέλιξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών και στα χαρακτηριστικά του ήλιου. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι ημιαγωγοί, η δίοδος p-n και τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στο τρίτο και το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι τεχνολογίες λεπτών υμενίων με άμορφο πυρίτιο και με χαλκοπυρίτες αντίστοιχα. Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά το πειραματικό μέρος όπου περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά.

Λέξεις Κλειδιά

ήλιος, φάσμα, δίοδος p-n, φωτοβολταϊκό στοιχείο, νόθευση, συντελεστής απορρόφησης, ενεργειακό διάκενο, απόδοση, φωτόρευμα, τεχνολογία λεπτών υμενίων, άμορφο πυρίτιο, CIS, CIGS, χαλκοπυρίτης, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Abstract

This diploma thesis involves experimental and theoretical study of amorphous silicon (a-Si) and CIS/CIGS solar cells. The experiments were conducted under conditions of variable illumination and temperature on a variety of cell circuits. Based on the data collected, conclusions were made regarding the optimal operation of the solar cells and the effect of several factors on their efficiency. On the theoretical level, the principles and characteristics of amorphous silicon and chalcopyrite solar cells were presented.

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

Key Words

sun, spectrum, p-n diode, solar cell, doping, absorption coefficient, energy gap, efficiency, photocurrent, thin film technology, amorphous silicon, CIS, CIGS, chalcopyrite, solar radiation intensity

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Κωνσταντίνο Δέρβο για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση που μου έδωσε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Ιωάννη Μέργο για τη βοήθεια, τη συνεργασία, την υποστήριξη και την καθοδήγησή του σε όλο το διάστημα της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου.

Επιπλέον, πρέπει να ευχαριστήσω του γονείς μου Στέλιο και Σοφία για την υποστήριξη και το κουράγιο που μου έδιναν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος ευχαριστώ τους φίλους μου Άννα, Άγι, Γιώργο και Κοσμά για το κουράγιο και τις συμβουλές που μου έδωσαν.

Περιεχόμενα

1ο Κεφάλαιο-Εισαγωγή.....	11
1.1-Η ανάγκη για φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	11
1.2-Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών.....	11
1.3-Ο ήλιος και το ηλιακό φάσμα.....	12
2ο Κεφάλαιο-Το φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	17
2.1-Ημιαγωγοί και η δίοδος p-n.....	17
2.1.1-Ημιαγωγοί.....	17
2.1.2-Ημιαγωγοί προσμίξεων.....	20
2.1.3-Δίοδος p-n.....	21
2.2-Ο τρόπος λειτουργίας.....	23
2.3-Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.....	26
2.4-Η απόδοση.....	29
2.4.1-Το ενεργειακό διάκενο.....	29
2.4.2-Η επανασύνδεση των φορέων.....	30
2.4.3-Η θερμοκρασία.....	30
2.4.4-Ανάκλαση.....	31
2.4.5-Παρασιτικές εσωτερικές αντιστάσεις.....	33
2.5-Ηλεκτρικό Ισοδύναμο.....	33
2.6-Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	34
2.6.1-Κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	34
2.6.2-Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων.....	37
2.6.3-Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων.....	37
3ο Κεφάλαιο-Το άμορφο πυρίτιο a-Si.....	39
3.1-Η δομή του a-Si.....	39
3.2- Το φαινόμενο Staebler-Wronski.....	40
3.3-Ενεργειακές καταστάσεις.....	42
3.4-Οπτικές ιδιότητες του a-Si.....	43
3.5-Νόθευση του a-Si:H.....	45
3.6-Μέθοδοι κατασκευής άμορφου πυριτίου.....	47
3.6.1-Η μέθοδος RF PECVD.....	47
3.6.2-Μέθοδοι VHF PECVD και MW PECVD.....	49
3.6.3-Μέθοδος θερμού νήματος.....	49
3.6.4-Αραίωση με υδρογόνο και κράματα βασισμένα στο a-Si:H.....	49
3.6.5-Παραγωγή φ/β στοιχείων a-Si:H.....	50
3.7-Το φ/β στοιχείο άμορφου πυριτίου μίας επίστρωσης.....	51
3.7.1-Δομή του στοιχείου.....	51
3.7.2-Το ενδογενές τμήμα.....	52
3.7.3-Επιφάνεια ακτινοβολίας.....	53
3.7.4-Μέθοδοι σχεδίασης.....	54
3.7.5-Τεχνικές παγίδευσης του φωτός.....	55
3.7.6-Είδη TCO και απαιτήσεις.....	55
3.7.7-Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου a-Si:H.....	56
3.8-Φ/β στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων.....	58
4ο Κεφάλαιο-Φωτοβολταϊκά στοιχεία CIS,CIGS.....	61
4.1-Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός $CuInSe_2$, ο δισεληνογαλλιούχος χαλκός $CuGaSe_2$ και η ένωση $Cu(InGa)Se_2$	61
4.1.1-Η δομή.....	61

4.1.2-Οπτικές ιδιότητες.....	62
4.1.3-Ηλεκτρικές ιδιότητες.....	63
4.1.4-Η επιφάνεια και τα όρια των κόκκων.....	63
4.2-Η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου CIS.....	64
4.3-Τεχνικές εναπόθεσης του οπίσθιου ακροδέκτη και του απορροφητή.....	65
4.3.1-Το υπόστρωμα.....	65
4.3.2-Το στρώμα Mo.....	66
4.3.3-Τεχνικές εναπόθεσης του απορροφητή.....	66
4.3.3.1-Η τεχνική της θερμικής εξάτμισης.....	66
4.3.3.2-Η τεχνική της σελινοποίησης.....	69
4.4-Σχηματισμός της ετεροένωσης.....	69
4.4.1-Εναπόθεση από χημικό λουτρό.....	69
4.4.2-Άλλες μέθοδοι εναπόθεσης.....	71
4.4.3-Εναλλακτικά ενδιάμεσα στρώματα (buffer layers).....	71
4.4.4-Εμπρόσθιοι ακροδέκτες.....	72
4.5-Λειτουργία του φ/β στοιχείου CIS/CIGS.....	72
4.5.1-Το φωτόρευμα.....	72
4.5.2-Η δίοδος.....	74
4.6-Παραγωγή φ/β στοιχείων CIGS.....	76
5ο Κεφάλαιο-Εργαστηριακό μέρος.....	79
5.1-Περιγραφή των πειραμάτων.....	79
5.2-Εξοπλισμός.....	80
5.3-Περιγραφή συλλογής δεδομένων.....	82
5.4-Γραφικές παραστάσεις I-V, P-V.....	86
5.4.1-Μετρήσεις ενός στοιχείου CIS υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας.....	88
5.4.2-Μετρήσεις ενός στοιχείου CIS σε διαφορετικές θερμοκρασίες.....	94
5.4.3- Μετρήσεις στοιχείων CIS σειριακής και παράλληλης συνδεσμολογίας.....	101
5.4.4-Μετρήσεις εύκαμπτων στοιχείων α-Si σε διαφορετικές θερμοκρασίες.....	109
5.5- Μελέτη των καμπυλών I-V, P-V και συμπεράσματα.....	116
5.5.1-Το βήμα αύξησης της αντίστασης του φορτίου.....	116
5.5.2-Παρασιτικές αντιστάσεις.....	116
5.5.3-Η επίδραση της έντασης ακτινοβολίας.....	117
5.5.4-Διάρκεια ακτινοβολίας.....	118
5.5.5-Σύνδεση σε σειρά.....	119
5.5.6-Σύνδεση σε παραλληλία.....	121
5.5.7-Η θερμοκρασία.....	123
5.5.8-Η αντίσταση φορτίου R_{pmax}	125
Παράρτημα.....	127
Βιβλιογραφία.....	142

Εισαγωγή

1.1. Η ανάγκη για φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Οι ανάγκες της κοινωνίας μετά την βιομηχανική επανάσταση, άλλαξαν δραματικά, με την εξ ολοκλήρου πλέον εξάρτησή της από την παραγωγή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βέλτιστος τρόπος παραγωγής, μέχρι και λίγες δεκαετίες πριν, ήταν η καύση του ορυκτού πλούτου του φλοιού του πλανήτη. Αυτή η μέθοδος όμως, εκτός από τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, άρα άμεσα και στην ποιότητα ζωής του ανθρώπου, αγνόησε το γεγονός ότι τα αποθέματα ορυκτών έχουν πεπερασμένη ποσότητα. Η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια, πολλαπλασιάστηκε με την πάροδο των χρόνων και μέσα σε 200 χρόνια καταναλώθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό των διαθέσιμων πόρων, επιτρέποντας την εκμετάλευση τους για 40-50 χρόνια ακόμα έως την εξάντλησή τους.

Η απάντηση στο ενεργειακό πρόβλημα που προκύπτει, δίνεται από νέες μορφές παραγωγής ενέργειας, που δεν στηρίζονται σε ρυπογόνες μεθόδους εκμετάλευσης πεπερασμένων πόρων, αλλά σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως ο άνεμος, η βιομάζα, το νερό, ο ήλιος και άλλα. Ο ήλιος, εκτός από πηγή φωτός και θερμότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή η μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, στηρίζεται στην ιδιότητα ορισμένων στοιχείων του περιοδικού πίνακα να εμφανίζουν ηλεκτρική τάση στα άκρα τους όταν προσπίπτει στην επιφάνειά τους φως.

1.2. Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών

Οι πρώτες παρατηρήσεις πάνω στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, έγιναν από τον 19χρονο τότε Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel το 1839 ο οποίος ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς πειραματιζόταν με ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελούμενο από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγώγιμο υγρό στο οποίο η ροή αυξανόταν με την έκθεση στον ήλιο. Οι σημειώσεις του γύρω από το φαινόμενο, είχαν φανεί πολύ ενδιαφέρουσες στην επιστημονική κοινότητα αλλά χωρίς πρακτική εφαρμογή.

Το 1876 ο Willoughby Smith με τον μαθητή του Williams Adams παρατηρεί ένα ακόμη φαινόμενο, παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, μετά την έκθεση σεληνίου (Se) στον ήλιο. Η ανακάλυψη αυτή ήταν πολύ σημαντική αφού πλέον είχε αποδειχθεί ότι ένα στοιχείο μπορούσε να μετατρέψει το φως σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς θέρμανση και χωρίς κινούμενα μέρη.

Το 1883 ο Αμερικανός εφευρέτης Charles Fritz παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 1-2% από φύλλα σεληνίου.

Το 1918 Ο Πολωνός Jan Czochralski κατασκευάζει το πρώτο στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με μία μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα κ σήμερα.

Το σημαντικότερο βήμα στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας έγινε την άνοιξη του 1953 όταν οι επιστήμονες της Bell Laboratories Gerald Pearson, Daryl Chapin και Calvin Fuller, καθώς ερευνούσαν το στοιχείο πυρίτιο (Si) για πιθανές εφαρμογές στην ηλεκτρονική, εφηύραν το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο ήταν πολύ πιο αποδοτικό απο τα παλιότερα στοιχεία φτιαγμένα απο σελήνιο. Η Bell Telephone Laboratories σχεδίασε λίγο αργότερα φ/β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 4%. Έτσι, άνοιξε ο δρόμος για νέα επιτεύγματα στον κλάδο, με διαρκώς αυξανόμενες αποδόσεις, νέες μεθόδους παραγωγής φ/β στοιχείων και χρήση διαφορετικών υλικών απο το πυρίτιο. Η τεχνολογία αυτή, βρήκε εφαρμογή αρχικά στην τροφοδότηση διαστημικών δορυφόρων όπως ο δορυφόρος Vanguard I .

Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν να κάνουν την εμφάνιση τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των φ/β συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος πελάτης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν είναι η NASA. Οι υψηλές τιμες στα φωτοβολταϊκα ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε περισσότερο ενθουσιώδης αποδοχή από την αγορά. Ενδεικτικά η τιμη των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τα 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια, το 1970 αγγίζει τα 100\$/Watt. Το 1973 οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50\$/Watt.

Η πρώτη εγκατάσταση φ/β που φτάνει στα επίπεδα του 1MW γίνεται στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων.

Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή φ/β φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$.

Το 1999 η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το National Renewable Energy Laboratory (NREL) των Η.Π.Α. αναπτύσσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 32.3%. Την ίδια χρονιά το ρεκόρ στην απόδοση των Thin Films φτάνει στο 18.8%. Η παραγωγή όλων των τεχνολογιών των φ/β πλαισίων φτάνει συνολικά τα 200 MW.

Από το 2004 και μετά, η μαζική είσοδος μεγάλων εταιρειών στον χώρο των φ/β φέρνει την μαζική παραγωγή και αυτή με την σειρά της την τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων στα 6.5 ευρώ/Wp. Γερμανία και Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή φ/β πλαισίων και πλέον σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες αρχίζουν, με τον έναν (παραγωγή εξοπλισμού) ή τον άλλον τρόπο (κατασκευή φ/β εγκαταστάσεων) , να υιοθετούν τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και να τις παγιώνουν στην συνείδηση των επενδυτών αλλά και των καταναλωτών ενέργειας. Η συνολική παραγωγή το 2004 έφτασε τα 1.200 MW ενώ ο τζίρος της ίδιας χρονιάς άγγιξε τα 6.500.000.000\$.

Σήμερα με οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

1.3. Ο ήλιος και το ηλιακό φάσμα

Στο παρελθόν το φως θεωρείτο ότι ήταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτό εξηγούσε με εύστοχο τρόπο πολλά από τα παρατηρούμενα φαινόμενα, όμως άλλα παρέμεναν ανεξήγητα. Στις αρχές του 20ου αιώνα, ο Einstein κατάφερε να εξηγήσει την επίδραση της συχνότητας και της έντασης του φωτός στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εισάγοντας τα κβάντα φωτός. Η προσέγγιση αυτή οδήγησε

στην ανακάλυψη του στοιχειώδους σωματιδίου φωτός, του φωτονίου. Αυτό, χαρακτηρίζει τη δυαδική φύση του φωτός που συνιστά ένα κύμα ύλης. Η ενέργεια ενός σωματιδίου φωτός υπολογίζεται ως εξής:

$$E = h \cdot f = \hbar \cdot \omega$$

Σχέση 1.1.

όπου h είναι η σταθερά του Planck ($6.63 \times 10^{-34} \text{ Js} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs}$), f η συχνότητα, $\hbar = h/2\pi$ και ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

Το μήκος κύματος σχετίζεται με τη συχνότητα από την εξίσωση:

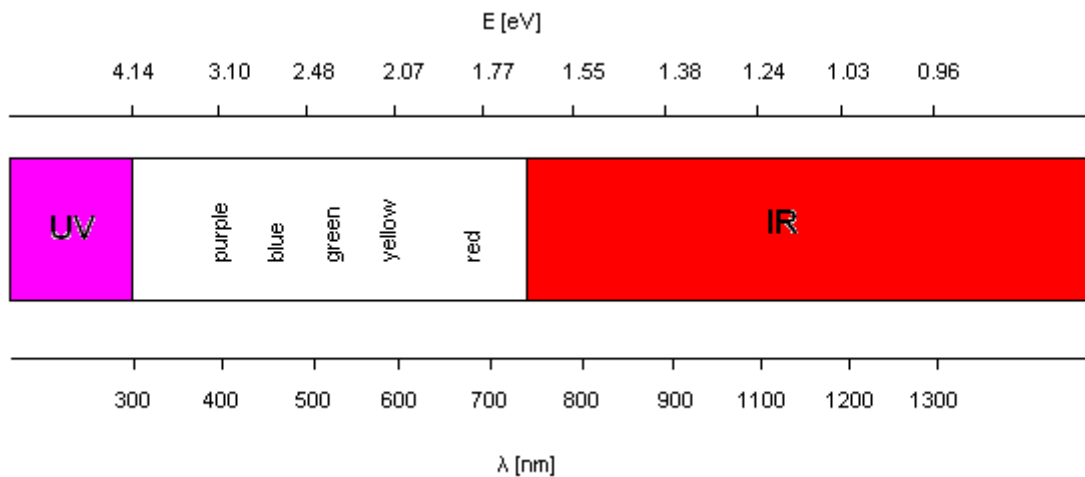
$$c = f \cdot \lambda$$

Σχέση 1.2.

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και λ το μήκος κύματος.

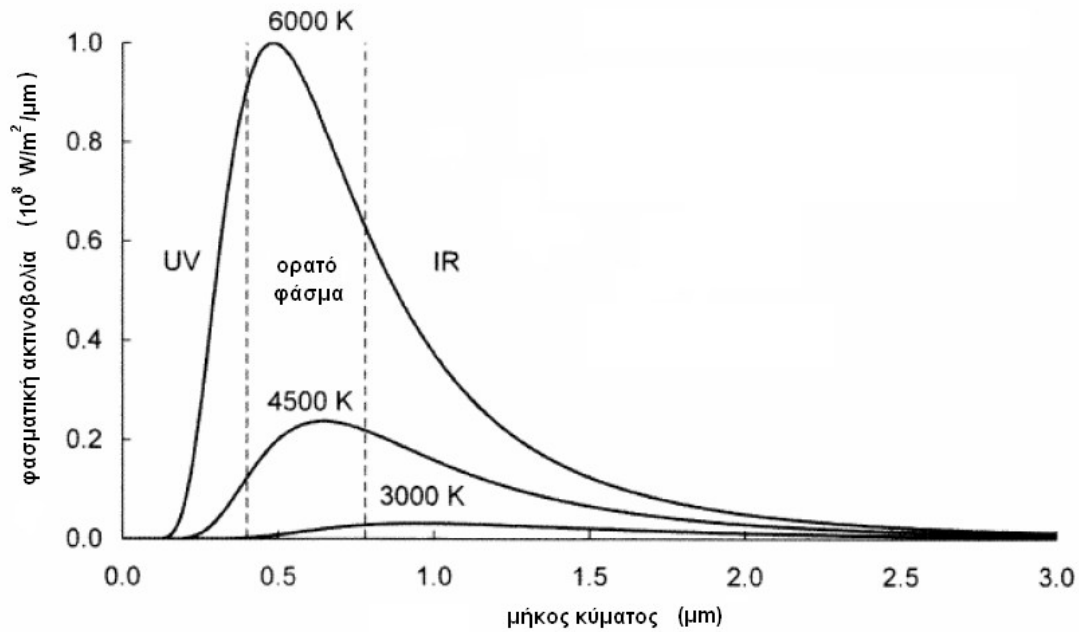
Κατά τη μελέτη της ηλιακής ενέργειας, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως στην ενέργεια του φωτός που προσπίπτει στο φ/β στοιχείο. Αυτή ονομάζεται ένταση φωτισμού ή ακτινοβολία, υπολογίζεται ως ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και μετράται σε W/m^2 (εναλλακτικά σε kW/m^2 ή W/cm^2).

Το φως καλύπτει ένα ευρύ φάσμα ενεργειών. Ένα σύνολο φωτονίων με διαφορετικές ενέργειες ονομάζεται φάσμα. Η ακτινοβολία σε αυτή την περίπτωση είναι το σύνολο όλων των φασματικών συνεισφορών. Η ενέργεια ενός φωτονίου, μπορεί να εκτιμηθεί από το χρώμα του. Το λευκό φως που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος είναι ένα μείγμα όλων των ενεργειακών καταστάσεων.



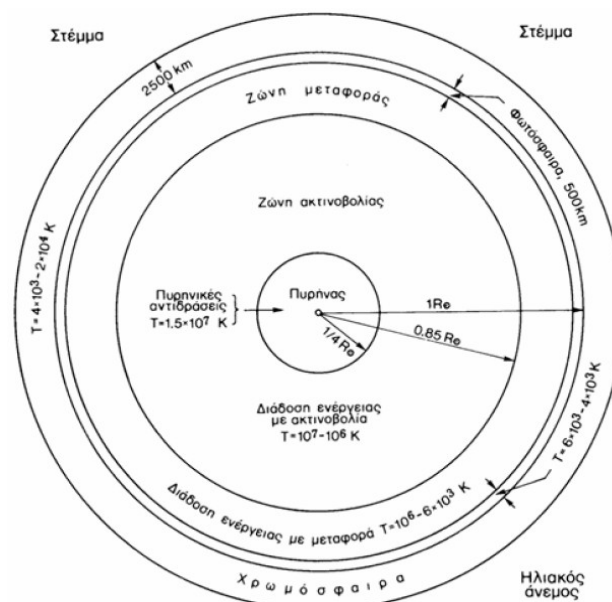
Σχήμα 1.1. Η σχέση ανάμεσα στην ενέργεια, το χρώμα και το μήκος κύματος.

Κάθε σώμα ακτινοβολεί φως ανάλογα με τη θερμοκρασία του. Η ποσότητα και η φασματική κατανομή εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος. Ο όρος μέλαν σώμα σχετίζεται με έναν τέλει απορροφητή (εκπομπό) ο οποίος βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον του. Αν ένα σώμα έχει μεγαλύτερη ενέργεια από το περιβάλλον του, τότε προσπαθεί να απαλλαγεί από αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί εκπέμποντας φωτόνια διαφόρων ενεργειακών καταστάσεων, πράγμα που οδηγεί σε μία χαρακτηριστική φασματική ακτινοβολία, την “ακτινοβολία μέλανος σώματος”. Η εξάρτηση της ακτινοβολίας αυτής από τη θερμοκρασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.2. Φασματική εκπομπή ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες.

Ο Ήλιος αποτελείται από θερμή αέρια ύλη η οποία υπόκειται σε διαρκή πυρηνική σύντηξη. Η διάμετρος του ισούται περίπου με $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του μία φορά ανα τέσσερις εβδομάδες (όπως φαίνεται από τη Γη). Εξαιτίας της μη ομοιόμορφης πυκνότητάς του, ο Ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αντιδραστήρας σύντηξης του οποίου τα τοιχώματα αποτελούνται από θερμά αέρια που συγκρατώνται από βαρυτικές δυνάμεις. Ξεκινώντας ως ακτίνες X, στον πυρήνα, ακτινοβολούσες και μεταφορικές διαδικασίες μετατρέπουν την ενέργεια σε μεγαλύτερα μήκη κύματος στην επιφάνεια μέσω, εκπομπής, απορρόφησης και επανακτινοβολίας.



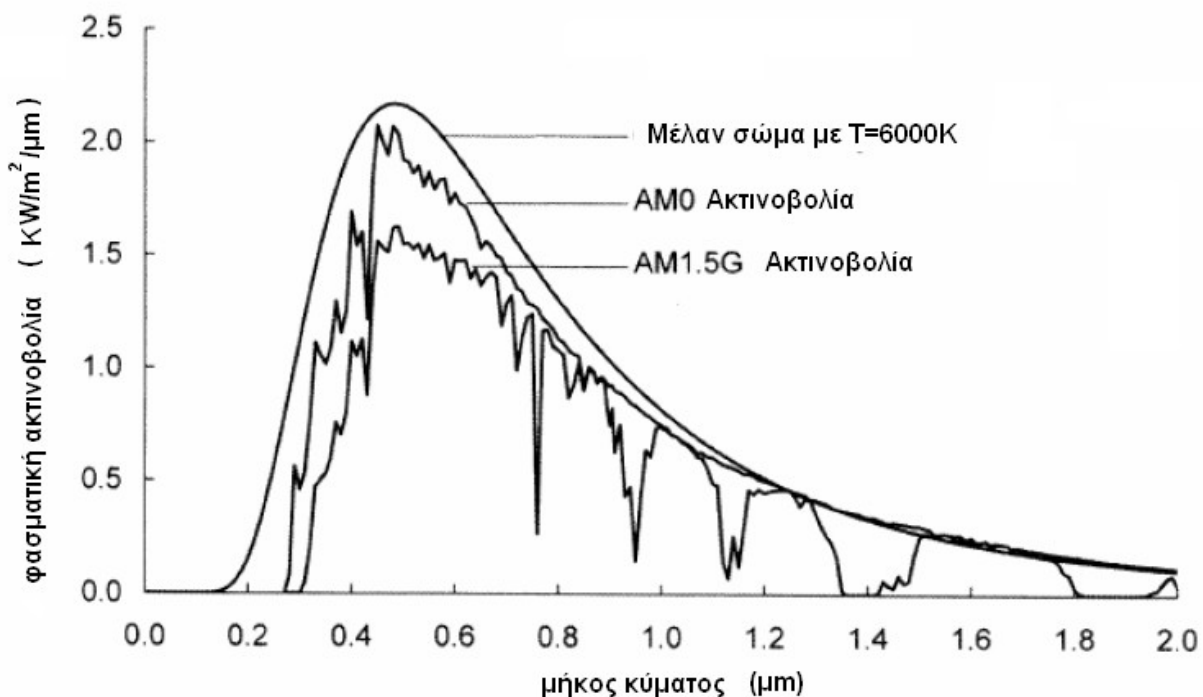
Σχήμα 1.3. Σχηματικό διαγραμμα της δομής του Ήλιου.

Στο εσωτερικό σφαίρας με ακτίνα $0.23R$ (όπου R είναι η ακτίνα του ήλιου) βρίσκεται ο πυρήνας

του Ήλιου, ο οποίος περιέχει το 40% της μάζας του και στον οποίο δημιουργείται το 90% της ενέργειάς του. Η θερμοκρασία στον πυρήνα του ισούται με $8-40 \times 10^6 \text{K}$ και η πυκνότητα του πυρήνα του με 80 έως 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Από το 0.23R έως το 0.7R η θερμοκρασία πέφτει περίπου στους $1.3 \times 10^5 \text{K}$ και η πυκνότητα μειώνεται φτάνοντας τα 0.07g/cc . Από το 0,7 έως το 1R βρίσκεται η μεταφορική ζώνη, κατά μήκος της οποίας η θερμοκρασία πέφτει, φτάνοντας στην επιφάνεια περίπου τους 5762K . Η ανώτερη επιφάνεια της μεταφορικής ζώνης, η φωτόσφαιρα, αποτελεί την πηγή σχεδόν ολόκληρης της ηλιακής ακτινοβολίας. Πάνω από τη φωτόσφαιρα βρίσκεται η επιφάνεια αναστροφής, ακολουθούμενη από τη χρωμόσφαιρα σε ύψος 10000km και τέλος το ηλιακό στέμμα.

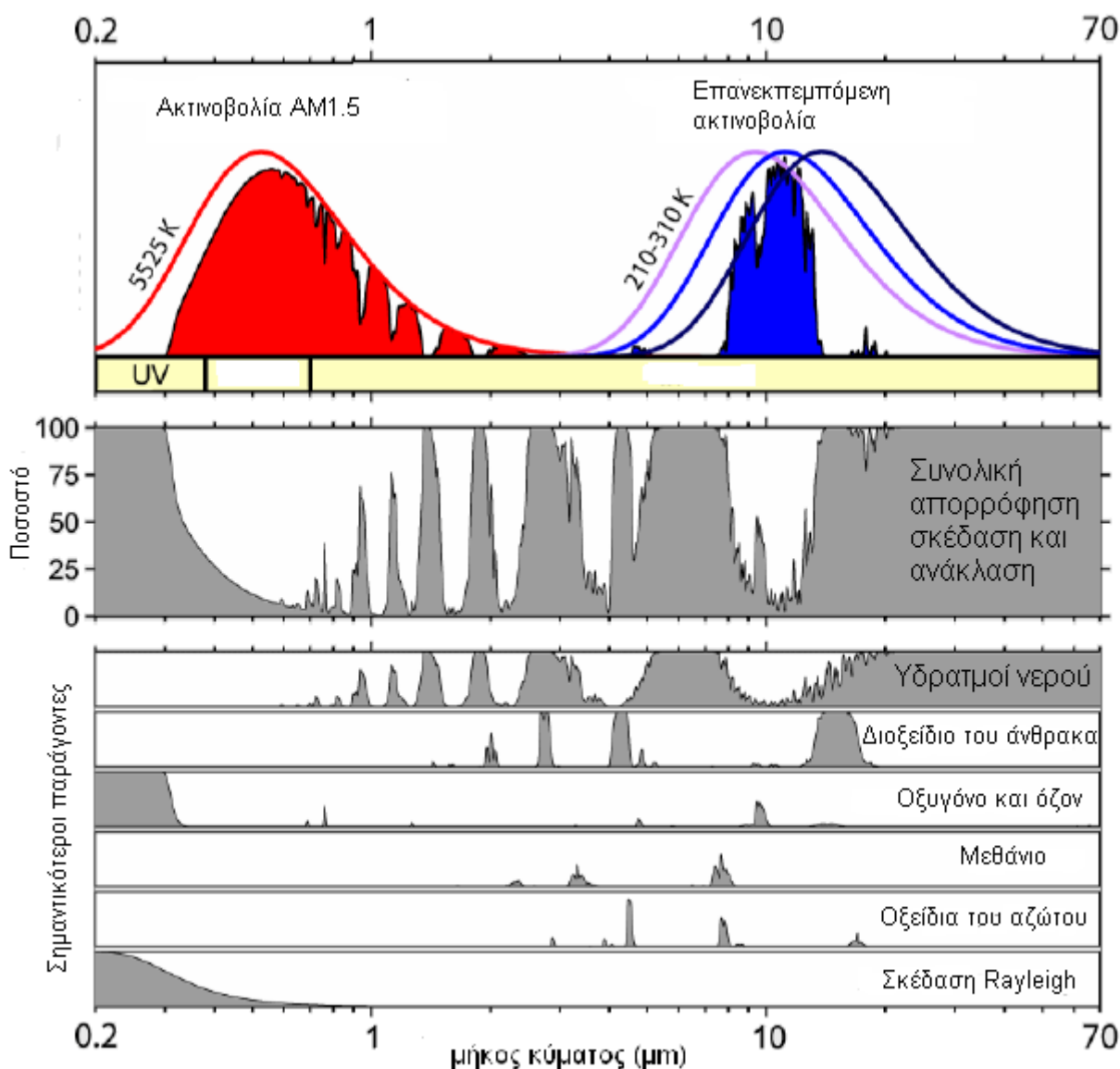
Ως AM0 ορίζεται η ακτινοβολία στο διάστημα ή σε μηδενική ατμόσφαιρα. Η AM1 αναφέρεται στον Ήλιο που βρίσκεται ακριβώς κατακόρυφα στο επίπεδο του γήινου παρατηρητή. Η AM1.5 αποτελεί ένα τυπικό ηλιακό φάσμα στην επιφάνεια της Γης σε μια ηλιόλουστη μέρα και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει του ηλιακούς συλλέκτες.

Συγκρίνοντας τα φάσματα ακτινοβολίας AM0, AM1.5 με το φάσμα ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος σε θερμοκρασία $T=6000 \text{K}$ παρατηρείται ότι οι ακτινοβολίες είναι σε αρκετό βαθμό όμοιες.



Σχήμα 1.4. Σύγκριση φάσματος ακτινοβολίας AM0, AM1.5 και μέλανος σώματος θερμοκρασίας $T=6000 \text{K}$

Τρεις βασικοί μηχανισμοί απορρόφηση, σκέδαση και ανάκλαση επιδρούν έτσι ώστε να τροποποιήσουν την ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (δηλαδή υψηλής ενέργειας) καθώς αυτή περνά μέσα από την ατμόσφαιρα της Γης. Η απορρόφηση περιλαμβάνει τη μετατροπή της προσπίπτουσας ενέργειας σε θερμότητα και την μερική επανεκπομπή της ως ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος.



Σχήμα 1.5. Εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα και οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

Η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από το όζον και η υπέρυθη από τους υδρατμούς νερού. Η σκέδαση είναι η αλλαγή στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας, η οποία συνδέεται και με το μήκος κύματος, και αποδίδεται στην ύπαρξη των μορίων του αέρα, των υδρατμών αλλά και της σκόνης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα. Η ανάκλαση που πραγματοποιείται στις διεπιφάνειες είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος.

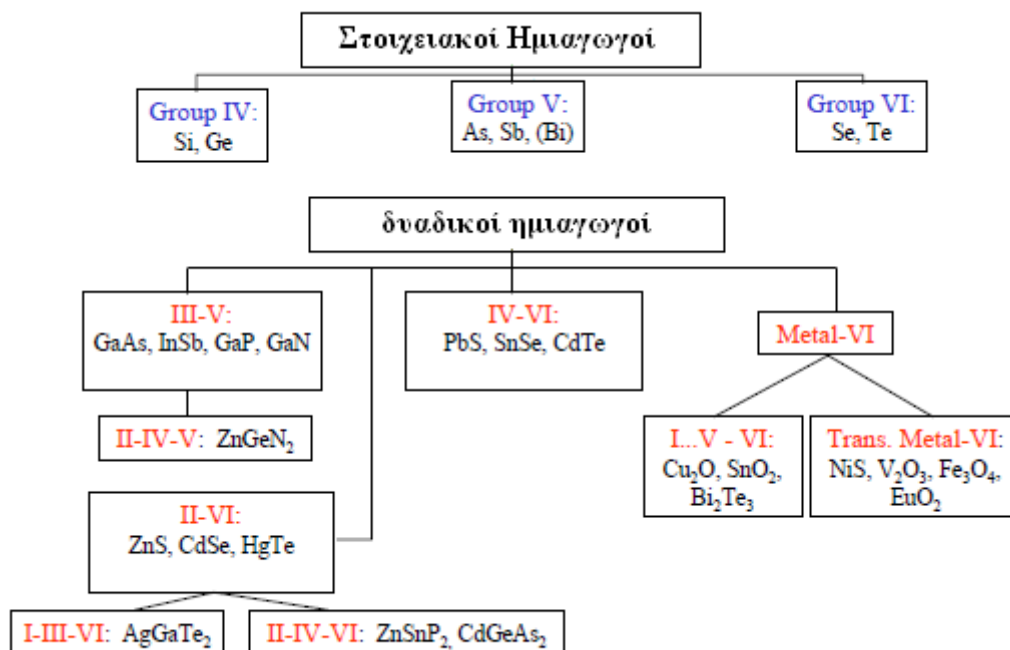
Η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος απορροφάται στην ιονόσφαιρα από το άζωτο, το οξυγόνο και άλλα ατμοσφαιρικά στοιχεία. Το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας απορροφάται από το όζον με σχεδόν απόλυτη απορρόφηση για μήκη κύματος που βρίσκονται κάτω από τα 290nm. Σε μήκη κύματος μεγαλύτερα των 2300nm παρατηρείται υψηλή απορρόφηση από το CO₂ και το H₂O και έτσι η μετάδοση βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Παρ'όλα αυτά το περιεχόμενο της ακτινοβολίας σε αυτή την περιοχή είναι μικρότερο του 5% και έτσι δεν προκαλούνται σημαντικές αλλαγές. Επιπλέον, αυτή η περιοχή δεν αφορά τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Έτσι η απορρόφηση, η σκέδαση και η ανάκλαση έχουν σαν αποτέλεσμα το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που διατίθεται για εφαρμογές στη Γη, να βρίσκεται ανάμεσα στα 0.29μm και τα 2.5μm.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο

2.1. Ημιαγωγοί και η δίοδος p-n

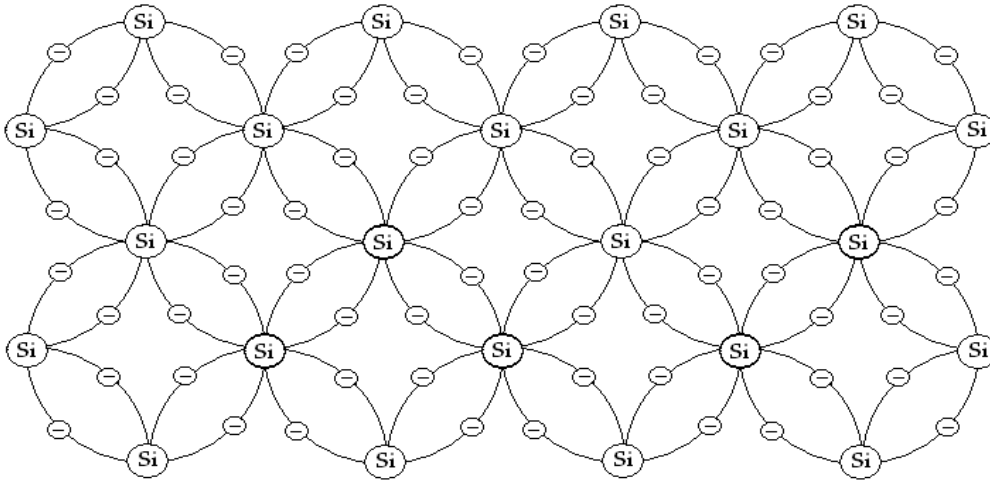
2.1.1. Ημιαγωγοί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγούς, που είναι σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, ανάμεσα στους αγωγούς και στους μονωτές.



Σχήμα 2.1. Στοιχειώδεις ημιαγωγοί και ενώσεις ημιαγωγών.

Ο δημοφιλέστερος ημιαγωγός, ήδη από το 1950 είναι το πυρίτιο (Si), καθώς τα πρώτα φ/β στοιχεία, αλλά και το 90% περίπου της σημερινής παραγωγής στηρίζονται σε αυτό. Είναι το δεύτερο στοιχείο στη Γη σε αφθονία, μετά το οξυγόνο (21% έναντι 30%) και χαρακτηρίζεται από την τετραεδρική κρυσταλλική δομή του.



Σχήμα 2.2. Απλοποιημένη απεικόνιση σε δύο διαστάσεις του πλέγματος του πυριτίου.

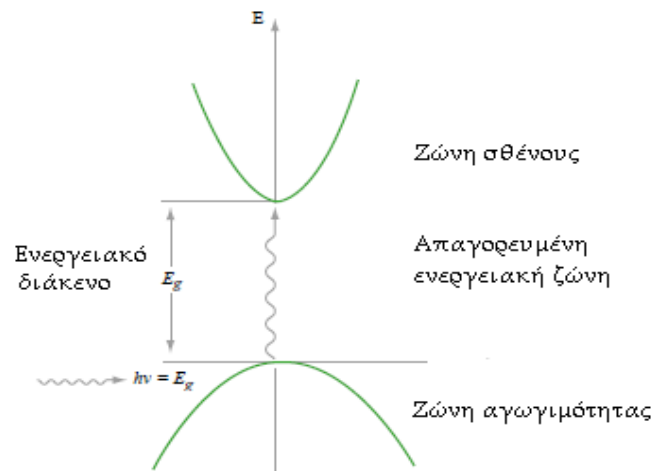
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, κάθε άτομο πυριτίου του πλέγματος συνδέεται με 4 χημικούς δεσμούς (2 ηλεκτρόνια δεσμεύονται για τη δημιουργία ενός δεσμού, ένα από κάθε μετέχον άτομο) με τα γειτονικά του άτομα. Συνεπώς, στη θεμελιώδη κατάσταση, όπου και τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους είναι δεσμευμένα ο ημιαγωγός δεν έχει ελεύθερους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος άρα συμπεριφέρεται σαν μονωτής.

Στην περίπτωση που ένας ημιαγωγός απορροφήσει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας (με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας), παραδείγματος χάριν αν βρίσκεται στη συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε η θερμική ενέργεια κατενέμεται στα άτομά του και προκαλεί την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ελευθερωμένα ηλεκτρόνια, απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η αποδυνάμωση των δεσμών στο πλέγμα δεν συνεπάγεται την κατάρρευση της συνοχής του σώματος αφού οι τρεις εναπομείναντες χημικοί δεσμοί μαζί με τον ένα ατελή δεσμο, επαρκούν για τη συγκράτηση των ατόμων στη θέση τους.

Τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, τα ελεύθερα δηλαδή ηλεκτρόνια, περιστρέφονται άτακτα στο σώμα όσο διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια. Αν αυτή μειωθεί σημαντικά, τότε επιστρέφουν στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού. Η κάλυψη της κενής θέσης μπορεί να γίνει και από κάποιο γειτονικό ηλεκτρόνιο, το οποίο θα αφήσει μία νέα κενή θέση στο αρχικό του άτομο. Η μετατόπιση των κενών θέσεων στο πλέγμα μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ιδεατό σωματίδιο, τις οπές (h), οι οποίες θεωρητικά έχουν ίδια μάζα και αντίθετο φορτίο από τα ηλεκτρόνια.

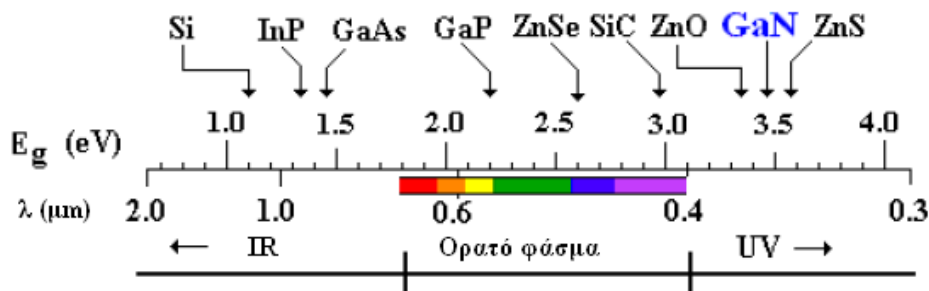
Από ενεργειακής άποψης, τα ηλεκτρόνια χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Στα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων (λιγότερο ενεργά) που δεν συμμετέχουν στον σχηματισμό των χημικών δεσμών, στα ηλεκτρόνια σθένους που σχηματίζουν τους δεσμούς και στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων σθένους σχηματίζουν μία ενεργειακή ζώνη, την ζώνη σθένους και αντίστοιχα οι ενέργειες των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας σχηματίζουν τη ζώνη αγωγιμότητας. Η ενεργειακή απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του λιγότερου ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και του περισσότερο ενεργού από τα ηλεκτρόνια σθένους, ονομάζεται ενεργειακό διάκενο και εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας με ταυτόχρονη δημιουργία μίας οπής.

Σε ένα απολύτως καθαρό σώμα, χωρίς καθόλου προσμίξεις και τέλει κρυσταλλικό πλέγμα, δεν υπάρχουν ενεργειακές στάθμες στο διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους (E_v) και τη ζώνη αγωγιμότητας (E_c) και η περιοχή αυτή αποτελεί μία απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη.



Σχήμα 2.3. Αναπαράσταση ενεργειακών ζώνων και του ενεργειακού διαύκνου.

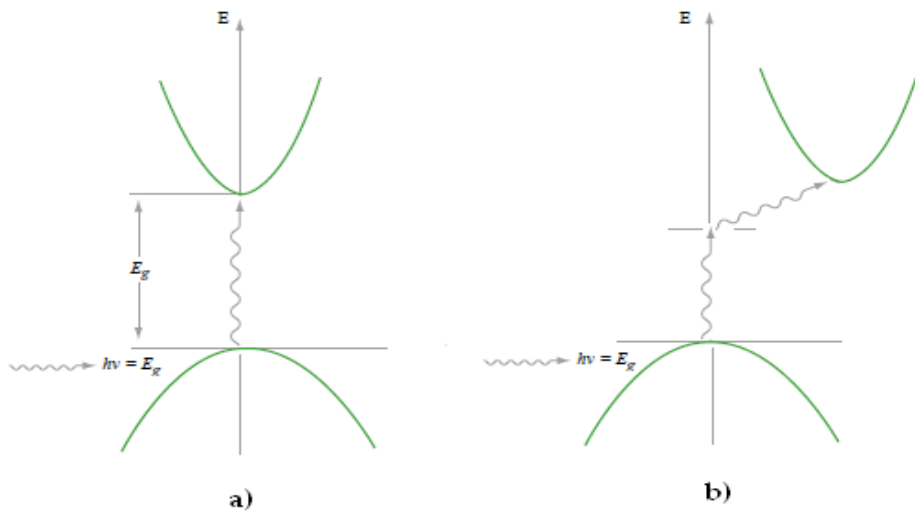
Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους μπορεί να γίνει όταν του προσφερθεί μία ποσότητα ενέργειας, όπως μια δέσμη ακτινοβολίας με φωτόνια ενέργειας $E=hf$. Στην περίπτωση που η ενέργεια των φωτονίων είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο E_g του στοιχείου, τότε το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να την απορροφήσει. Αν τα προσπίπτοντα φωτόνια έχουν ενέργεια μεγαλύτερη του E_g , το ηλεκτρόνιο αφήνει το χημικό δεσμό και η περίσσεια ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική, η οποία γίνεται αντιληπτή ως αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Η πιθανότητα να αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια σθένους αρκετή ενέργεια από το περιβάλλον ώστε να διεγερθούν και να υπερπηδήσουν το ενεργειακό διάκενο, εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία του σώματος και έχει τιμή ανάλογη προς το μέγεθος $\exp(-E_g/2kT)$ όπου k είναι η σταθερά Boltzmann.



Σχήμα 2.4. Ενεργειακό διάκενο διαφόρων ημιαγωγών σε θερμοκρασία $T=300K$.

Η απορρόφηση ενός κατάλληλου φωτονίου όμως δεν είναι πάντα η μοναδική προϋπόθεση για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους. Το ενεργειακό διάκενο μπορεί να είναι άμεσο ή έμμεσο. Σε υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο, φωτόνια με ενέργεια E μεγαλύτερη του E_g επαρκούν για τη δημιουργία ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και οπών. Σε υλικό με έμμεσο διάκενο, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές έχουν διαφορετική ορμή που σημαίνει ότι για την πραγματοποίηση της διέγερσης απαιτείται και η συμμετοχή ενός επιπλέον “σωματιδίου” ώστε να διατηρηθεί η ορμή του

συστήματος. Το σωματίδιο αυτό ονομάζεται φωνόνιο και είναι το ενεργειακό κβάντο της θερμικής ταλάντωσης του κρυσταλλικού πλέγματος του ημιαγωγού. Συνεπώς, η απαίτηση της συμμετοχής τριών σωματιδίων, καθιστά την πιθανότητα διέγερσης πολύ μικρότερη από την πιθανότητα διέγερσης σε υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο.



Σχήμα 2.5. a) Υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο b) Υλικό με έμμεσο ενεργειακό διάκενο.

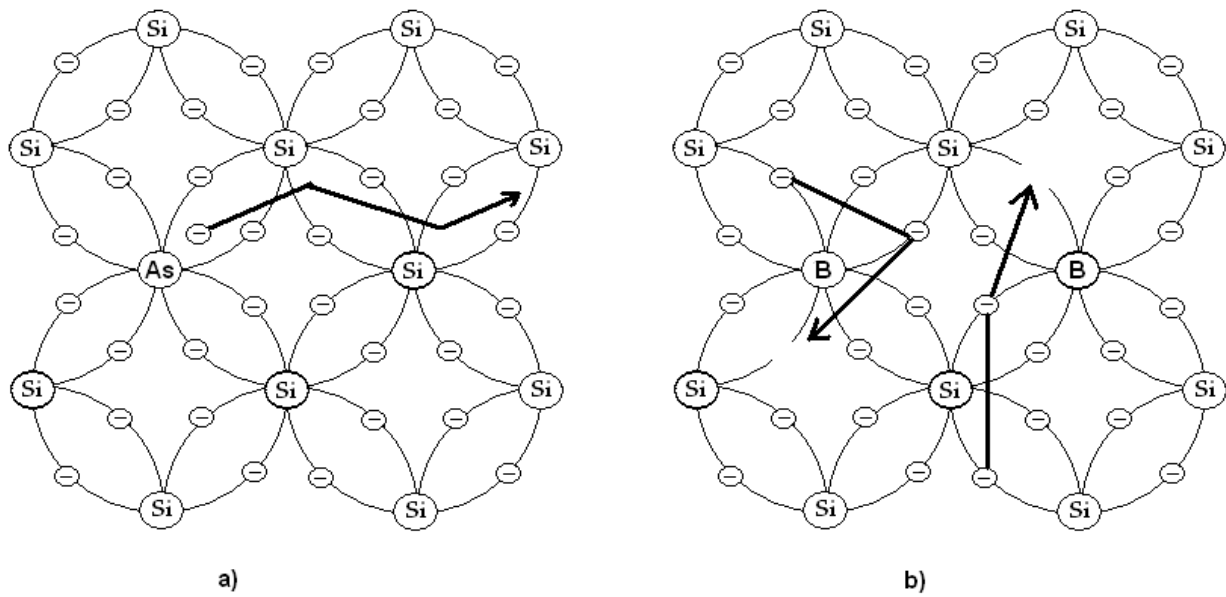
Υλικά με έμμεσο ενεργειακό διάκενο, παρά τη δυσκολία στην δημιουργία φορέων, ευνοούν και την καθυστέρηση της επανασύνδεσής τους, δηλαδή την επιστροφή ενός ηλεκτρονίου αγωγιμότητας στο πλέγμα, καλύπτοντας μία κενή θέση και εκλύοντας ενέργεια ίση περίπου με την τιμή του ενεργειακού διακενου.

2.1.2. Ημιαγωγοί προσμίξεων

Αν ένας τετρασθενής ημιαγωγός, όπως το πυρίτιο, βρίσκεται σε κατάσταση τήγματος και στο τήγμα γίνει πρόσμιξη μιας μικρής ποσότητας ενός πεντασθενούς στοιχείου, όπως το αρσενικό (As) που ο όγκος των ατόμων του δεν διαφέρει από αυτόν των ατόμων Si, τότε με την ψύξη και στερεοποίηση του σώματος, σχηματίζεται στερεό διάλυμα όπου τα άτομα As έχουν ενσωματωθεί στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου. Τα άτομα αυτά των 5 ηλεκτρονίων σθένους, δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά άτομα Si, και κάθε άτομο θα έχει περίσσεια ενός ηλεκτρονίου, το οποίο θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του αρσενικού. Με ενέργεια λιγότερη από την E_g του πυριτίου, τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να αποσπαστούν από το πλέγμα και να συνεισφέρουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται από τους δεσμούς του πυριτίου, μετατρέποντας τα άτομα του αρσενικού σε θετικά φορτισμένα ιόντα. Άρα το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν δότης ηλεκτρονίων και ταυτόχρονα μετατρέπεται σε θετικό ιόν.

Αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται με την πρόσμιξη ενός τρισθενούς στοιχείου, όπως το βόριο (B) όπου υπάρχει πλέον περίσσεια οπών. Με την απορρόφηση λίγης ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να μετακινηθεί προς την κενή θέση αφήνοντας στην προηγούμενη θέση του μία οπή. Έτσι το τρισθενές άτομο μετατρέπεται σε αρνητικά φορτισμένο ιόν και ταυτόχρονα λειτουργεί σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων.

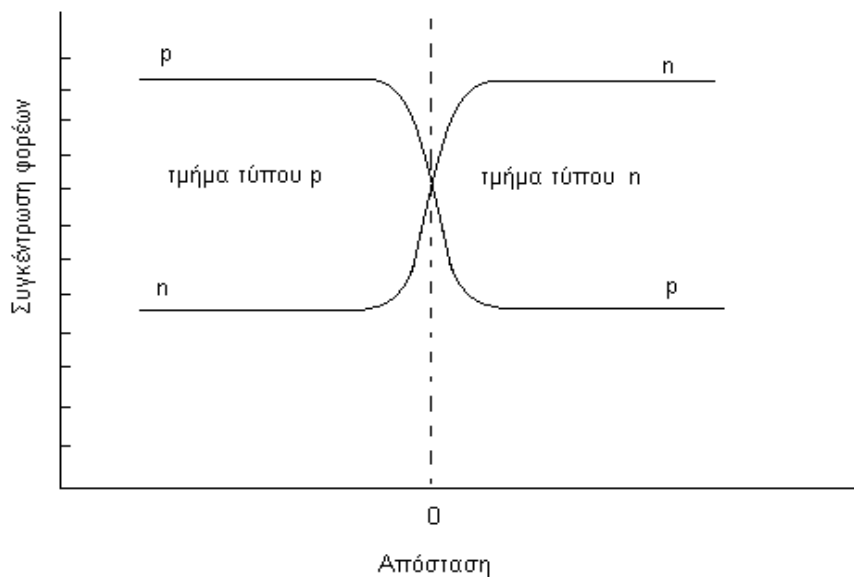
Επειδή η συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος επαρκεί για να αποκτήσουν οι προσμίξεις την απαραίτητη ενέργεια για να διεγερθούν, θεωρείται πρακτικά ότι σε έναν νοθευμένο ημιαγωγό όλοι οι δότες έχουν μετατραπεί σε θετικά ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια και ότι όλοι οι αποδέκτες σε αρνητικά ιόντα και οπές.



Σχήμα 2.6.Κρυσταλλικό πλέγμα νοθευμένων ημιαγωγών με α)πεντασθενές As και β)με τρισθενές B.

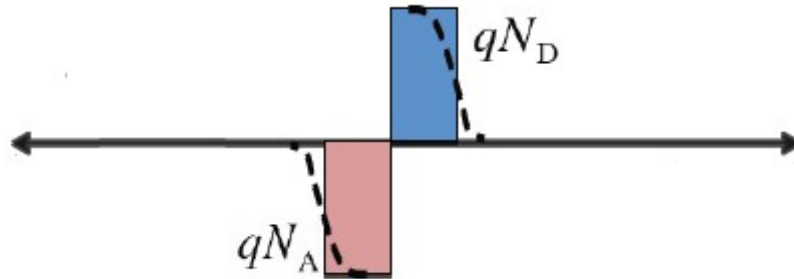
2.1.3. Δίοδος p-n

Μία ένωση p-n σχηματίζεται όταν έρθουν σε επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p, δηλαδή ενός νοθευμένου ημιαγωγού με δότες, και ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n, δηλαδή ενός νοθευμένου ημιαγωγού με αποδέκτες. Σε αυτή την ένωση, ένα μέρος από του φορείς πλειονότητας του τύπου p τμήματος (οπές) διαχέεται προς το τύπου n τμήμα όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως φορείς πλειονότητας του τύπου n τμήματος (ελεύθερα ηλεκτρόνια) διαχέονται προς το τμήμα p. Η ανάμιξη των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στην περιοχή κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο τμημάτων, ανατρέπουν την κατάσταση ισορροπίας η οποία αποκαθίσταται με τις επανασυνδέσεις των φορέων.



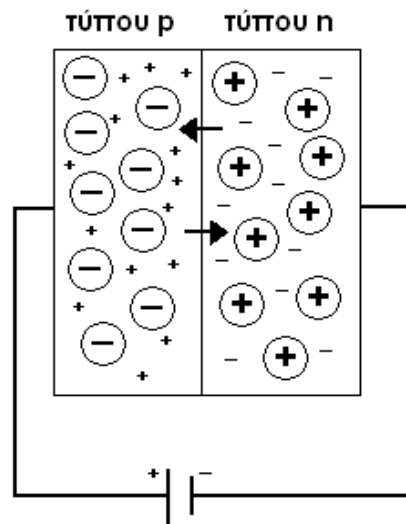
Σχήμα 2.7.Συγκεντρώσεις των φορέων και διάχυση.

Στην ζώνη εξάντλησης, δηλαδή στην περιοχή κοντά στην επαφή των δύο τμημάτων, τα θετικά ιόντα του τμήματος n και τα αρνητικά ιόντα του τμήματος p, παραμένουν αμετάβλητα στο πλέγμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική του ουδετερότητα και το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης.



Σχήμα 2.8. Φορτίο στη ζώνη εξάντλησης. Χρωματισμένη είναι η θεωρητική πυκνότητα του φορτίου και με διακεκομμένη γραμμή η πραγματική.

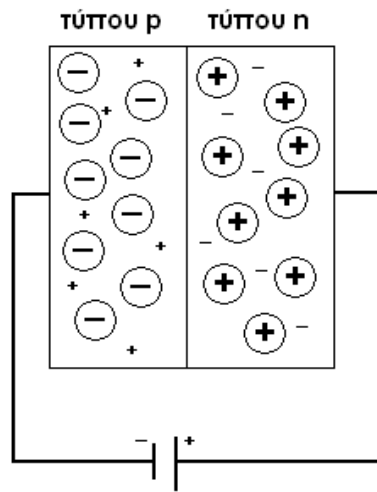
Αν επιβληθεί ορθή πόλωση σε μία διόδο p-n (διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της) δηλαδή ο αρνητικός πόλος της πηγής να συνδεθεί στο τμήμα n της διόδου και ο θετικός με το τμήμα p, τότε τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής διαμέσου του τμήματος p. Το πλάτος της ζώνης εξάντλησης μειώνεται και οι φορείς διασχίζουν εύκολα την επαφή.



Σχήμα 2.9. Ορθή πόλωση διόδου p-n.

Στην ανάστροφη πόλωση, όπου συνδέεται ο αρνητικός πόλος της πηγής με το τμήμα p της διόδου και ο θετικός πόλος με το τμήμα n, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, ενώ τα ηλεκτρόνια του τμήματος n απομακρύνονται προς

τον θετικό πόλο της πηγής. Έτσι οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή.



Σχήμα 2.10. Ανάστροφη πόλωση διόδου p-n.

Για αρνητικές τιμές της επιβαλλόμενης τάσης, σε ανάστροφη πόλωση δηλαδή, η ένταση του ρεύματος σταθεροποιείται σε μία τιμή I_0 , το ανάστροφο ρεύμα κόρου, ενώ για θετικές τιμές της τάσης, άρα ορθή πόλωση, η ένταση του ρεύματος αυξάνεται εκθετικά. Το ρεύμα σε μία δίοδο p-n στην οποία επιβάλλεται μια τάση V δίνεται από τη σχέση

$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot V}{\gamma \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]$$

όπου e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

k η σταθερά του Boltzmann

T η απόλυτη θερμοκρασία

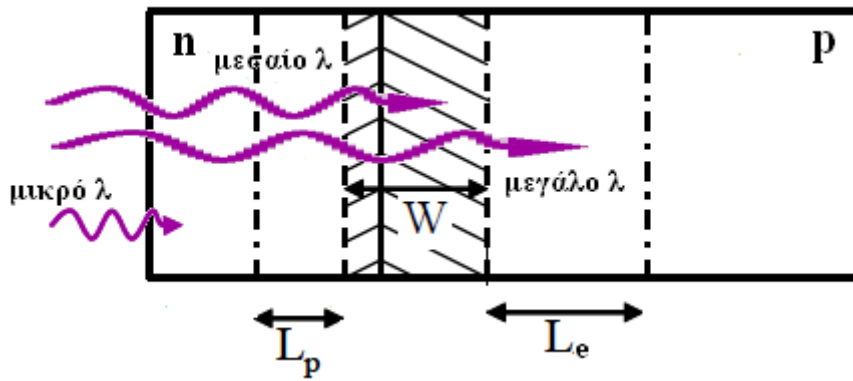
γ συντελεστής που χαρακτηρίζει τη δίοδο και $1 < \gamma < 2$

Σχέση 2.1.

2.2. Ο τρόπος λειτουργίας

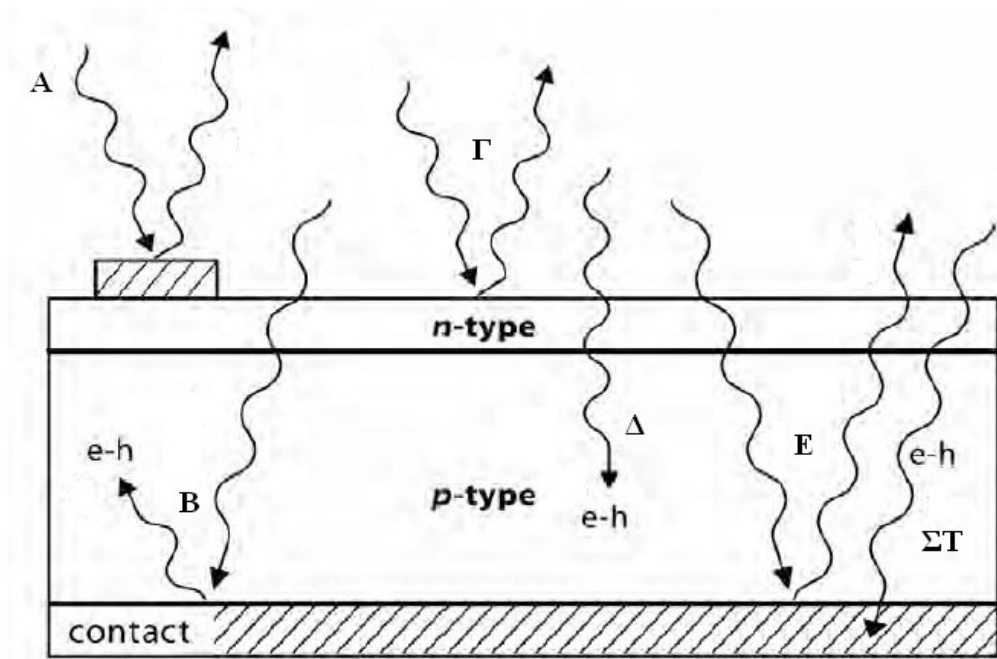
Το φωτοβολταϊκό στοιχείο βασίζεται σε μία δίοδο p-n με πολύ λεπτή και έντονα νοθευμένη περιοχή επιφάνειας. Η επιφάνεια ακτινοβολίας μπορεί να είναι η περιοχή p ή η περιοχή n. Στα στοιχεία πυριτίου, η επιφάνεια ακτινοβολίας είναι η περιοχή n. Όταν το στοιχείο φωτίζεται, τότε τα φωτόνια που έχουν ενέργεια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

και επιπλέον οπές στην p περιοχή.



Σχήμα 2.11. Απορρόφηση φωτονίων στο φ/β στοιχείο.

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



Σχήμα 2.12. Ανάκλαση και απορρόφηση ακτινοβολίας. A, E: Ανάκλαση στους μεταλλικούς ακροδέκτες. B: Ανάκλαση στον μεταλλικό ακροδέκτη και μετέπειτα απορρόφηση της ακτινοβολίας. Γ: Ανάκλαση στην επιφάνεια τύπου n. Δ: Απευθείας απορρόφηση της ακτινοβολίας. ΣΤ: Απορρόφηση ακτινοβολίας στον ακροδέκτη.

Ακολουθώς, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος των φωτονίων που έχουν ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο. Για αυτά τα φωτόνια, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διάφανο σώμα. Τα φωτόνια που έχουν ενέργεια $h\nu$ ίση ή μεγαλύτερη από το E_g , απορροφούνται και δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με ενέργεια $h\nu$. Επειδή τα διεγερμένα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε θερμική ισορροπία στην ζώνη αγωγιμότητας μόνο όταν έχουν ενέργεια περίπου ίση με το E_g , το υπόλοιπο της ενέργειας που απορρόφησαν, $h\nu - E_g$ πρέπει να χαθεί. Αυτή η ποσότητα ενέργειας μεταφέρεται στις πλεγματικές ταλαντώσεις υπό μορφή

θερμότητας καθώς τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται από τα ταλαντούμενα άτομα.

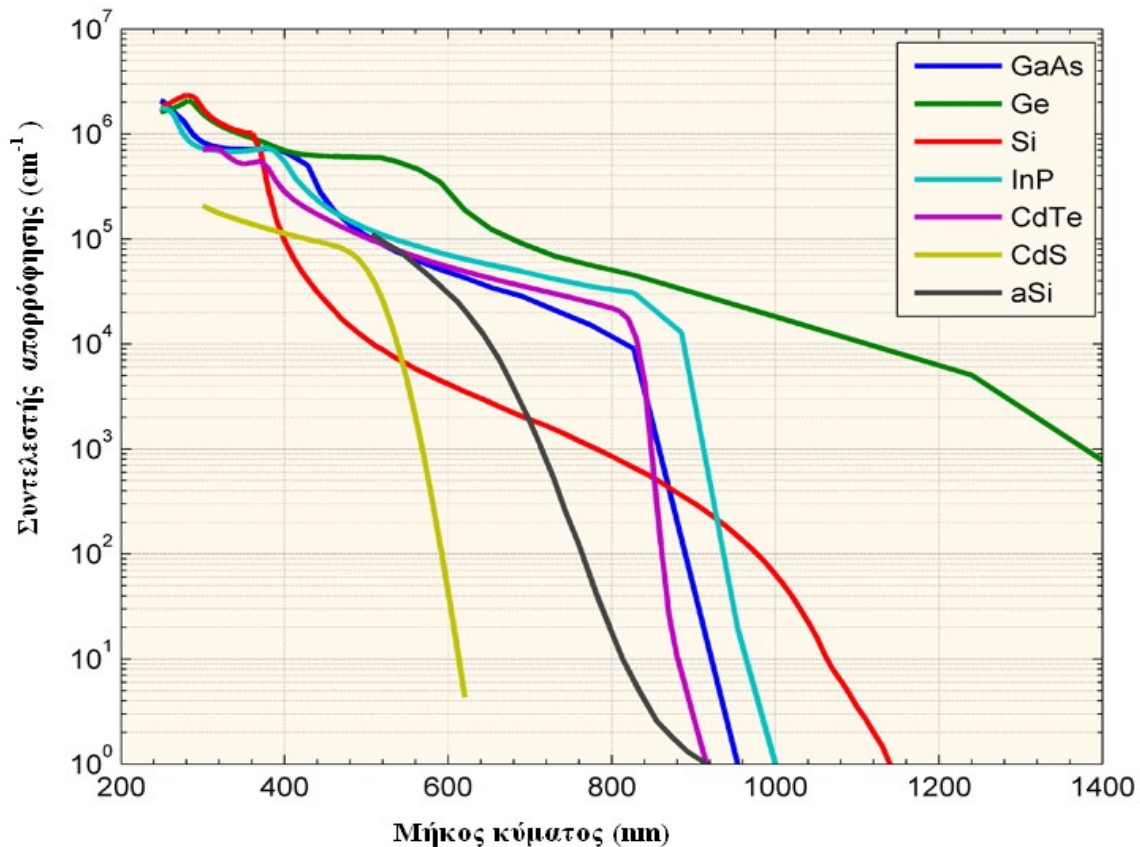
Τα φωτόνια με κατάλληλη ενέργεια για να διεγείρουν τον ημιαγωγό, απορροφούνται πολύ πιο εύκολα κοντά στην επιφάνεια που ακτινοβολείται και λιγότερο εύκολα στο βάθος του υλικού. Η ροή των φωτονίων Φ εντός του ημιαγωγού δίνεται από τη σχέση

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x)$$

Φ_0 η αρχική τιμή της ροής στην επιφάνεια
 x η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία εντός του ημιαγωγού
 α ο συντελεστής απορρόφησης

Σχέση 2.2.

Ο συντελεστής απορρόφησης (μετράται σε m^{-1}) εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων άρα από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.13. Ο συντελεστής απορρόφησης συναρτῆσει του μήκους κύματος για τους κυριότερους ημιαγωγούς των ϕ/β διατάξεων.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, ο συντελεστής απορρόφησης μηδενίζεται για εκείνα τα μήκη κύματος που δηλώνουν μικρότερη ενέργεια από αυτή του ενεργειακού διακένου του υλικού. Αντίθετα, παίρνει μεγάλες τιμές προς την πλευρά των μικρών μηκών κύματος, άρα η απορρόφηση των αντίστοιχων φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια.

Τα ZHO (ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών) λόγω της φωτοδιέγερσης που δημιουργούνται από φωτόνια

μεγάλου μήκους κύματος, απορροφώνται στην p περιοχή και διαχέονται στην περιοχή αυτή αφού δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Αν ο χρόνος επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων είναι τ_e τότε το ηλεκτρόνιο διαχέεται σε μία μέση απόσταση

$$L_e = \sqrt{D_e \cdot \tau_e}$$

όπου D_e είναι ο συντελεστής διάχυσης στην p περιοχή. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε απόσταση L_e από την περιοχή εξάντλησης μπορούν εύκολα να διαχυθούν μέχρι εκεί. Από την περιοχή αυτή και μετά ολισθαίνουν λόγω του πεδίου E_0 και μεταβαίνουν στην n-περιοχή. Έτσι μόνο τα φωτοδημιουργούμενα ΖΗΟ που βρίσκονται σε απόσταση μήκους διάχυσης L_e των φορέων μειονότητας από τη ζώνη εξάντλησης συνεισφέρουν στο φ/β φαινόμενο. Μόλις ένα ηλεκτρόνιο διαχυθεί μέχρι την ζώνη απογύμνωσης, σαρώνεται προς την n-περιοχή από το πεδίο E_0 , δίνοντας έτσι εκεί ένα επιπλέον αρνητικό φορτίο. Οι οπές που παραμένουν στην p-περιοχή δημιουργούν ένα συνολικό θετικό φορτίο στην περιοχή. Τα ΖΗΟ που δημιουργούνται σε απόσταση από την ζώνη εξάντλησης μεγαλύτερη του μήκους διάχυσης L_e , χάνονται λόγω επανασύνδεσης. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι το μήκος της διάχυσης L_e , είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο. Οι ίδιες αρχές ισχύουν και για τα ΖΗΟ που δημιουργούνται στην n-περιοχή, λόγω της απορρόφησης φωτονίων μικρού μήκους κύματος. Οι οπές που δημιουργούνται εντός απόστασης μικρότερου του μήκους διάχυσης L_h , μπορούν να φτάσουν μέχρι τη ζώνη εξάντλησης όπου και σαρώνονται στην p-περιοχή. Επομένως, η φωτοδιέγερση των ΖΗΟ που συνεισφέρει στο φ/β φαινόμενο λαμβάνει χώρα στην περιοχή μήκους $L_h + W + L_e$. Αν οι ακροδέκτες της διάταξης είναι βραχυκυκλωμένοι, τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια της n-περιοχής μπορούν να ρεύσουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και να εξουδετερώσουν τις οπές στην p-περιοχή. Το ρεύμα που οφείλεται στη ροή των φωτοδιεγερμένων φορέων, ονομάζεται φωτόρευμα I_{ph} . Το φωτόρευμα εξαρτάται από παράγοντες όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης, το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κ.α.

2.3. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Σε ένα ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο ακτινοβολείται, το ρεύμα βραχυκύκλωσης ισούται με το φωτόρευμα I_{ph} που παράγεται. Αν όμως συνδεθεί μία αντίσταση R στο κύκλωμα, τότε το φωτόρευμα θα προκαλεί τη δημιουργία μίας τάσης V στο στοιχείο. Η τάση αυτή μειώνει το εσωτερικό δυναμικό της ένωσης p-n και προκαλεί την έγχυση φορέων μειονότητας και τη διάχυσή τους, ακριβώς όπως θα συνέβαινε σε μία κανονική διόδο. Επομένως, εκτός από το I_{ph} θα υπάρχει στο κύκλωμα και το ορθό ρεύμα της διόδου I_d το οποίο οφείλεται στην τάση που αναπτύσσεται στην R . Αφού το I_d οφείλεται στην κανονική λειτουργία της διόδου p-n θα δίνεται από τη σχέση

$$I_d = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right]$$

όπου e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο
 k η σταθερά του Boltzmann
 T η απόλυτη θερμοκρασία

Σχέση 2.3.

Υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, το συνολικό ρεύμα είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι το φωτόρευμα προκαλεί τη δημιουργία τέτοιας τάσης V_{oc} ώστε να προκαλέσει ρεύμα στη διόδο $I_d = I_{ph}$. Επομένως το συνολικό ρεύμα που διαρρέει το φ/β στοιχείο είναι

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right]$$

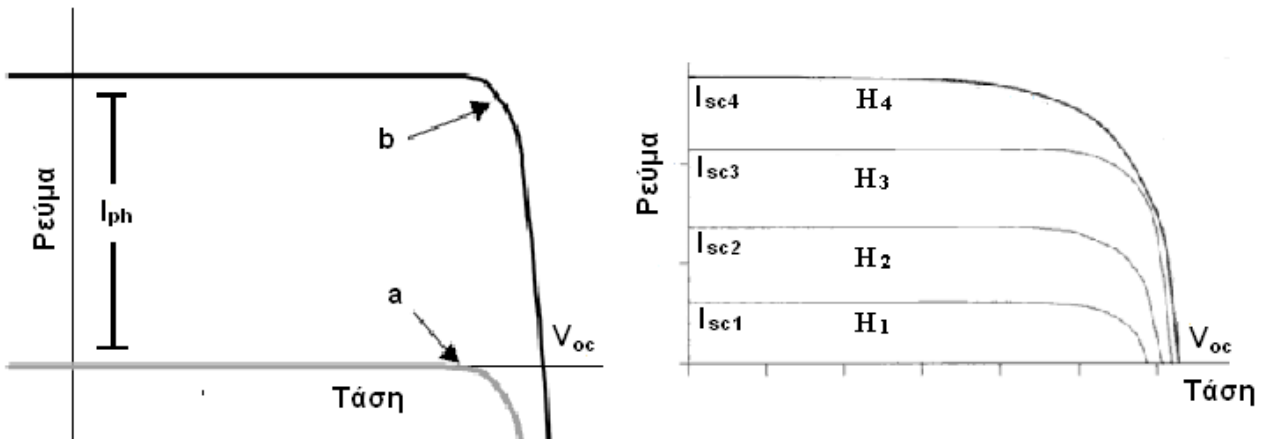
Σχέση 2.4.

Χρησιμοποιώντας την ισότητα των δύο ρευμάτων στην κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, προκύπτει η τάση ανοιχτοκύκλωσης του στοιχείου

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right)$$

Σχέση 2.5.

Στην αντίθετη περίπτωση, όταν βραχυκυκλωθούν οι δύο όψεις του στοιχείου προκύπτει το ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc} = I_{ph}$. Στο σκοτάδι είναι προφανές ότι δεν υπάρχει I_{ph} , συνεπώς το ρεύμα της διάταξης προκύπτει μόνο από το ρεύμα της διόδου.



Σχήμα 2.14. Χαρακτηριστική I-V ενός φ/β στοιχείου στο σκοτάδι (a) και όταν ακτινοβολείται (b). Δίπλα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική I-V για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας όπου $H_1 < H_2 < H_3 < H_4$.

Κάθε σημείο της χαρακτηριστικής I-V του στοιχείου, αντιστοιχεί και σε μία τιμή του φορτίου. Η ηλεκτρική ισχύς που παρέχει ένα φ/β στοιχείο δίνεται από τη σχέση

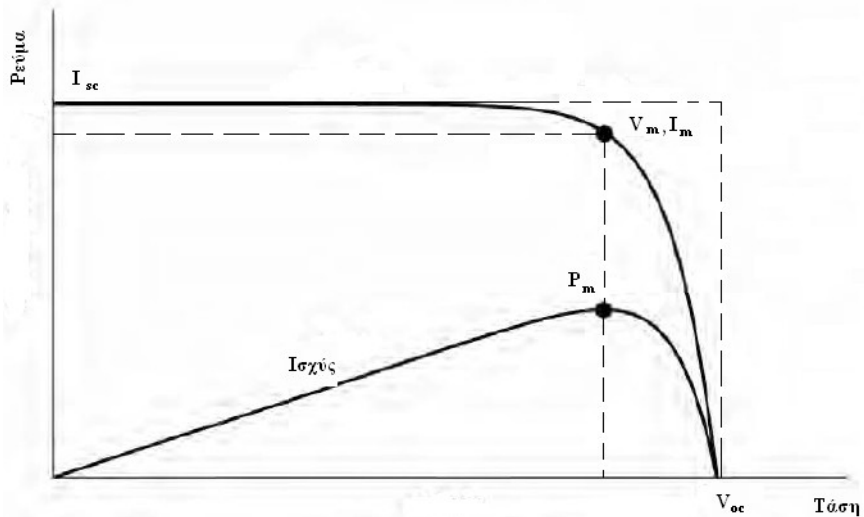
$$P = V \cdot I$$

Σχέση 2.6.

και μεγιστοποιείται για τις τιμές V_m και I_m του στοιχείου. Για αυτές τις τιμές προκύπτει η βέλτιστη τιμή της αντίστασης που τροφοδοτεί το στοιχείο

$$R_L = \frac{V_m}{I_m}$$

Σχέση 2.7.



Σχήμα 2.15. Χαρακτηριστική I-V, P-V και τα μεγέθη μέγιστης ισχύος φ/β στοιχείου.

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

$$n = \frac{P_m}{P_s} = \frac{V_m \cdot I_m}{H \cdot A}$$

H η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

A το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας που ακτινοβολείται

Σχέση 2.8.

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

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Σχέση 2.9.

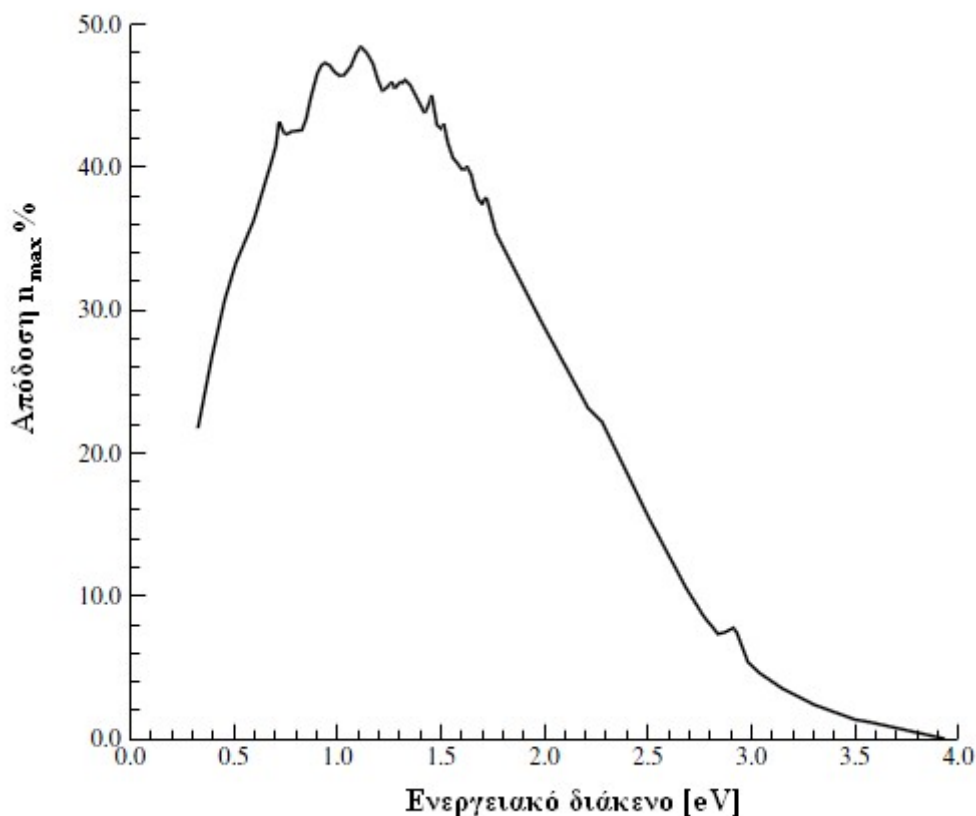
Σχηματικά, στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V ο παράγοντας πλήρωσης προκύπτει ως ο λόγος του εμβαδού που ορίζεται από τις τιμές τάσης και ρεύματος για τις οποίες μεγιστοποιείται η ισχύς προς το εμβαδόν που ορίζεται από την τάση ανοιχτοκύκλωσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

2.4. Η απόδοση

Στόχος στην παραγωγή των φ/β στοιχείων είναι η μεγιστοποίηση του συντελεστή απόδοσης και του παράγοντα πλήρωσης. Πολλοί παράγοντες συμβάλλουν στον καθορισμό τους.

2.4.1. Το ενεργειακό διάκενο

Κύριος παράγοντας για την απόδοση ενός φ/β στοιχείου είναι η απορρόφηση των φωτονίων και το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Εάν το E_g είναι 0eV τότε όλα τα προσπίπτοντα φωτόνια μπορούν να απορροφηθούν και να παραχθεί το φωτόρευμα. Η τάση όμως θα μηδενίζεται. Μεγαλύτερες τιμές του E_g έχουν σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση μόνο ορισμένων φωτονίων, άρα μείωση του παραγόμενου φωτορεύματος, ενώ παράλληλα η τάση του στοιχείου θα αυξάνεται. Ανάμεσα στα όρια αυτά ($n=0$ για $E_g=0$ και $n=0$ για $E_g=\infty$) πρέπει να υπάρχει μία σχέση μέγιστης απόδοσης-βέλτιστου ενεργειακού διακένου.

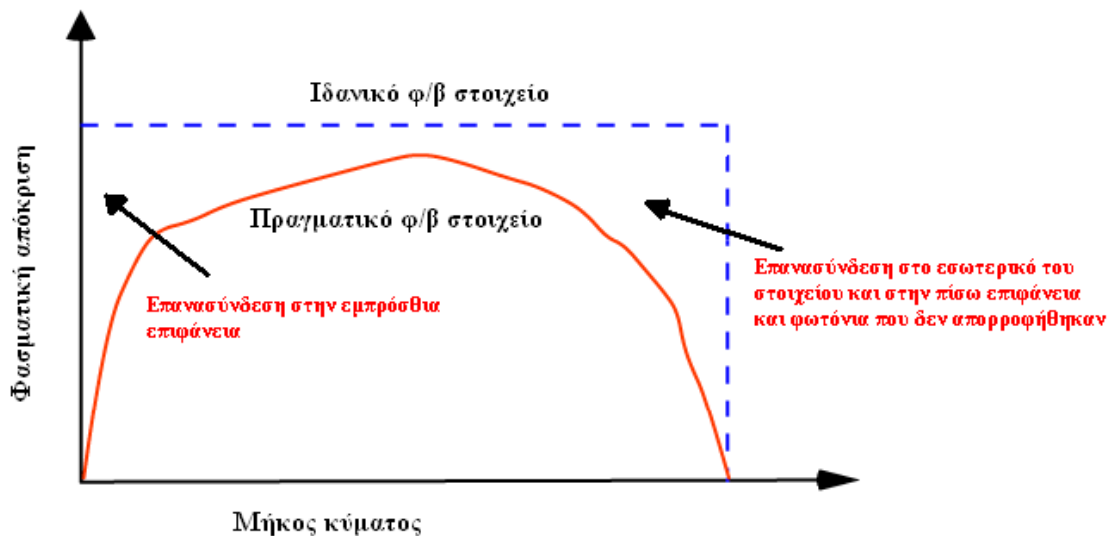


Σχήμα 2.16. Ενεργειακό διάκενο σε σχέση με την μέγιστη θεωρητική απόδοση σε συνθήκες ακτινοβολίας AM1.5.

Πέρα από τις θεωρητικές υποθέσεις για την εξαγωγή του παραπάνω διαγράμματος, σε στοιχεία πυριτίου με μη συγκεντρωμένη ακτινοβολία η μέγιστη απόδοση περιορίζεται στο 30%. Οι ιδανικότερες τιμές για το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, βρίσκονται στο διάστημα 1.0-1.6eV.

2.4.2. Η επανασύνδεση των φορέων

Η επανασύνδεση των διεγερμένων φορέων οδηγεί σε μειωμένο φωτόρευμα. Η επανασύνδεση μπορεί να συμβεί στην επιφάνεια του ημιαγωγού, εντός του όγκου του και στις μεταλλικές επαφές. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα μεγάλα μήκη διάχυσης L_h , L_e συντελούν στην αυξημένη συλλογή των φορέων και σε μειωμένη επανασύνδεση. Επιπλέον, η επανασύνδεση συμβαίνει συχνότερα κοντά στις μεταλλικές επαφές και στην επιφάνεια από ότι εντός του όγκου του ημιαγωγού και για αυτό οι περιοχές αυτές νοθεύονται πιο πολύ σε σχέση με το υπόλοιπο υλικό. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από την παρακάτω απεικόνιση της φασματικής απόκρισης (το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του στοιχείου σε σχέση με τη φωτονική ροή Φ δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου) ενός ιδανικού και ενός πραγματικού φ/β στοιχείου.



Σχήμα 2.17. Φασματική απόκριση και απεικόνιση απωλειών.

2.4.3. Η θερμοκρασία

Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός φ/β στοιχείου καθορίζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντός του, από την ένταση της ακτινοβολίας που το διεγείρει και από άλλες παράμετρους όπως η ένταση του ανέμου.

Το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας σύμφωνα με τη σχέση

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{a \cdot T^2}{T + b}$$

Σχέση 2.10.

όπου a , b είναι εμπειρικοί συντελεστές που εξαρτώνται από το υλικό. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, αυξάνονται και οι φορείς στον ημιαγωγό, συνεπώς αυξάνεται η επανασύνδεση άρα μειώνεται η απόδοση.

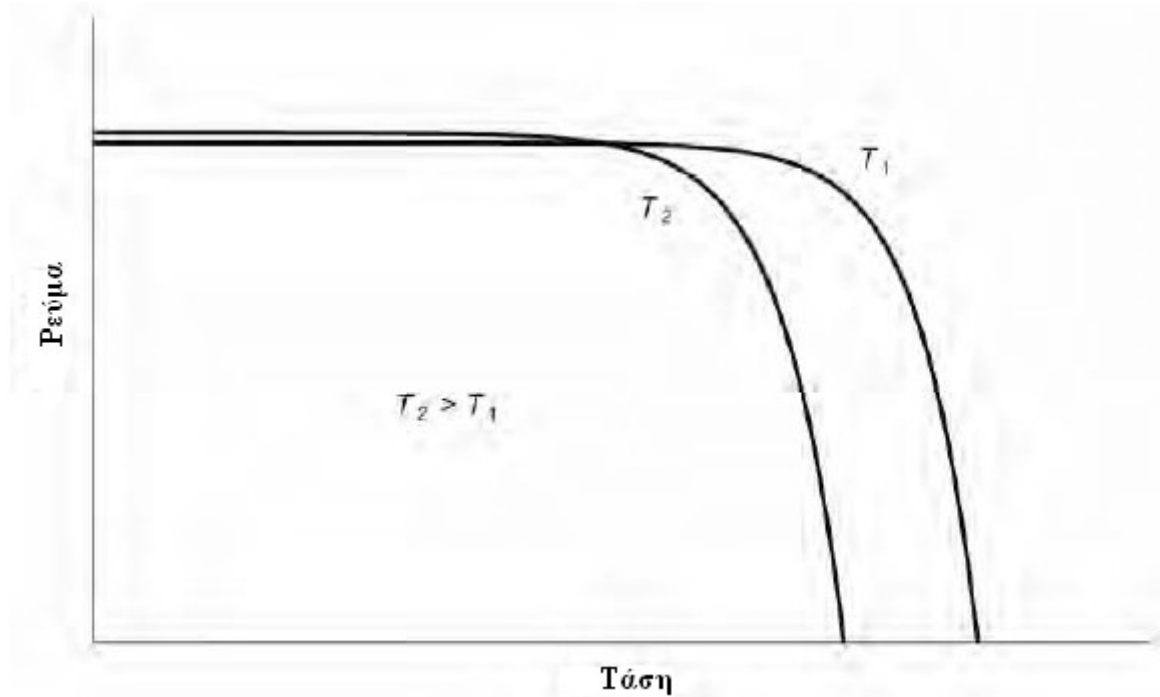
Στο πυρίτιο, για το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η άνοδος της θερμοκρασίας επιφέρει μια πολύ μικρή αύξηση:

$$\frac{1}{I_{sc}} \cdot \frac{dI_{sc}}{dT} \approx +0.0006 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Αντιθέτως, η τάση ανοιχτοκύκλωσης μειώνεται με γρηγορότερους ρυθμούς :

$$\frac{1}{V_{oc}} \cdot \frac{dV_{oc}}{dT} \approx -0.003 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Το αποτέλεσμα στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φ/β στοιχείου, αυξημένης θερμοκρασίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.18. Χαρακτηριστική I-V του ίδιου φ/β στοιχείου σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες.

2.4.4. Ανάκλαση

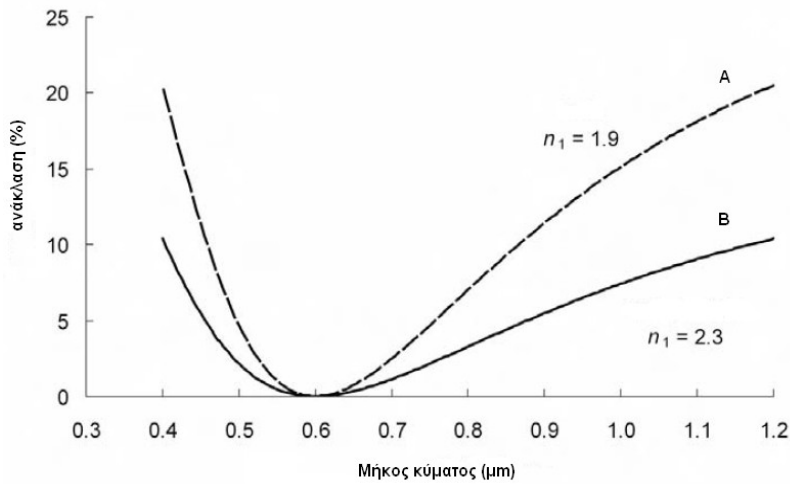
Οι οπτικές απώλειες μπορούν να είναι εξίσου σημαντικές με τις απώλειες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η ανάκλαση των προσπίπτοντων φωτονίων μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση αντιανακλαστικών επιστρώσεων στην επιφάνεια που ακτινοβολείται. Μία αντιανακλαστική επίστρωση $\lambda/4$ ενός διαφανούς υλικού, πάχους

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4 \cdot n_1}$$

σχετικού συντελεστή ανάκλασης n_1 όπου

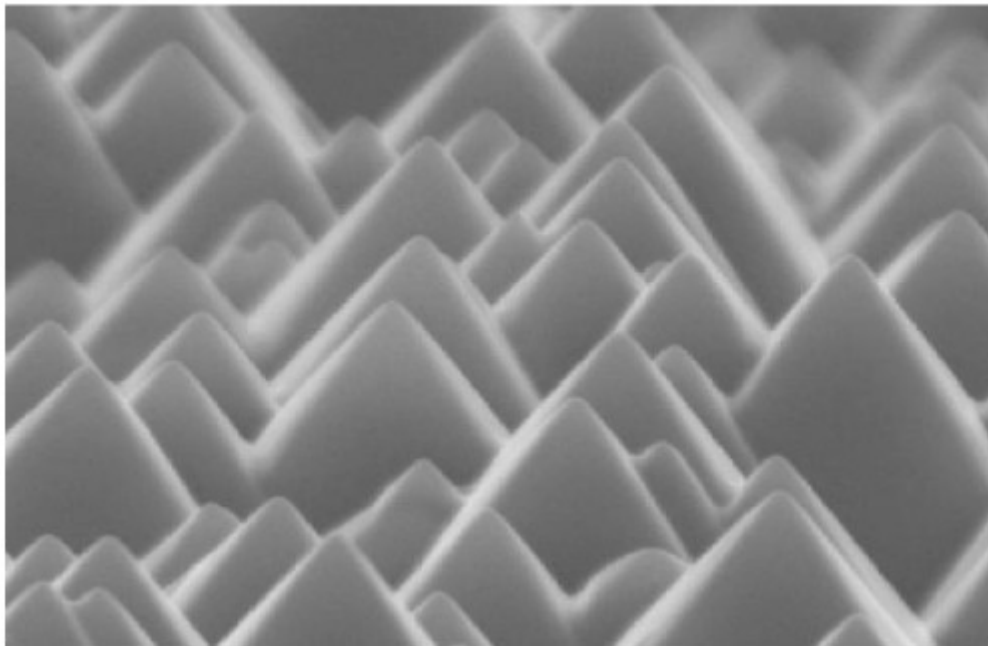
$$n_1 = \sqrt{n_0 \cdot n_2}$$

και n_0, n_2 οι συντελεστές ανάκλασης του αέρα (ή του γυαλιού) και του ημιαγωγού αντίστοιχα, μειώνει αποτελεσματικά την ανάκλαση του φ/β στοιχείου, γύρω από το μήκος κύματος λ_0



Σχήμα 2.19. Επίδραση στην ανάκλαση με χρήση αντιανακλαστικής επιφάνειας ανάμεσα στον ημιαγωγό και τον αέρα(A) , και ανάμεσα στον ημιαγωγό και το γυαλί(B).

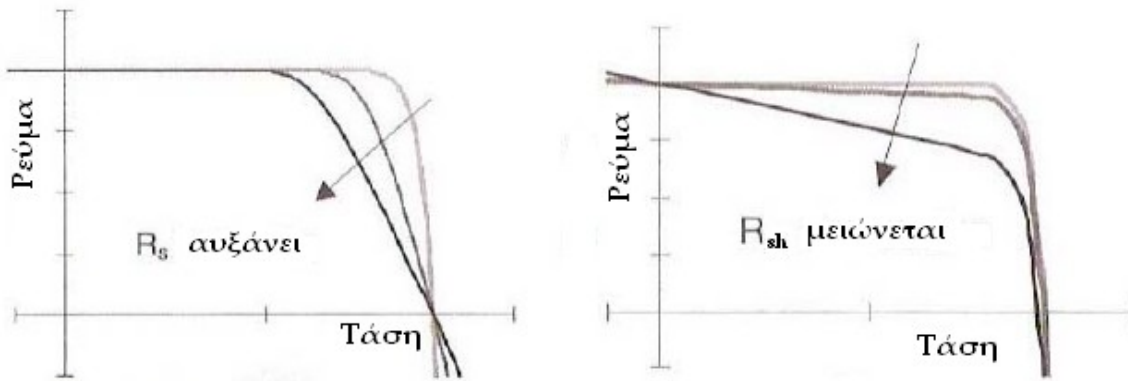
Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης της ανάκλασης συνίσταται στην μετατροπή της επιφάνειας που ακτινοβολείται καθιστώντας την πιο τραχιά. Αν η επιφάνεια αυτή, έχει δομή πολλών πυραμίδων (ή ανεστραμμένων πυραμίδων), τότε αυξάνεται η πιθανότητα τα προσπίπτοντα φωτόνια να ανακλαστούν προς το εσωτερικό του ημιαγωγού.



Σχήμα 2.20. Οι πυραμίδες στην επιφάνεια του φ/β στοιχείου για εκμετάλλευση των ανακλάσεων.

2.4.5. Παρασιτικές εσωτερικές αντιστάσεις

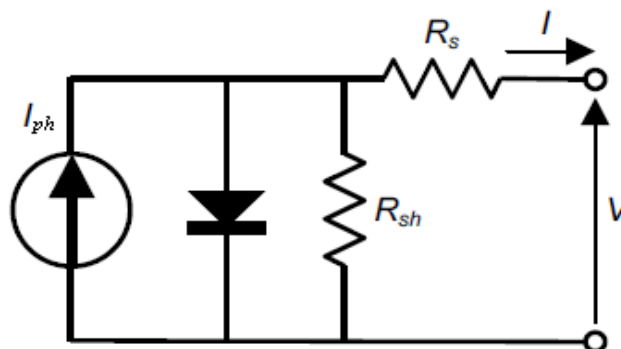
Σε πραγματικά στοιχεία εμφανίζονται παρασιτικές αντιστάσεις στο ρεύμα. Η αντίσταση σειράς R_s πηγάζει από το υλικό του ημιαγωγού, τους μεταλλικούς ακροδέκτες και τις εσωτερικές διασυνδέσεις των επιμέρους υλικών. Η παράλληλη αντίσταση R_{sh} οφείλεται στην μη ιδανικότητα της διόδου p-n και σε ανεπιθύμητες προσμίξεις. Οι συνέπειες των δύο παρασιτικών αντιστάσεων στην χαρακτηριστική I-V παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 2.21. Επίδραση της αντίστασης σειράς και παραλληλίας στην χαρακτηριστική I-V.

2.5. Ηλεκτρικό ισοδύναμο

Εισάγοντας αυτές τις παραμέτρους στο ηλεκτρικό ισοδύναμο του ιδανικού φ/β στοιχείου, αυτό τροποποιείται όπως παρακάτω



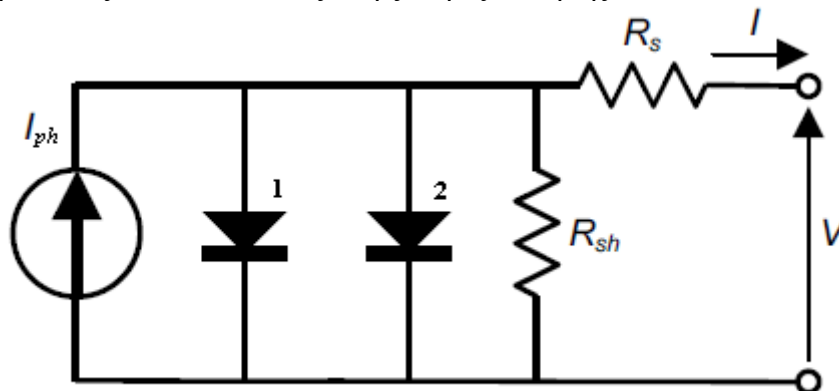
Σχήμα 2.22. Ηλεκτρικό ισοδύναμο πραγματικού φ/β στοιχείου.

Όποτε η εξίσωση του ρεύματος ενός φ/β στοιχείου γίνεται

$$I = I_L - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nkT/q}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

Σχέση 2.11.

Άλλα ηλεκτρικά μοντέλα, λαμβάνουν παραπάνω παράγοντες υπόψιν όπως η μοντελοποίηση της ένωσης p-n από δύο διόδους όπου η μία αφορά τις απενασυνδέσεις στις περιοχές n και p ενώ η δεύτερη αναπαριστά τις επενασυνδέσεις στη ζώνη εξάντλησης.



Σχήμα 2.23. Ηλεκτρικό ισοδύναμο φ/β στοιχείου με δύο διόδους.

Στο παραπάνω κύκλωμα, ο συντελεστής ποιότητας της πρώτης διόδου, που αναπαριστά την επενασύνδεση στις ουδέτερες περιοχές n και p, λαμβάνει την τιμή $n=1$ ενώ ο συντελεστής της δεύτερης διόδου γίνεται $n=2$. Έτσι η εξίσωση του ρεύματος είναι

$$I = I_L - I_{01} \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{kT/q}\right) - 1 \right) - I_{02} \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{2kT/q}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

Σχέση 2.12.

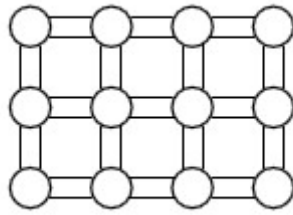
2.6. Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων

2.6.1. Κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν σαν βάση το πυρίτιο, μιας κ βρίσκεται σε αφθονία στον πλανήτη και διότι είναι ο πιο δημοφιλής ημιαγωγός ήδη από το 1950 άρα υπάρχει μεγάλο υπόβαθρο γνώσης πάνω σε αυτό το στοιχείο. Η επικρατούσα τεχνολογία σήμερα είναι αυτή του μονοκρυσταλλικού και του πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

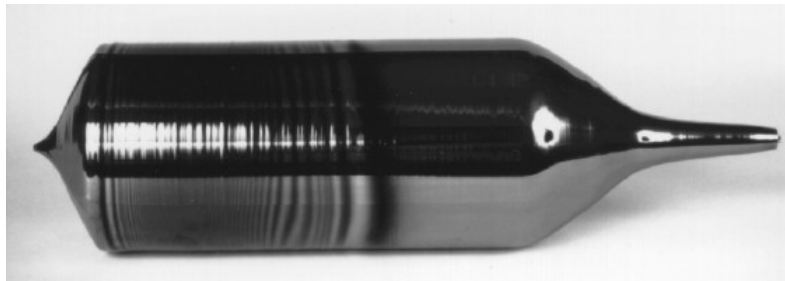
Στο μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, που παράγεται με τη μέθοδο Czochralski ή με τη μέθοδο Floating zone, τα άτομα του πυριτίου σχηματίζουν 4 χημικούς δεσμούς με τα γειτονικά άτομά τους

σχηματίζοντας μία τέλεια κρυσταλλική δομή.



Σχήμα 2.24. Δομή μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Και στις 2 μεθόδους το αρχικό απόθεμα καθαρού πυριτίου λιώνει (σ.β.1420°C) και παράγεται μία ράβδος καθαρού μονοκρυσταλλικού πυριτίου η οποία καθαρίζεται και τεμαχίζεται μηχανικά ή με χρήση laser σε μικρά δισκία διαφόρων παχών (wafer).

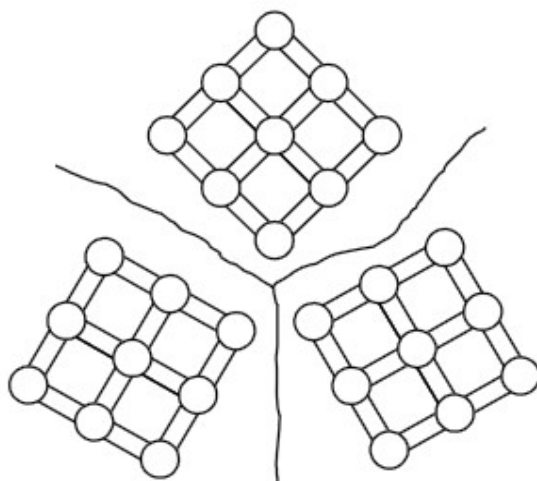


Σχήμα 2.25. Ράβδος καθαρού μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



Σχήμα 2.26. Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου.

Στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο διατηρείται η κρυσταλλική δομή, αλλά πλέον εμφανίζονται διαφορετικοί κρύσταλλοι πυριτίου. Τα σημεία στα οποία ενώνονται, οι ατέλειες δηλαδή της κατασκευής, λειτουργούν ως κέντρα επανασύνδεσης των φωτοδιεγερμένων φορέων. Η μειωμένη απόδοση εξαιτίας αυτών των ατελειών αντισταθμίζεται με το μικρότερο κόστος των πολυκρυσταλλικών φ/β στοιχείων σε σχέση με αυτό των μονοκρυσταλλικών.

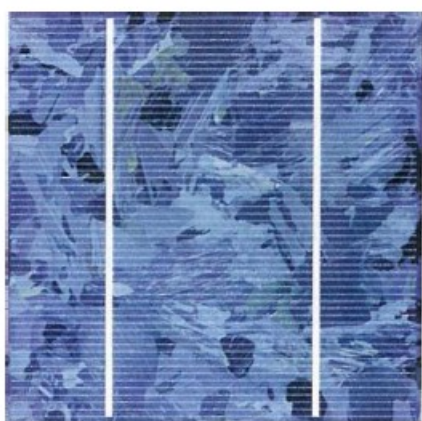


Σχήμα 2.27. Δομή πολυκρυσταλλικού πυριτίου και οι ατέλειες.

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο παράγεται με μεθόδους ανάπτυξης μπαρών πυριτίου οι οποίες τεμαχίζονται προς την κατασκευή των wafers.



Σχήμα 2.28. Μπάρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου.



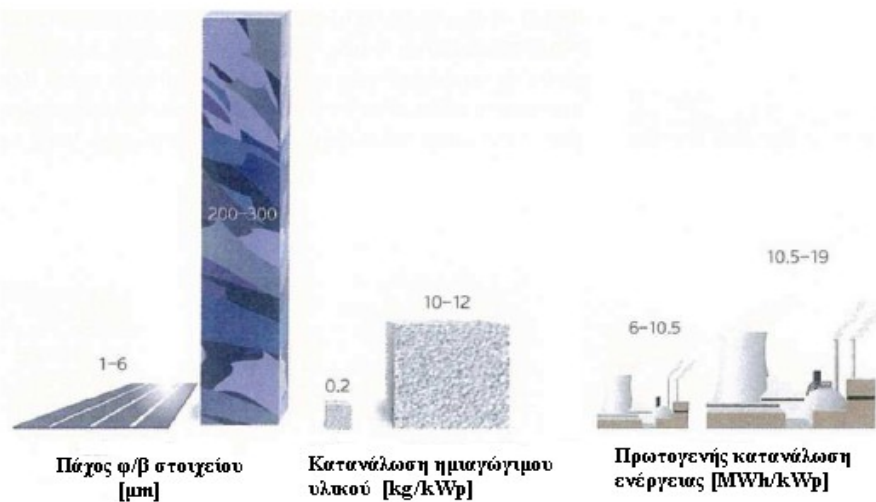
Σχήμα 2.29. Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου.

Εκτός από το πυρίτιο, έχουν χρησιμοποιηθεί και ενώσεις στοιχείων της 13ης και 15ης ομάδας του περιοδικού πίνακα όπως το GaAs το οποίο έχει άμεσο ενεργειακό διάκενο 1.42eV καθιστώντας το ιδανικό για φωτοβολταϊκές εφαρμογές από επιστημονική άποψη και μόνο, καθότι η σπανιότητα του Γάλλιου άρα και το κόστος του, είναι απαγορευτική για βιομηχανική χρήση. Λόγω της αντοχής του

σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, το αρσενικούχο γάλλιο ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές.

2.6.2. Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων

Στις τεχνολογίες λεπτών υμενίων (thin film) η επεξεργασία του υλικού γίνεται με μεθόδους που δεν απαιτούν την ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών άρα με μειωμένο κόστος. Το ημιαγωγικό υλικό τοποθετείται πάνω σε ένα φτηνό υπόστρωμα, όπως γυαλί, πλαστικό ή μέταλλο, με λεπτές στρώσεις (thin film) με μεθόδους όπως η εναπόθεση ατμών. Έτσι δαπανάται πολύ λιγότερο υλικό μειώνοντας περαιτέρω το κόστος παραγωγής. Μερικά από τα ημιαγωγικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την τεχνολογία είναι το άμορφο πυρίτιο (a:Si), ο δισεληνοϊνδούχος χαλκός (CIS), το τελουριούχο κάδμιο (CdTe) που χαρακτηρίζονται από πολύ καλή απορρόφηση του φωτός.



Σχήμα 2.30. Σύγκριση κρυσταλλικού φ/β στοιχείου (δεξιά) με στοιχείο thin film (αριστερά).

Τα φ/β στοιχεία thin film δεν έχουν περιορισμούς όσον αφορά την μορφή τους όπως συμβαίνει με τα κρυσταλλικά στοιχεία. Θεωρητικά, το υπόστρωμα μπορεί να πάρει οποιαδήποτε μορφή προτού εναποτεθεί πάνω του το ημιαγωγικό υλικό. Όμως επειδή η διασύνδεση των φ/β στοιχείων thin film γίνεται εσωτερικά (με μονολιθογραφία κατά το στάδιο της επίστρωσης του υλικού) και όχι με εξωτερικούς ακροδέκτες όπως με τα wafers, μόνο για πρακτικούς σκοπούς, κατασκευάζονται ορθογώνιες μορφές.

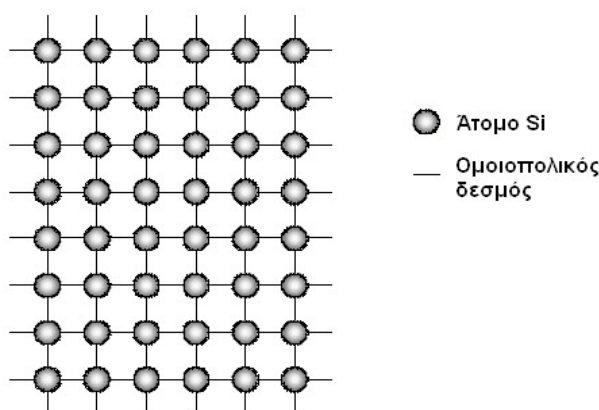
2.6.3. Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων

Στα φ/β στοιχεία, δεν μπορεί να γίνει εκμετάλλευση όλου του φάσματος της ακτινοβολίας, καθώς τα φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από αυτή του ενεργειακού διάκενου του ημιαγωγικού υλικού, τα διαπερνούν χωρίς καμία απορρόφηση. Τα φ/β στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων (multijunction/tandem cell) είναι ενώσεις όπου τα ανεκμετάλλευτα φωτόνια του πρώτου στρώματος φωτοβολταϊκού υλικού, συνεχίζουν την πορεία τους προς το δεύτερο υλικό, το οποίο έχει μικρότερο ενεργειακό διάκενο από το πρώτο, ώστε να διεγείρουν τους φορείς του. Η μέθοδος κατασκευής των thin film έχει συνδυαστεί με αυτή τη δομή, χρησιμοποιώντας άμορφο πυρίτιο, δισεληνοϊνδούχο χαλκό, αρσενικούχο γάλλιο και άλλα στοιχεία, που οδήγησαν στην παραγωγή φωτοβολταϊκών διατάξεων μέγιστης απόδοσης έως και 43.5% (Solar Junction).

Το άμορφο πυρίτιο a-Si

3.1. Η δομή του a-Si

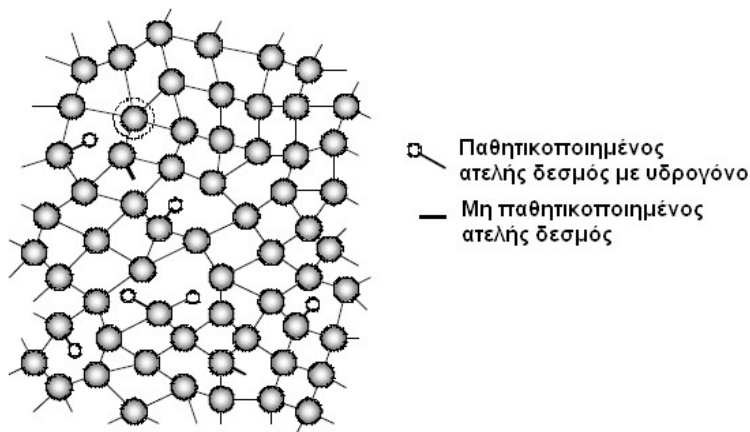
Το άμορφο πυρίτιο (a-Si) είναι μία αλλοτροπική μορφή του κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si). Οι δύο αυτές μορφές του ίδιου στοιχείου έχουν διαφορετική δομή όπως διαφέρει και το διαμάντι από τον γραφίτη για την περίπτωση του άνθρακα. Στο κρυσταλλικό πυρίτιο κάθε άτομο φτιάχνει ομοιοπολικούς δεσμούς με 4 γειτονικά του άτομα, παίρνοντας τετραεδρική κρυσταλλική δομή στο χώρο. Όλοι οι δεσμοί έχουν το ίδιο μήκος και οι γωνίες μεταξύ των δεσμών είναι ίδιες. Στο c-Si ο αριθμός συνδιάταξης όλων των ατόμων, δηλαδή το πλήθος των δεσμών που πραγματοποιούν με τα γειτονικά άτομα, είναι τέσσερα. Δεδομένου του σταθερού αριθμού συνδιάταξης των ατόμων στο πλέγμα, ένα μόνο τμήμα του κρυσταλλικού πλέγματος αρκεί για να το περιγράψει.



Σχήμα 3.1. Πλέγμα κρυσταλλικού πυριτίου.

Αυτή η αυστηρή δομή δεν ισχύει για το άμορφο πυρίτιο. Υπάρχει μεν ομοιότητα στην ατομική σύνθεση όπου τα περισσότερα άτομα πυριτίου φτιάχνουν ομοιοπολικούς δεσμούς με 4 γειτονικά άτομα αλλά αυτή η δομή δεν επεκτείνεται σε όλο τον όγκο. Οι μικρές αποκλίσεις στις γωνίες μεταξύ των δεσμών καθώς και στα μήκη τους, οδηγούν στην κατάρρευση του αυστηρού κρυσταλλικού πλέγματος. Αν οι αποκλίσεις αυτές αυξηθούν τότε δημιουργούνται αδύναμοι δεσμοί που εύκολα καταστρέφονται και προκαλούν ατέλειες στο πλέγμα. Οι ατέλειες στο κρυσταλλικό πλέγμα είναι τα άτομα που βρίσκονται εκτός θέσης, δηλαδή εκτός πλέγματος. Σε ένα συνεχές τυχαίο πλέγμα, όπως αυτό του a-Si, ένα άτομο δεν μπορεί να είναι εκτός θέσης. Η μοναδική ατέλεια που μπορεί να υπάρξει είναι η ατέλεια συνδιάταξης όπου ένα άτομο πυριτίου έχει παραπάνω ή λιγότερους δεσμούς. Στο a-Si οι ατέλειες αφορούν κατά πλειονότητα τα άτομα πυριτίου που συνδέονται μόνο με τρία γειτονικά άτομα, αφήνοντας ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο το οποίο σχηματίζει έναν μετέωρο ή αιωρούμενο δεσμό.

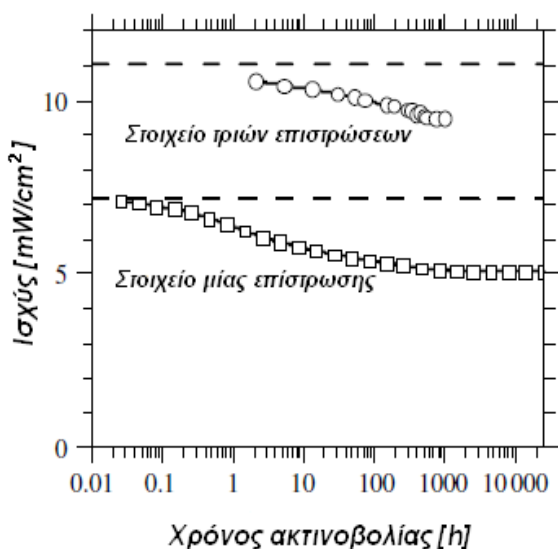
Στο καθαρό άμορφο πυρίτιο, δηλαδή όταν υπάρχουν στο πλέγμα μόνο άτομα πυριτίου, η συγκέντρωση των ατελειών (μετέωροι δεσμοί) είναι περίπου 10^{21} ανά cm^3 . Ένα υλικό με τόσο μεγάλη συγκέντρωση ατελειών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές καθώς οι ατέλειες λειτουργούν ως κέντρα επανασύνδεσης των φωτοδιεγερμένων φορέων. Σε περίπτωση όμως που το a:Si εναποτεθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να εισαχθούν στο πλέγμα άτομα υδρογόνου, αυτά καλύπτουν τις κενές θέσεις στα άτομα πυριτίου με τον ατελή δεσμό. Η παθητικοποίηση των ατελών δεσμών με υδρογόνο μειώνει τη συγκέντρωση των σφαλμάτων στο 10^{15} - 10^{16} ανά cm^3 στο a-Si:H καθιστώντας το υλικό αυτό ικανό για ηλεκτρονικές εφαρμογές.



Σχήμα 3.2. Δομή υδρογονομένου (ή παθητικοποιημένου) άμορφου πυριτίου.

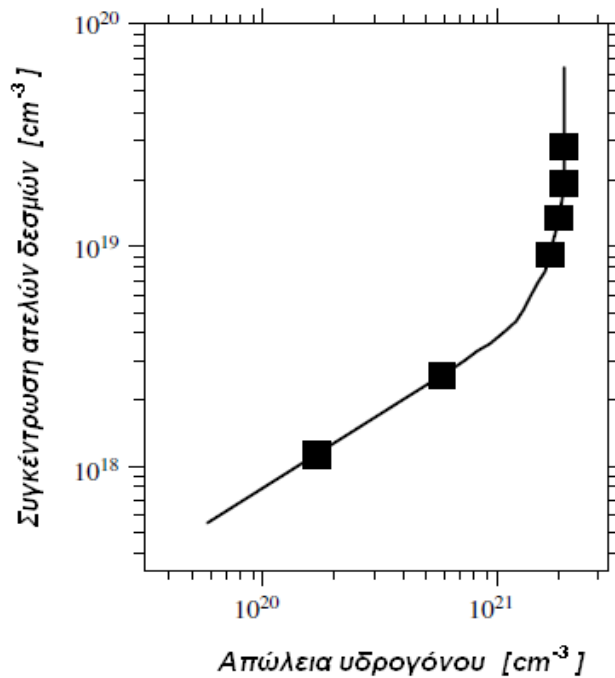
3.2. Το φαινόμενο Staebler-Wronski

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των φ/β στοιχείων άμορφου πυριτίου, είναι η σημαντική μείωση της απόδοσής τους κατά τις πρώτες 1000 ώρες ακτινοβολίας. Ένα στοιχείο μόνης ένωσης a-Si χάνει περίπου το 30% της αρχικής του απόδοσης ενώ ένα στοιχείο τριών ενώσεων, δηλαδή στοιχείο με 3 στρώματα διαφορετικού φ/β υλικού, το 15%.

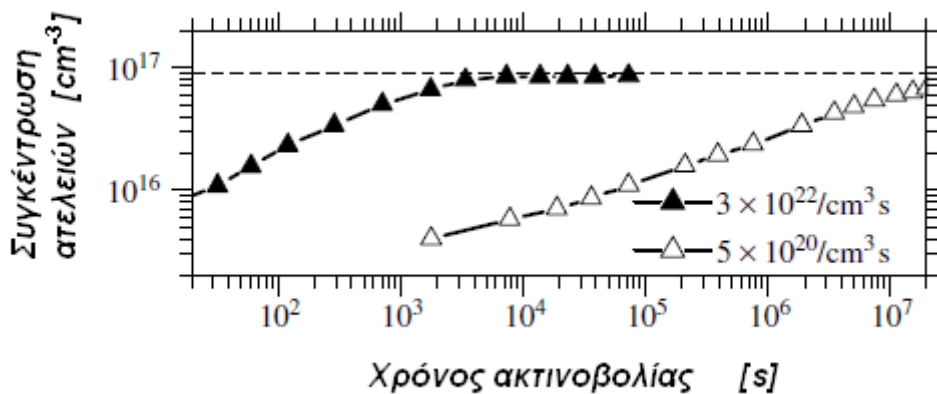


Σχήμα 3.3. Η μείωση της ισχύς εξόδου υπό ακτινοβολία ηλιακού προσομοιωτή ($100\text{mW}/\text{cm}^2$) για ένα στοιχείο μίας επίστρωσης πάχους 260nm και ενός στοιχείου τριών επιστρώσεων κατασκευασμένα από την United Solar Systems Corp. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι αρχικές τιμές της ισχύος εξόδου.

Το φαινόμενο Staebler-Wronski είναι αυτή η αλλαγή που προκαλείται στο υλικό από την ακτινοβολία. Καθότι το φαινόμενο αυτό δεν έχει περιγραφεί πλήρως, θεωρείται ότι η βασική αιτία για την αλλαγή αυτή είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των ατελών δεσμών στο υλικό. Πιθανολογείται ότι η ακτινοβολία παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την απομάκρυνση του υδρογόνου από τους δεσμούς άρα τη δημιουργία ατελών δεσμών.



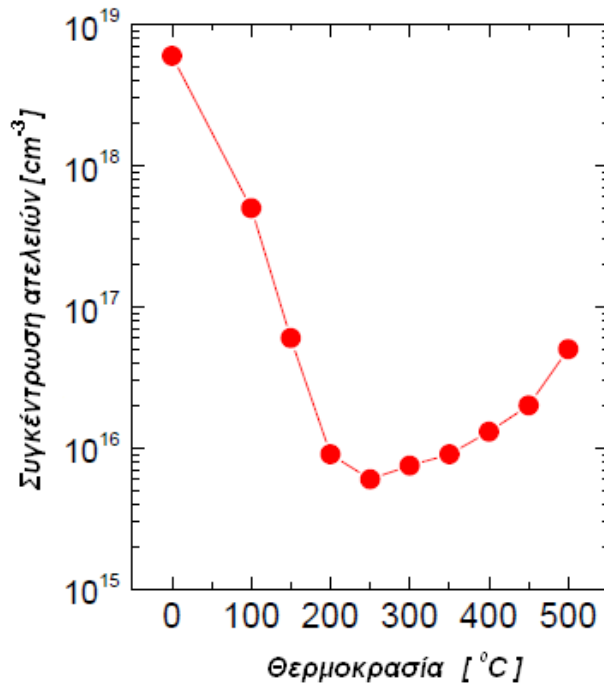
Σχήμα 3.4. Σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των ατελών δεσμών του υλικού και του υδρογόνου που αφαιρείται από τους δεσμούς μέσω θέρμανσης.



Σχήμα 3.5. Διάγραμμα της συγκέντρωσης ατελών δεσμών κατά τη διάρκεια συνεχούς ακτινοβολίας ισχυρής και ασθενέστερης έντασης όπως φαίνεται και από τον ρυθμό δημιουργίας φορέων.

Η κατανόηση του φαινομένου Staebler-Wronski θα μπορούσε να οδηγήσει σε πλήρη εξάλειψή του, με την κατάλληλη τροποποίηση των τεχνικών παραγωγής των στοιχείων a-Si:H. Η μείωση της απόδοσης των στοιχείων όμως δεν είναι αμετάκλητη. Όπως φαίνεται και στο

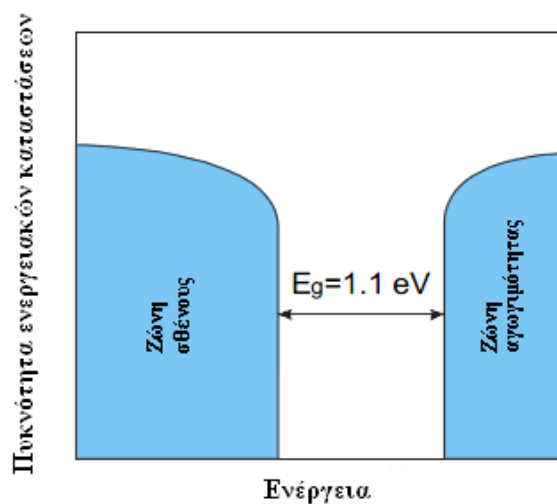
παρακάτω διάγραμμα η συγκέντρωση των ατελειών σχετίζεται με τη θερμοκρασία του υλικού. Η θέρμανση των στοιχείων στους 150°C-200°C έχει σαν συνέπεια την επαναφορά του συστήματος στις αρχικές του συνθήκες απόδοσης.



Σχήμα 3.6. Η σχέση της συγκέντρωσης των ατελών δεσμών με την αύξηση της θερμοκρασίας.

3.3. Ενεργειακές καταστάσεις

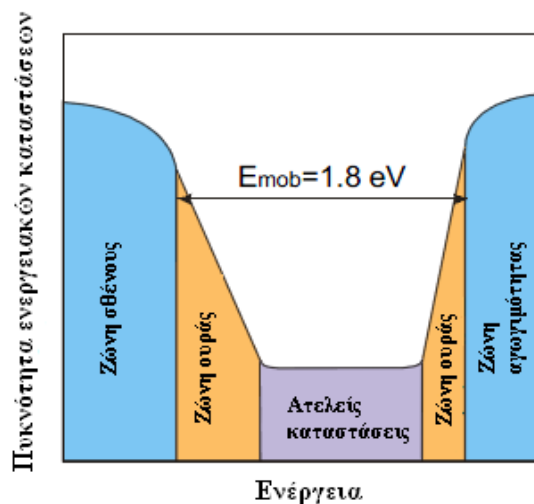
Όπως έχει αναφερθεί στο 2^ο κεφάλαιο, στο κρυσταλλικό πυρίτιο η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας είναι πλήρως καθορισμένες και η διαφορά τους είναι το ενεργειακό διάκενο. Ανάμεσα σε αυτές τις ζώνες δεν υπάρχει καμία άλλη επιτρεπόμενη ενεργειακή κατάσταση.



Σχήμα 3.7. Διάγραμμα ενεργειακών καταστάσεων στο κρυσταλλικό πυρίτιο σε θερμοκρασία δωματίου.

Στο άμορφο πυρίτιο τα πράγματα είναι διαφορετικά. Υπάρχει μία συνέχεια στην πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων και το ενεργειακό διάκενο δεν είναι τόσο ευδιάκριτο. Εξαιτίας της μεγάλης αταξίας του πλέγματος και των τεταμένων δεσμών μεταξύ των ατόμων, η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας επεκτείνονται με τις ζώνες ουράς εντός της απαγορευμένης ενεργειακής περιοχής. Το βάθος στο οποίο εκτείνονται οι ζώνες ουράς είναι ένα μέτρο της αταξίας στο πλέγμα του a-Si:H. Μεγαλύτερη αταξία στο πλέγμα σημαίνει μεγαλύτερη επέκταση των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας στην απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη. Επίσης, οι ατέλειες που οφείλονται στους μετέωρους δεσμούς, προκαλούν την εμφάνιση ενεργειακών καταστάσεων εντός της απαγορευμένης ενεργειακής ζώνης ανάμεσα στη ζώνη σθένους και τη ζώνη αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόνια και οπές που βρίσκονται σε αυτές τις επιπλέον ενεργειακές καταστάσεις χαρακτηρίζονται από μειωμένη κινητικότητα. Έτσι στο a-Si:H δεν ορίζεται το ενεργειακό διάκενο όπως στο c-Si αλλά ως η διαφορά των ενεργειακών καταστάσεων με μεγάλη διαφορά κινητικότητας φορέων. Το ενεργειακό διάκενο κινητικότητας E_{mob} στο a-Si:H είναι μεγαλύτερο από το ενεργειακό διάκενο του c-Si και παίρνει τιμές από 1.75eV έως 1.80eV ανάλογα με το ποσοστό υδρογόνου που έχει εναποτεθεί στο a-Si.

Οι ζώνες ουράς λειτουργούν σαν κέντρα παγίδευσης των φορέων και προκαλούν τη δημιουργία χωρικών φορτίων στο στοιχείο, ενώ οι ατελείς ενεργειακές καταστάσεις συμπεριφέρονται ως ιδανικά σημεία επανασύνδεσης των φορέων επηρεάζοντας παράλληλα τον χρόνο ζωής τους.

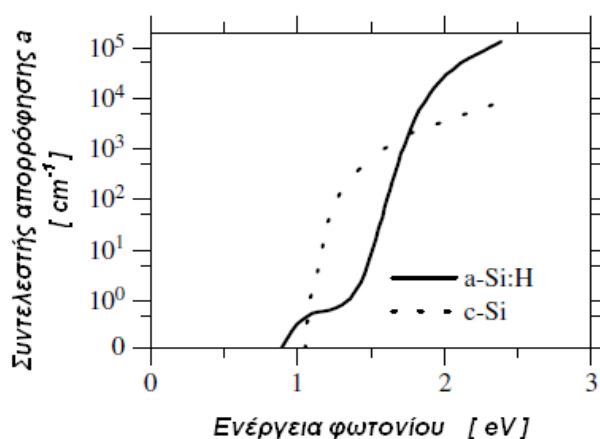


Σχήμα 3.8. Διάγραμμα ενεργειακών καταστάσεων υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου.

3.4. Οπτικές ιδιότητες του a-Si

Οι οπτικές ιδιότητες του a-Si:H χαρακτηρίζονται συνήθως από τον συντελεστή απορρόφησης α και την τιμή του οπτικού ενεργειακού διακενου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο συντελεστής απορρόφησης του a-Si:H και του c-Si. Φαίνεται ότι για τα ορατά μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος το a-Si απορροφά 100 φορές περισσότερο σε σχέση με το c-Si, δηλαδή για την ίδια απορρόφηση ακτινοβολίας, απαιτείται πολύ λιγότερο πάχος άμορφου πυριτίου. Πρακτικά ένα α/β στοιχείο a-Si έχει πάχος περίπου 0,3 μm ενώ το αντίστοιχης απορρόφησης c-Si 300 μm . Η μεγάλη απορρόφηση οφείλεται στην αταξία του πλέγματος που συμπεριφέρεται όπως ένας ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακενου.

Μία σημαντική ιδιότητα του a-Si:H είναι να μεταβάλλεται ελαφρώς ο συντελεστής απορρόφησης ανάλογα με την περιεκτικότητα του υλικού σε υδρογόνο, ενώ μπορεί να αλλάξει σημαντικά όταν στο υλικό υπάρχουν άτομα άνθρακα ή γερμανίου.



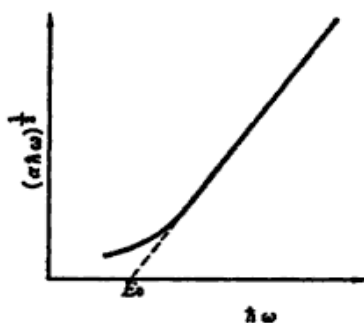
Σχήμα 3.9. Συντελεστής απορρόφησης a του $a\text{-Si}$ και του $c\text{-Si}$.

Μέσω του συντελεστή απορρόφησης καθορίζεται και το οπτικό ενεργειακό διάκενο E_{opt} , ένας συντελεστής που χαρακτηρίζει τα υλικά βασισμένα στο $a\text{-Si:H}$ και αφορά την ικανότητά τους να απορροφούν ακτινοβολία. Γενικά, ένα υλικό με μεγαλύτερο οπτικό ενεργειακό διάκενο απορροφά λιγότερο. Το E_{opt} προκύπτει από την προέκταση ενός γραμμικού μέρους της συνάρτησης $(a(E) \cdot n(E) \cdot E)^{-1/(1+p+q)}$ στο σημείο ενέργειας φωτονίου E όπου $a(E)=0$ για $a \geq 10^3 \text{ cm}^{-1}$:

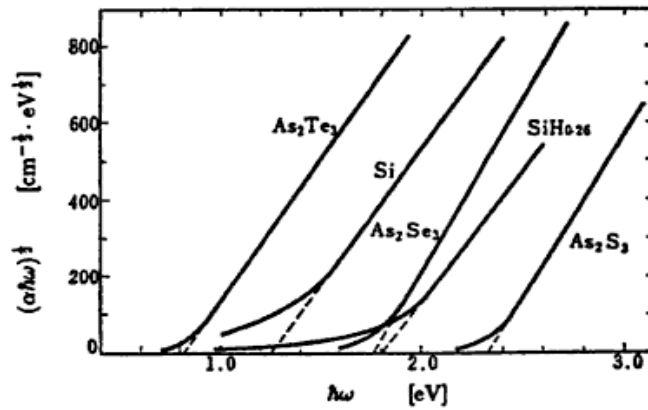
$$(a(E) \cdot n(E) \cdot E)^{-1/(1+p+q)} = B \cdot (E - E_{opt})$$

Σχέση 3.1.

όπου $a(E)$ είναι ο συντελεστής απορρόφησης, $n(E)$ είναι ο συντελεστής διάθλασης, p και q είναι αριθμητικές σταθερές που περιγράφουν τη μορφή της πυκνότητας των εκτεταμένων ζωνών (*extended states*) αγωγιμότητας και σθένους αντίστοιχα και B είναι ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας. Όταν η πυκνότητα των εκτεταμένων ζωνών εξαρτάται από την ενέργεια με έναν συντελεστή τετραγωνικής ρίζας ($p=q=1/2$) όπως συμβαίνει στην περίπτωση του κρυσταλλικού πυριτίου, τότε η παραπάνω σχέση περιγράφει το λεγόμενο γράφημα $Tauc$ και το αντίστοιχο οπτικό ενεργειακό διάκενο ονομάζεται οπτικό διάκενο $Tauc$. Όταν η εξάρτηση από την ενέργεια θεωρείται γραμμική ($p=q=1$) τότε υπολογίζεται το κυβικό οπτικό διάκενο. Για το $a\text{-Si:H}$ το οπτικό διάκενο $Tauc$ είναι από 1.70 έως 1.80 eV, ενώ το κυβικό οπτικό διάκενο για το ίδιο υλικό είναι συνήθως 0.1 με 0.2 eV μικρότερο.



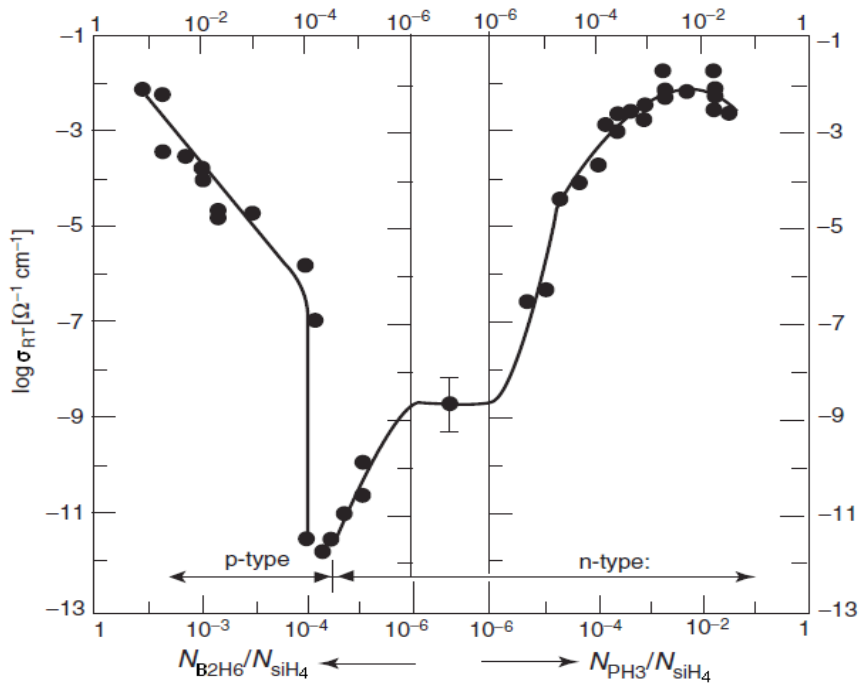
Σχήμα 3.10. Τρόπος υπολογισμού του E_{opt} .



Σχήμα 3.11. Γραφήματα Tauc για διάφορους άμορφους ημιαγωγούς.

3.5. Νόθευση του a-Si:H

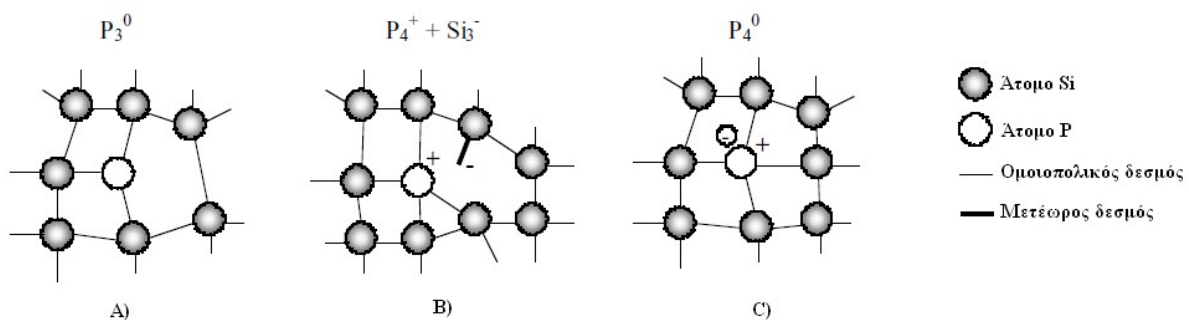
Η ανάγκη για τον έλεγχο του τύπου της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών για φωτοβολταϊκές εφαρμογές έχει τονιστεί ήδη με τη δίοδο p-n. Στο κρυσταλλικό πυρίτιο, η νόθευση μπορεί να γίνει με άτομα βορίου (B) για τη δημιουργία ενός τμήματος p και με άτομα αρσενικού (As) ή, συνηθέστερα, φωσφόρου (P) για τμήματα n. Στο άμορφο πυρίτιο, το οποίο κατασκευάζεται με ηλεκτρική εκκένωση μέσω ατμών σιλανίου (SiH_4), μπορούν να δημιουργηθούν n και p τμήματα απλώς διοχετεύοντας επιπρόσθετα αέρια στον θάλαμο κατασκευής του a-Si. Έτσι, εισάγοντας φωσφίνη (PH_3) τοποθετούνται άτομα φωσφόρου στο πλέγμα του άμορφου πυριτίου, ενώ με την εισαγωγή διβορανίου (B_2H_6) τοποθετούνται άτομα βορίου.



Σχήμα 3.12. Ηλεκτρική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου για τμήματα p και n σε σχέση με την σχετική περιεκτικότητα αερίων στον θάλαμο παρασκευής των υλικών.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου δεν έχουν τη δομή της διόδου p-n. Για λόγους που θα εξηγηθούν αργότερα, η δομή που ακολουθείται σε αυτά τα στοιχεία είναι η p-i-n όπου το τμήμα i είναι ένα ενδογενές, δηλαδή ανόθευτο, τμήμα υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου μεγάλου πάχους σε σχέση με τα τμήματα p και n, στο οποίο γίνεται σχεδόν αποκλειστικά η παραγωγή των φορέων. Οι νοθευμένες περιοχές εισάγουν ένα εσωτερικό πεδίο στα άκρα του ενδογενούς τμήματος για τον διαχωρισμό των ηλεκτρονίων και των οπών. Η ένταση του πεδίου εξαρτάται από τα ποσοστά της νόθευσης στις p, n περιοχές καθώς και από το πάχος του ενδογενούς τμήματος. Ταυτόχρονα, εξασφαλίζουν ωμικές επαφές μικρής αντίστασης μεταξύ του ενδογενούς τμήματος και των εξωτερικών ηλεκτροδίων.

Ο φώσφορος είναι ένα πεντασθενές στοιχείο. Στην καθαρή του μορφή σχηματίζει 3 ομοιοπολικούς δεσμούς με τρία άτομα φωσφόρου ενώ τα περισσευούμενα δύο ηλεκτρόνια τοποθετούνται κοντά στον πυρήνα του. Στο πλέγμα του κρυσταλλικού πυριτίου, όπου όλα τα άτομα σχηματίζουν 4 και όχι 3 ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ τους, λόγω της έκτασης της κρυσταλλικής οργάνωσης, ο φώσφορος αναγκάζεται να πάρει και αυτός την ατομική δομή των ατόμων του πυριτίου φτιάχνοντας 4 ομοιοπολικούς δεσμούς και ελευθερώνοντας ένα ηλεκτρόνιο. Αυτό δεν μπορεί να συμβεί στο συνεχές τυχαίο πλέγμα του άμορφου πυριτίου. Ενεργειακά, είναι προτιμότερο για τα άτομα του φωσφόρου να σχηματίσουν τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς χωρίς να δώσουν κανένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, δηλαδή χωρίς να αποφέρουν καμία αλλαγή στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Η απόδοση νόθευσης που ορίζεται ως το ποσοστό των ατόμων P με τετραπλή συνδιάταξη, είναι αρκετά χαμηλή. Συγκρινόμενη με την αντίστοιχη απόδοση για το κρυσταλλικό πυρίτιο, όπου σε θερμοκρασία δωματίου είναι σχεδόν ίση με 100%, στο a-Si:H είναι της τάξης του 0.1-1%. Αυτό σημαίνει ότι για την ικανοποιητική νόθευση του άμορφου πυριτίου απαιτείται μεγάλη συγκέντρωση ατόμων φωσφόρου.



Σχήμα 3.13. Πιθανές καταστάσεις ατόμων φωσφόρου στο συνεχές τυχαίο πλέγμα του a-Si:H.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.13.A το άτομο του φωσφόρου βρίσκεται συνήθως στην κατάσταση P_3^0 όπου σχηματίζει 3 δεσμούς χωρίς να συνεισφέρει στη διαδικασία της νόθευσης. Στο σχήμα 4.13.C ο φώσφορος παίρνει τη δομή που έχει και στο κρυσταλλικό πυρίτιο. Αυτή η δομή όμως στο πλέγμα του άμορφου πυριτίου χαρακτηρίζεται από πολύ μεγαλύτερη ενέργεια από την ιδανική P_3^0 δομή και για αυτό το λόγο είναι ασταθής. Τα περισσότερα άτομα φωσφόρου που συνεισφέρουν στη νόθευση, έχουν τη δομή του σχήματος 4.13.B όπου το φορτισμένο άτομο συνοδεύεται από τη δημιουργία ενός μετέωρου δεσμού σε ένα κοντινό άτομο πυριτίου. Αυτή η δομή είναι ενεργειακά προτιμότερη από την δομή 4.13.C και ονομάζεται δομή δότη αντισταθμισμένη με ατέλεια. Ο σχηματισμός των δοτών για την περίπτωση του φωσφόρου και αποδεκτών για την περίπτωση του βορίου, με αντιστάθμιση ατελειών, είναι ο κύριος μηχανισμός νόθευσης στο a-Si:H. Αυτό το μοντέλο αυτοαντιστάθμισης, συνεπάγεται ότι η νόθευση προκαλεί τον σχηματισμό μετέωρων δεσμών. Τα νοθευμένα τμήματα του άμορφου πυριτίου, έχουν δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερη συγκέντρωση ατελειών σε σχέση με αυτή στα ενδογενή τμήματα. Τα μήκη διάχυσης των φορέων σε αυτά είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα στο κρυσταλλικό πυρίτιο. Η χρήση της διόδου p-n σε

σε φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου δεν είναι αποδοτική. Για αυτό το λόγο υιοθετήθηκε η δομή p-i-n όπου εισάγεται ένα τμήμα ενδογενούς υλικού ανάμεσα στα τμήματα p και n. Επειδή οι διαδικασίες του φωτοβολταϊκού φαινομένου, όπως η απορρόφηση των φωτονίων και ο διαχωρισμός των φορέων γίνεται κατά κόρον στον i τμήμα, αυτό ονομάζεται και ενεργό τμήμα του φ/β στοιχείου a-Si:H ή απορροφητής.

3.6. Μέθοδοι κατασκευής άμορφου πυριτίου

Η παραγωγή άμορφου πυριτίου επετεύχθη αρχικά μέσω της εκκένωσης αίγλης από τάσεις ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency, RF) στο σιλάνιο (SiH₄). Η μέθοδος αυτή ονομάζεται χημική εναπόθεση ατμών με υποβοήθηση πλάσματος (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) και είναι η πιο διαδεδομένη σήμερα. Πολλές μέθοδοι εναπόθεσης έχουν μελετηθεί με στόχο την βελτίωση της ποιότητας του υλικού και την αύξηση του ρυθμού εναπόθεσης. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι πιο γνωστές μέθοδοι εναπόθεσης καθώς και τα χαρακτηριστικά τους.

Διαδικασία	Μέγιστος ρυθμός[Å/s]	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Κατασκευαστές
RF PECVD	3	Υψηλή ποιότητα, ομοιόμορφο	Αργή	Πολλοί
DC PECVD	3	Υψηλή ποιότητα, ομοιόμορφο	Αργή	BP Solar
VHF PECVD	15	γρήγορη	χαμηλή ομοιομορφία	Heliosphera
Μικροκυματική PECVD	50	πολύ γρήγορη	χαμηλή ποιότητα του στρώματος	Canon
Θερμού νήματος	50	πολύ γρήγορη	χαμηλή ομοιομορφία	Κανέναν
Φωτολυτική CVD	1	Υψηλή ποιότητα	Αργή	Κανέναν
Ψεκασμός	3		Χαμηλή ποιότητα Αργή	Κανέναν

Πίνακας 3.1. Μέθοδοι εναπόθεσης άμορφου πυριτίου.

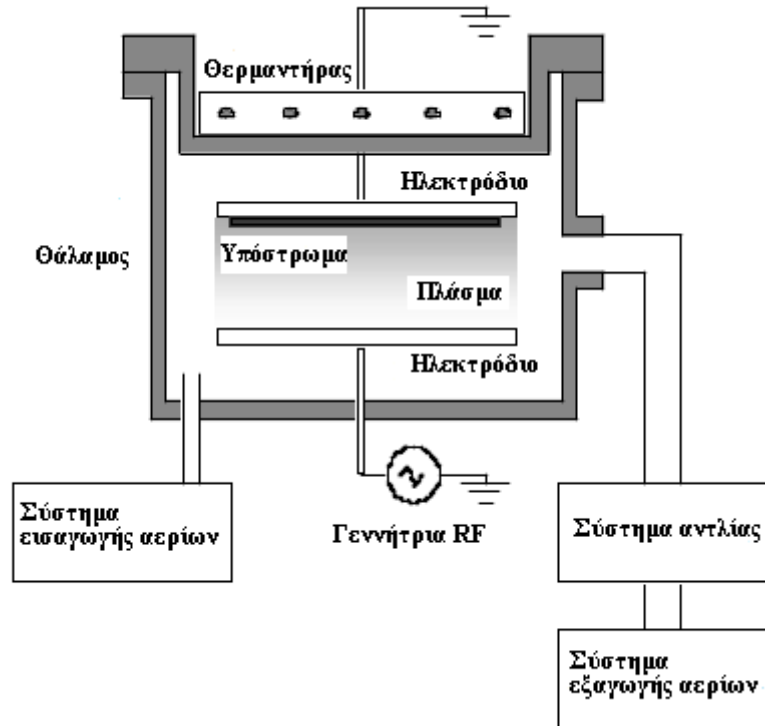
3.6.1. Η μέθοδος RF PECVD

Στην τεχνολογία RF PECVD ένα μίγμα από SiH₄ και H₂ διοχετεύεται σε έναν θάλαμο κενού ο οποίος έχει εκκενωθεί από μία αντλία. Μέσα στον θάλαμο, εγκαθίστανται δύο ηλεκτρόδια και πάνω τους εφαρμόζεται μία τάση ραδιοσυχνότητας. Το ένα εκ των δύο ηλεκτροδίων γειώνεται. Για μία συγκεκριμένη τιμή της τάσης ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, υπάρχει ένα εύρος πίεσης του αερίου για το οποίο δημιουργείται πλάσμα. Το πλάσμα διεγείρει και διασπά τα μόρια του αερίου παράγοντας ιόντα και ελεύθερες ρίζες. Διάφορα υποστρώματα τοποθετούνται πάνω σε ένα ή και στα δύο ηλεκτρόδια και τα στρώματα υδρογονωμένου πυριτίου μεγαλώνουν καθώς οι ρίζες διαχέονται σε αυτά. Τα υποστρώματα θερμαίνονται ώστε να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα του στρώματος που εναποτίθεται.

Ένα σύστημα PECVD αποτελείται συνήθως από κάποια βασικά τμήματα:

- Το σύστημα τροφοδοσίας αερίων
- Τον θάλαμο εναπόθεσης στον οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια, οι βάσεις στήριξης των υποστρωμάτων, το σύστημα θέρμανσης των υποστρωμάτων και η τροφοδοσία της RF τάσης

- Ένα σύστημα άντλησης που συνήθως έχει μία στροβιλομοριακή αντλία που υποστηρίζεται από μια μηχανική αντλία
- Ένα σύστημα ελέγχου της πίεσης
- Ένα σύστημα εξαγωγής των αερίων που παράγονται.



Σχήμα 3.14. Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος εναπόθεσης RF PECVD.

Η ανάπτυξη του στρώματος στη μέθοδο PECVD αποτελείται από διάφορα βήματα: διάχυση του αρχικού αερίου, διάσπαση μέσω ηλεκτρονιακών συγκρούσεων, χημική αντίδραση αερίου, διάχυση ελεύθερων ριζών και εναπόθεση.

Η πίεση εντός του θαλάμου είναι συνήθως μεταξύ 0.05 και 2 Torr (1 Torr=133.322 Pascal= 1.3332×10^{-3} bar). Η χαμηλή πίεση συνεισφέρει στην ομοιόμορφη εναπόθεση ενώ υψηλότερη πίεση χρησιμοποιείται για την κατασκευή μικροκρυσταλλικού πυριτίου (μορφή του πυριτίου με ατομική δομή ενδιάμεση του άμορφου και του κρυσταλλικού). Η ισχύς της γεννήτριας είναι περίπου 10 με 100mW/cm² για έναν χωρητικά συζευγμένο αντιδραστήρα. Μικρότερη ισχύς δεν είναι ικανή να διατηρήσει το πλάσμα, ενώ μεγάλες τιμές της ισχύος χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερους ρυθμούς εναπόθεσης. Η θερμοκρασία του υποστρώματος καθορίζεται συνήθως στους 150°C με 350°C. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενσωματώνεται περισσότερο υδρογόνο στο στρώμα πυριτίου το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την μικρή αύξηση του ενεργειακού διάκενου. Σε υψηλές θερμοκρασίες συμβαίνει το αντίθετο και το ενεργειακό διάκενο μειώνεται. Το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μεταξύ 1 και 5 cm για εναπόθεση a-Si. Μικρότερο διάκενο συντελεί σε πιο ομοιόμορφη εναπόθεση ενώ το μεγαλύτερο διάκενο διευκολύνει την διατήρηση του πλάσματος.

Για την επίβλεψη της ανάπτυξης του στρώματος πυριτίου, χρησιμοποιούνται διάφορες διαγνωστικές μέθοδοι όπως φασματοσκοπία οπτικής εκπομπής, φασματοσκοπία οπτικής απορρόφησης, ανακλαστική συμβολομετρία με λέιζερ για τις μετρήσεις ρυθμού εναπόθεσης και σκέδαση φωτεινής δέσμης από λέιζερ για την ανίχνευση σχηματισμού μακρομορίων στην αέρια φάση.

Από τις ελεύθερες ρίζες που παράγονται από το σιλάνιο η ρίζα SiH_3 θεωρείται ότι είναι αυτή που συνεισφέρει περισσότερο για την ανάπτυξη υψηλής ποιότητας στρωμάτων a-Si.

3.6.2. Μέθοδοι VHF PECVD και MW PECVD

Η καθιερωμένη συχνότητα RF για εναπόθεση με εκκένωση αίγλης είναι τα 13.56MHz (που ανήκει στις λεγόμενες υψηλές συχνότητες, HF). Έχουν μελετηθεί και επιπλέον συχνότητες τάσης όπως η DC ($f=0$), χαμηλές συχνότητες ($f\sim\text{kHz}$) πολύ υψηλές συχνότητες (VHF, $f\sim 20\text{-}150\text{MHz}$) καθώς και μικροκυματικές συχνότητες ($f\sim 2.45\text{GHz}$).

Στο VHF φάσμα ο ρυθμός εναπόθεσης αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας της γεννήτριας, διατηρώντας την ισχύ ίδια. Έτσι είναι εφικτή η εναπόθεση σε ρυθμούς μεγαλύτερους των 10 \AA/s χωρίς την παράλληλη δημιουργία δευτερογενών ενώσεων που μολύνουν το αναπτυσσόμενο στρώμα (silicon polyhydrite powder), κάτι που συμβαίνει στο φάσμα RF. Σήμερα στην Ελλάδα, η εταιρία Heliosphera δραστηριοποιείται στην κατασκευή φ/β στοιχείων μικρομορφικού πυριτίου χρησιμοποιώντας την τεχνική VHF PECVD.

Στις μικροκυματικές συχνότητες MW όταν το πλάσμα έρχεται σε επαφή με το υπόστρωμα, παρ'όλο που είναι εφικτοί πολύ μεγαλύτεροι ρυθμοί εναπόθεσης σε σχέση με τις RF συχνότητες, οι οπτικοηλεκτρονικές ιδιότητες του στρώματος πυριτίου που παράγεται δεν είναι αντιστοίχως ικανοποιητικές. Για αυτό το λόγο έχει εφαρμοστεί η τεχνική της απομακρυσμένης διέγερσης. Σε αυτήν, τα υποστρώματα τοποθετούνται εκτός της ζώνης του πλάσματος. Ακολούθως, το πλάσμα διεγείρει ή διασπά ένα αέριο φορέα όπως He, As ή H_2 το οποίο διασχίζει τη ζώνη του πλάσματος και φτάνει στα υποστρώματα. Ο φορέας, διεγείρει το SiH_4 ή το Si_2H_6 το οποίο κατευθύνεται προς τον θάλαμο όπου βρίσκονται τα υποστρώματα. Με αυτή τη μέθοδο διατηρείται η ρίζα SiH_3 ενώ ταυτόχρονα μειώνονται οι συγκεντρώσεις άλλων ριζών (SiH_2 , SiH).

3.6.3. Μέθοδος θερμού νήματος

Ένα σύστημα θερμού νήματος (hot wire chemical vapor deposition, HWCVD) μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με αυτό της μεθόδου RF PECVD με τη διαφορά ότι η γεννήτρια RF αντικαθίσταται από ένα θερμαινόμενο νήμα. Στη μέθοδο αυτή σιλάνιο και άλλα αέρια όπως ήλιο και υδρογόνο διοχετεύονται στον θάλαμο. Τα αέρια διεγείρονται καταλυτικά ή διασπώνται σε ελεύθερες ρίζες και ιόντα μέσω ενός μεταλλικού νήματος το οποίο θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες (1800°C - 2000°C). Ύστερα οι ρίζες του πυριτίου διαχέονται στον θάλαμο και εναποτίθενται στο υπόστρωμα. Τα στοιχεία που έχουν κατασκευαστεί με αυτή τη μέθοδο εμφανίζουν μικρότερη περιεκτικότητα σε υδρογόνο ενώ παράλληλα είναι πιο ευσταθή στις μεταβολές λόγω του φαινομένου Staebler-Wronski. Παρά τους πολύ υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης (μέχρι και $150\text{-}300 \text{ \AA/s}$), η μέθοδος αυτή δεν μπορεί ακόμα να εξασφαλίσει την ομοιομορφία στο στρώμα πυριτίου που εξασφαλίζει η μέθοδος RF PECVD.

3.6.4. Αραίωση με υδρογόνο και κράματα βασισμένα στο a-Si:H

Η ισχυρή αραίωση του σιλανίου με υδρογόνο, κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης, μειώνει τη συγκέντρωση των ατελειών και βελτιώνει την ευστάθεια του στοιχείου έναντι στο φαινόμενο Staebler-Wronski. Φ/β στοιχεία των οποίων τα ενδογενή τμήματα εναποτέθηκαν με ισχυρή

αραίωση από υδρογόνο έδειξαν βελτιωμένη απόδοση. Αν η αραίωση αυξηθεί τότε ο ρυθμός εναπόθεσης μειώνεται. Για μεγάλη αύξηση της αραίωσης, τα στρώματα πυριτίου που εναποτίθενται παύουν να είναι άμορφα, αλλά γίνονται πλέον μικροκρυσταλλικά.

Εκτός από το a-Si:H, μπορούν να εναποτεθούν και κράματα βασισμένα σε αυτό, εισάγοντας στον θάλαμο και άλλα αέρια όπως το GeH₄, CH₄, O₂ (ή NO₂) και NH₃ ούτως ώστε να παραχθεί a-SiGe_x, a-SiC_x, a-SiO_x και a-SiN_x αντίστοιχα. Από αυτά τα κράματα το a-SiGe έχει μελετηθεί εκτενώς και χρησιμοποιείται σε στοιχεία πολλαπλών επιστρώσεων ως ο απορροφητής χαμηλού ενεργειακού διάκενου. Το ενεργειακό διάκενο του κράματος αυτού μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητά του σε γερμάνιο.

Ένα πρόβλημα που προκύπτει με την εισαγωγή GeH₄ στον θάλαμο εναπόθεσης είναι ο διαφορετικός χρόνος διάσπασης του από αυτόν του σιλανίου, συνεπώς δεν εγγυάται την ομοιομορφία του στρώματος. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, χρησιμοποιείται δισιλάνιο Si₂H₆ αντί του σιλανίου, μιας και αυτό έχει αρκετά κοντινό χρόνο διάσπασης με το GeH₄.

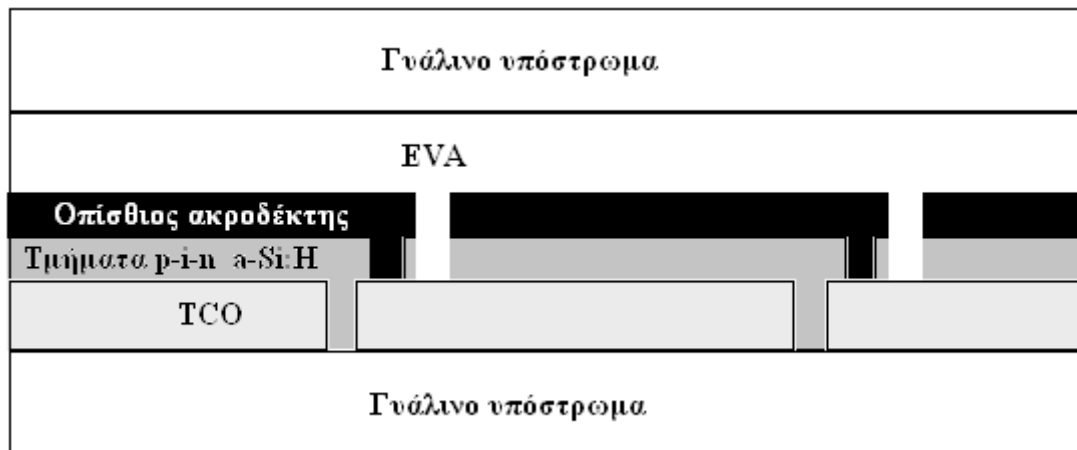
3.6.5. Παραγωγή φ/β στοιχείων a-Si:H

Στα φ/β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου, η ισχύς που παράγεται δεν επαρκεί για πρακτικές εφαρμογές και για αυτό το λόγο τα στοιχεία συνδέονται μηχανικά για να προσφέρουν την απαιτούμενη ισχύ. Στην τεχνολογία του a-Si:H ένα σπουδαίο επίτευγμα ήταν η ανάπτυξη των μονολιθικά ολοκληρωμένων στοιχείων (monolithically integrated cells). Η ενσωμάτωση μπορεί να επιτευχθεί με τεχνικές μάσκας ή με χάραξη laser ώστε πολλά φ/β στοιχεία να συνδέονται σε σειρά χρησιμοποιώντας το ίδιο υπόστρωμα. Τα βήματα για αυτή τη σχεδίαση μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα στην αλυσίδα παραγωγής δίνοντας έτσι ένα σημαντικό πλεονέκτημα στο άμορφο πυρίτιο έναντι στο κρυσταλλικό.

Τα βασικά βήματα της ολοκλήρωσης παραμένουν ίδια είτε χρησιμοποιείται γυαλί ως υπόστρωμα είτε πρόκειται για ανοξειδωτο χάλυβα. Αυτά είναι:

- προετοιμασία υποστρώματος
- εναπόθεση εμπρόσθιου ακροδέκτη TCO (Transparent Conductive Oxide)
- εναπόθεση των τμημάτων p, i, n a-Si:H
- εναπόθεση του οπίσθιου ακροδέκτη
- τελική συναρμολόγηση (ενθυλάκωση, διαμόρφωση και έλεγχος)

Η εσωτερική διασύνδεση των στοιχείων επιτυγχάνεται με δύο ή περισσότερες χαράξεις με laser (συνήθως παλμικά laser Nd:YAG). Με τη χάραξη αφαιρούνται επιλεκτικά λεπτές γραμμές (πάχος 50 με 150 μm) υλικού. Το τελικό προϊόν πρέπει να προστατεύεται από ατμοσφαιρικούς παράγοντες (σκόνη, ρύποι, νερό). Η πιο δημοφιλής μέθοδος ενθυλάκωσης του στοιχείου είναι η χρήση ενός υμένα πολυμερούς EVA (ethylene vinyl acetate), πάνω στο οποίο τοποθετείται ένα τμήμα γυαλιού.



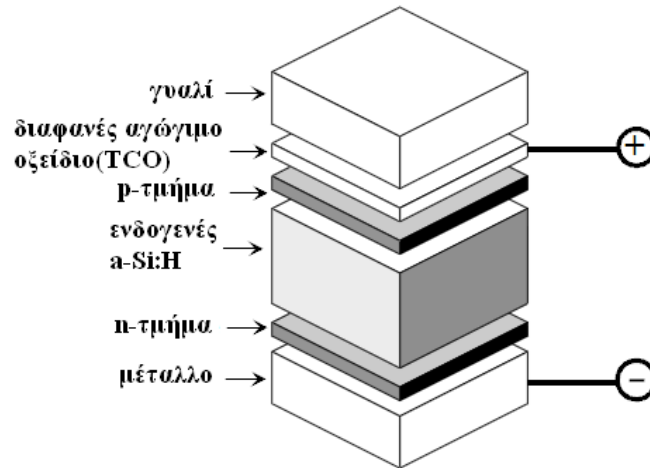
Σχήμα 3.15. Δομή φ/β στοιχείων στο ίδιο υπόστρωμα με εσωτερικές εν σειρά συνδέσεις.

3.7. Το φ/β στοιχείο άμορφου πυριτίου μίας επίστρωσης

3.7.1. Δομή του στοιχείου

Ανάμεσα στα φ/β στοιχεία c-Si και a-Si:H υπάρχει μία βασική διαφορά. Ένα συνηθισμένο φ/β στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου, αποτελείται από ένα τμήμα p πάχους 300 έως 500μm πάνω στο οποίο τοποθετείται ένα τμήμα n για να σχηματιστεί η διόδος p-n. Η διέγερση των φορέων γίνεται στον όγκο του ηλεκτρικά ουδέτερου τμήματος p (σε απόσταση ίση περίπου με το μήκος διάχυσης από την περιοχή της διόδου) από όπου τα φωτοδιεγερμένα ηλεκτρόνια διαχέονται προς τη ζώνη εξάντλησης της διόδου και ολισθαίνουν προς το n τμήμα μέσω της επίδρασης του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό το είδος φ/β στοιχείου ονομάζεται στοιχείο διάχυσης καθότι ο κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς των φορέων είναι η διάχυση. Συνεπώς το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που καθορίζει τον σχεδιασμό και την απόδοση των φ/β στοιχείων c-Si.

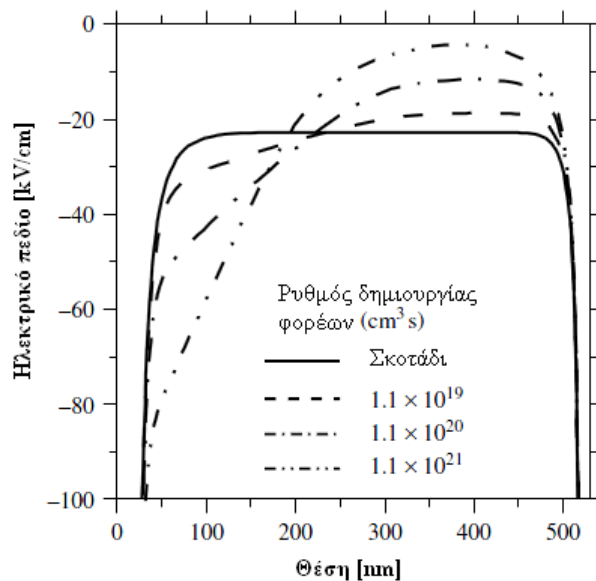
Στο a-Si:H τα μήκη διάχυσης των φορέων είναι πολύ μικρότερα. Σε ένα ενδογενές τμήμα υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου το μήκος διάχυσης είναι 0.1 με 0.3μm. Στα νοθευμένα τμήματα όπου η συγκέντρωση των ατελειών είναι πολύ μεγαλύτερη, το μήκος διάχυσης μειώνεται αισθητά. Μία δομή φ/β στοιχείου βασισμένη στην διάχυση των φορέων μειονότητας στις ηλεκτρικά ουδέτερες νοθευμένες περιοχές, όπως στο κρυσταλλικό πυρίτιο, δεν θα ήταν αποδοτική. Όλοι οι φωτοδιεγερμένοι φορείς θα επανασυνδέονταν στους μετέωρους δεσμούς προτού φτάσουν στη ζώνη εξάντλησης της διόδου p-n λόγω του πολύ μικρού μήκους διάχυσης. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η δομή p-i-n που αποτελείται από τρία τμήματα. Ένα τμήμα p a-SiC:H, ένα ενδογενές (intrinsic-i) τμήμα a-Si:H και ένα τμήμα n a-Si:H. Το τμήμα p a-SiC:H έχει συνήθως πάχος 10nm, το ενδογενές τμήμα a-Si:H 300-500nm και το τμήμα n a-Si:H 20nm. Το ενδογενές τμήμα τοποθετείται ανάμεσα στα νοθευμένα τμήματα έτσι ώστε να παρουσιάζεται ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται εντός του i τμήματος, υπό την επίδραση του πεδίου διαχωρίζονται και τα μεν ηλεκτρόνια ολισθαίνουν προς το n τμήμα ενώ οι σπές προς το p τμήμα όπου συλλέγονται από τους εξωτερικούς ακροδέκτες. Συμπεραίνεται ότι ο κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς των φορέων είναι η ολίσθηση και για αυτό το λόγο το φ/β στοιχείο a-Si:H ονομάζεται στοιχείο ολίσθησης.



Σχήμα 3.16. Δομή ενός φ/β στοιχείου *a-Si:H*.

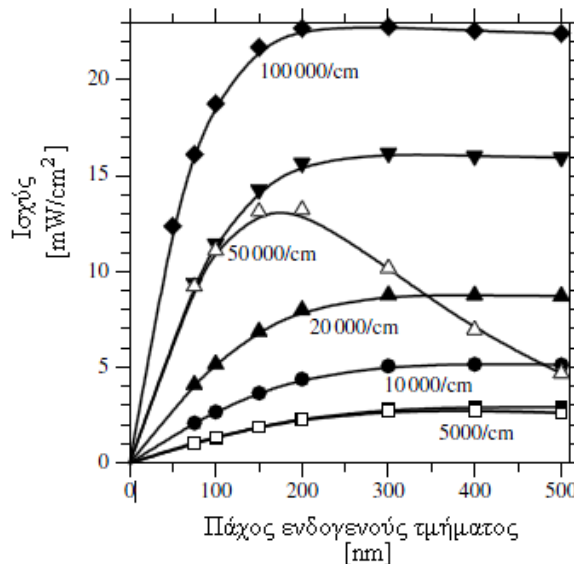
3.7.2. Το ενδογενές τμήμα

Το ιδανικό πάχος του ενδογενούς τμήματος είναι μία σημαντική παράμετρος κατά τον σχεδιασμό του φ/β στοιχείου. Ένα παχύ στρώμα έχει σαν αποτέλεσμα της αύξηση της απορρόφησης, αλλά ταυτόχρονη μείωση της συλλογής των φορέων ενώ μείωση του πάχους οδηγεί σε αυξημένη συλλογή φορέων με μειωμένη απορρόφηση. Το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο καθώς και η κινητικότητα και ο χρόνος ζωής των φορέων είναι οι συντελεστές που καθορίζουν την αποτελεσματική συλλογή. Το πεδίο εξαρτάται από το ποσοστό της νόθευσης των p και n τμημάτων αφού αυτά συμβάλλουν στην διαφορά δυναμικού, καθώς και στο πάχος του ενδογενούς τμήματος. Εξαιτίας των ενεργειακών ζωνών εντός της απαγορευμένης ζώνης, συχνά οι φορείς παγιδεύονται σε αυτές τις ενεργειακές καταστάσεις προσδίδοντας σε συγκεκριμένα σημεία του όγκου χωρικό φορτίο το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την ανομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου. Όταν το στοιχείο ακτινοβολείται, υψηλές συγκεντρώσεις φωτοδιεγερμένων φορέων επηρεάζουν το φορτίο αυτό. Σε έντονη ακτινοβολία, οι σπές εξαιτίας της μικρής κινητικότητας δημιουργούν ένα μεγάλο χωρικό φορτίο το οποίο οδηγεί στην αποδυνάμωση του ηλεκτρικού πεδίου στο πίσω μέρος του στοιχείου.



Σχήμα 3.17. Η αποδυνάμωση του ηλεκτρικού πεδίου ενός φ/β στοιχείου *a-Si:H* σε συνθήκες βραχυκύκλωσης.

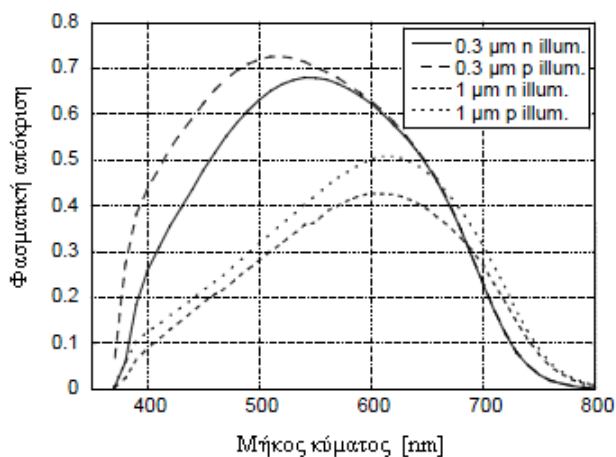
Αυτό έχει σαν συνέπεια τον κορεσμό της παραγόμενης ισχύος. Σε έντονη μονοχρωματική ακτινοβολία, δηλαδή φωτόνια ενέργειας περίπου 2.3eV ο κορεσμός της ισχύος επέρχεται για πάχος ενδογενούς τμήματος μεγαλύτερο από 100nm. Για φωτόνια ενέργειας 1.8eV ο κορεσμός εμφανίζεται για πάχος άνω των 300nm. Τα πάχη αυτά, αντιπροσωπεύουν το μήκος συλλογής των φορέων το οποίο καθορίζεται από την κατάρρευση του ηλεκτρικού πεδίου. Για φ/β στοιχεία a-Si:H το βέλτιστο πάχος ενδογενούς τμήματος είναι 250 με 300nm.



Σχήμα 3.18. Παραγόμενη ισχύς σε σχέση με το πάχος του ενδογενούς τμήματος ενός στοιχείου p-i-n a-Si:H χωρίς οπίσθιο ανακλαστήρα, όπου φαίνεται ο κορεσμός της ισχύος. Οι διάφορες καμπύλες αποτελούν αποτελέσματα μονοχρωματικής ακτινοβολίας με ενέργεια φωτονίων από 1.8 έως 2.5eV. Τα συμπαγή σύμβολα αφορούν ακτινοβολήση από το τμήμα τύπου p ενώ τα διαφανή ακτινοβολήση από το τμήμα τύπου n.

3.7.3. Επιφάνεια ακτινοβολίας

Η διαδικασία απορρόφησης φωτονίων και δημιουργίας ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής συμβαίνει περισσότερο στον όγκο και στην επιφάνεια του στοιχείου. Στα περισσότερα φ/β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου, η επιφάνεια ακτινοβολίας είναι το τμήμα n. Στα στοιχεία άμορφου πυριτίου η ακτινοβολήση μέσω του τμήματος αυτού, θα ανάγκαζε τις δημιουργούμενες οπές να ταξιδέψουν μέχρι τον ακροδέκτη του p τμήματος διαμέσου του ενδογενούς τμήματος. Οι οπές όμως, όπως έχει αναφερθεί, έχουν πολύ μικρότερη κινητικότητα σε σχέση με τα ηλεκτρόνια και σε συνδυασμό με τις ατέλειες του όγκου δεν θα μπορούσαν να συλληθθούν αποτελεσματικά. Για αυτό το λόγο έχει επικρατήσει τα στοιχεία αυτά να ακτινοβολούνται πάντα από την p περιοχή. Καθότι τα διεγερμένα ηλεκτρόνια στην περιοχή αυτή επανασυνδέονται γρήγορα, είναι προτιμότερο να μειωθεί η απορρόφηση μειώνοντας το πάχος του p τμήματος και ενώνοντάς το με άνθρακα. Αυτό το τμήμα τύπου p a-SiC:H έχει οπτικό διάκενο περίπου 2eV.



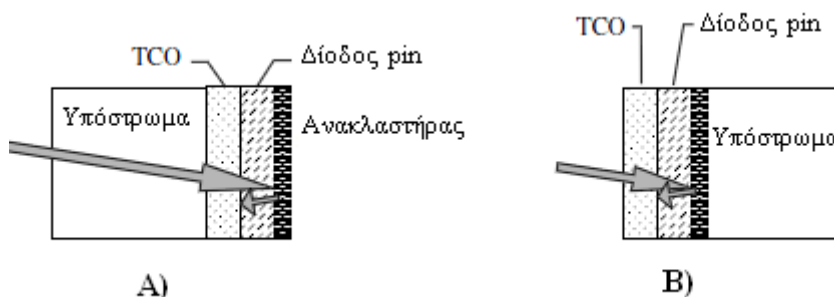
Σχήμα 3.19. Φασματική απόκριση φ/β στοιχείων πάχους 0.3 και 1μm με ακτινοβολήση από την πλευρά τύπου p και n.

3.7.4. Μέθοδοι σχεδίασης

Υπάρχουν δύο μέθοδοι όσον αφορά τον σχεδιασμό ενός φ/β στοιχείου άμορφου πυριτίου. Η σχεδίαση επιστρώματος και η σχεδίαση υποστρώματος, οι οποίες καθορίζουν τα βήματα της εναπόθεσης των υλικών.

Στη σχεδίαση επιστρώματος, πρώτα εναποτίθεται το p τμήμα, μετά το ενδογενές τμήμα και τελευταίο το n τμήμα. Η εναπόθεση γίνεται συνήθως πάνω σε γυαλί το οποίο είναι καλυμμένο με ένα τμήμα ενός διαφανούς αγωγίμου οξειδίου (transparent conductive oxide, TCO). Η επιφάνεια TCO λειτουργεί ως ο εμπρόσθιος ακροδέκτης. Ο οπίσθιος ακροδέκτης είναι μία επιφάνεια μετάλλου, που εναποτίθεται πάνω σε μία ενδιάμεση επιφάνεια TCO. Η επιπρόσθετη επιφάνεια TCO χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί το ταίριασμα των συντελεστών διάθλασης μεταξύ του τμήματος n και του μεταλλικού τμήματος αλλά και για να αποφευχθεί η ανάμειξη του πυριτίου με το μέταλλο.

Στην περίπτωση της σχεδίασης υποστρώματος, το υπόστρωμα αποτελεί το πίσω μέρος του φ/β στοιχείου. Έτσι, χρησιμοποιούνται αδιαφανή υποστρώματα όπως ανοξείδωτος χάλυβας ή φύλλα ενός αδιαφανούς πολυμερούς. Τα φύλλα αυτά μπορεί να είναι αρκετά λεπτά ώστε να είναι ευλύγιστα. Πάνω στο υπόστρωμα τοποθετείται ο πίσω ακροδέκτης ο οποίος αποτελείται από αλουμίνιο ή άργυρος και από ένα τμήμα TCO. Αφότου εναποτεθεί η φωτοδίοδος n-i-p a-Si:H, ο εμπρόσθιος ακροδέκτης σχηματίζεται από μία επιφάνεια TCO.

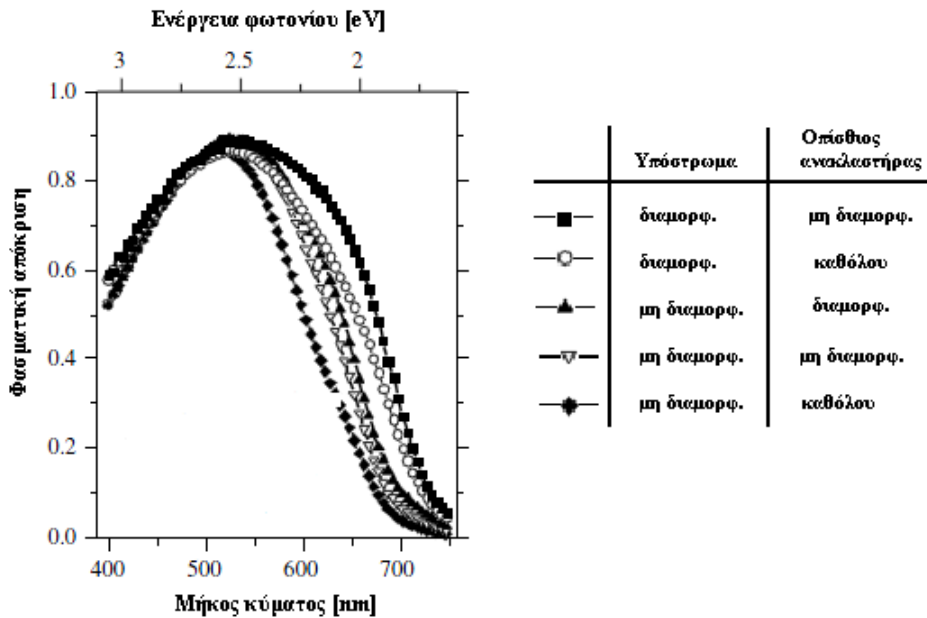


Σχήμα 3.20. Οι δύο μέθοδοι σχεδίασης, επιστρώματος (A) και υποστρώματος (B).

3.7.5. Τεχνικές παγίδευσης του φωτός

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η πλήρης απορρόφηση της ακτινοβολίας επιτυγχάνεται όταν το πάχος του υλικού είναι ίσο ή μεγαλύτερο του αντίστροφου του κρίσιμου συντελεστή απορρόφησης. Αντίστοιχα αποτελέσματα μπορούν να επέλθουν με κατάλληλη τροποποίηση των οπτικών χαρακτηριστικών του φ/β στοιχείου κατά το σχεδιασμό του χωρίς να απαιτείται μεγάλο πάχος υλικού.

Η χρήση του ανακλαστήρα στην πίσω επιφάνεια αυξάνει την παραγόμενη ισχύ. Για ασθενώς απορροφούμενη ακτινοβολία (όπου ο συντελεστής ανάκλασης είναι της τάξης των 5000/cm) ο ιδανικός ανακλαστήρας μπορεί να αποφέρει μία αύξηση στην ισχύ του στοιχείου έως και 100% αφού το φως το διαπερνά 2 φορές, μία καθώς εισέρχεται σε αυτό και μία δεύτερη αφού ανακλαστεί. Για ακτινοβολία με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (της τάξης των 50000/cm) ο ανακλαστήρας δεν αποφέρει καμία αύξηση στην ισχύ δεδομένου ότι αυτή η ακτινοβολία απορροφάται πολύ πριν τον συναντήσει. Για μεγαλύτερη παγίδευση του φωτός εντός του στοιχείου, οι επιφάνειες των τμημάτων TCO χαράζονται ανισοτροπικά ώστε να διαθλάται η ακτινοβολία.

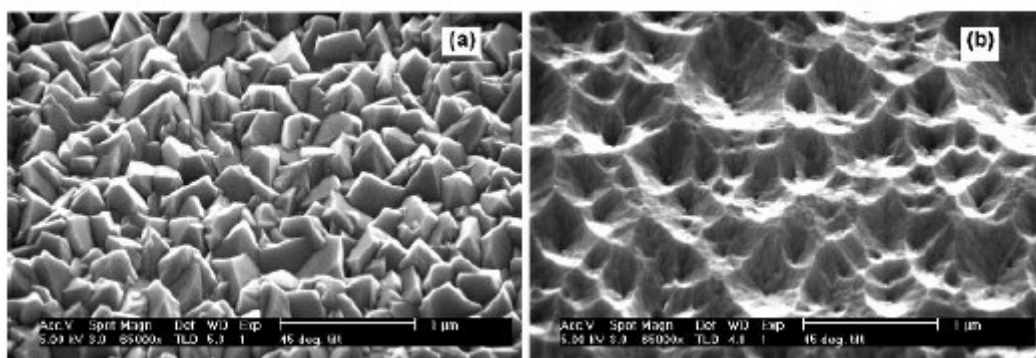


Σχήμα 3.21. Φασματική απόκριση φ/β στοιχείου για διάφορες συνθήκες διαμόρφωσης υποστρώματος και οπίσθιου ανακλαστήρα.

3.7.6. Είδη TCO και απαιτήσεις

Το διαφανές αγώγιμο οξείδιο εκτός από την ικανότητα να μπορεί να χαραχθεί πρέπει να ικανοποιεί και επιπλέον ανάγκες όπως βέλτιστη οπτική διαπερατότητα στην περιοχή του φάσματος που ενδιαφέρει (350nm με 800nm για απορροφητές a-Si:H και 350nm με 1000nm για απορροφητές a-SiGe:H), χαμηλή αντίσταση φύλλου και αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία. Το πιο δημοφιλές TCO είναι το οξείδιο του κασσίτερου νοθευμένο με φθόριο $\text{SnO}_2:\text{F}$ το οποίο παράγεται με την τεχνική εναπόθεσης ατμών σε ατμοσφαιρική πίεση (atmospheric pressure chemical vapour deposition, APCVD) σε θερμοκρασία 500°C. Το οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO είναι ένας πιθανός αντικαταστάτης του $\text{SnO}_2:\text{F}$ επειδή η εναπόθεσή του γίνεται σε μικρότερη θερμοκρασία (λιγότερο από 300°C) και είναι ευσταθές ενάντια στο πλάσμα υδρογόνου και σε διαδικασίες υψηλής θερμοκρασίας. Η επίστρωση ZnO λειτουργεί επίσης και σαν φράγμα στις ακαθαρσίες του υποστρώματος, ενώ παράλληλα είναι και φθηνότερο από άλλα υλικά TCO. Τα οξείδια του

ψευδαργύρου παρασκευάζονται με διάφορες τεχνικές εναπόθεσης όπως η LPCVD, η ETP CVD και με τεχνικές ψεκασμού.



Σχήμα 3.22. Διαμορφωμένη επιφάνεια τμημάτων TCO από $\text{SnO}_2:\text{F}$ (a) και $\text{ZnO}:\text{Al}$ (b).

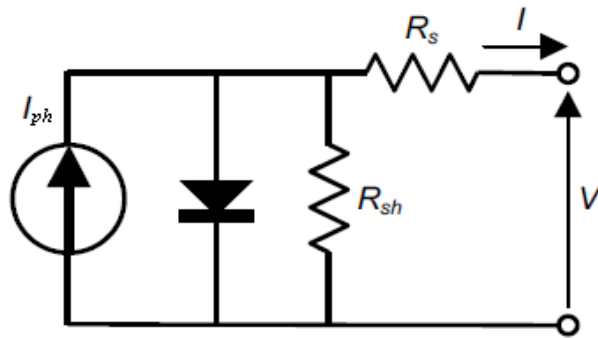
Ένα άλλο υλικό TCO είναι το οξείδιο ινδίου κασσίτερου (indium tin oxide, ITO). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του TCO και τα χαρακτηριστικά των πιο δημοφιλών υλικών.

Ιδιότητα	Απαιτήσεις	ITO	$\text{SnO}_2:\text{F}$ APCVD	$\text{ZnO}:\text{B}$ LPCVD	$\text{ZnO}:\text{Al}$ ψεκασμός
Οπτική διαπερατότητα (350-1000nm)	>90%	95%	90%	90%	90-95%
Ενεργειακό διάκενο [eV]	>3.5	3.7	4.3	3.4	≈3.45
Αντίσταση[Ω]	<10	3-5	6-15	6-15	4-15
Αντίσταση επαφής με το άμορφο p+ τμήμα	χαμηλή ωμική	χαμηλή ωμική	χαμηλή ωμική	σχηματίζει φράγμα	σχηματίζει φράγμα
Τραχύτητα	διαμορφωμένη επιφάνεια	αμελητέα	εξαιρετική	εξαιρετική	εξαιρετική (ύστερα από επεξεργασία)
Αντοχή στο πλάσμα	ανθεκτικό	χαμηλή	καλή	εξαιρετική	εξαιρετική

Πίνακας 3.2. Ιδιότητες, απαιτήσεις και χαρακτηριστικά υλικών TCO.

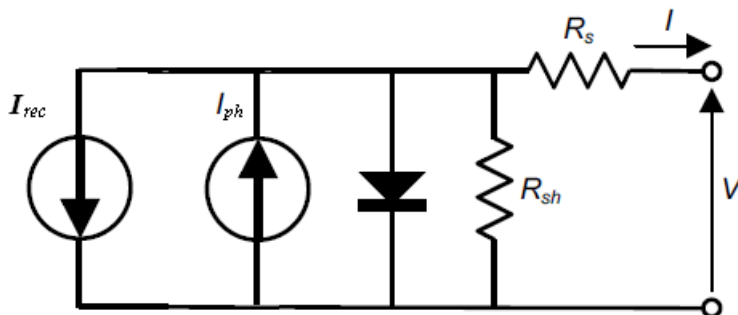
3.7.7. Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου $\alpha\text{-Si:H}$

Όπως έχει αναφερθεί στο 2^ο κεφάλαιο, το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου αποτελείται από μία πηγή ρεύματος, που αναπαριστά το φωτόρευμα, σε παραλληλία με μία δίοδο ακολουθούμενη από τις παρασιτικές αντιστάσεις R_s και R_{sh} .



Σχήμα 3.23. Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου.

Στα φ/β στοιχεία άμορφου πυριτίου η επανασύνδεση των φορέων είναι πολύ πιο έντονη από ότι στα κρυσταλλικά στοιχεία, εξαιτίας των μετέωρων δεσμών στο πλέγμα. Για αυτό το λόγο, στο ήδη υπάρχον ισοδύναμο κύκλωμα, προστίθεται ένας επιπλέον όρος απώλειας επανασύνδεσης ο οποίος μοντελοποιείται από μία πηγή ρεύματος που αντιτίθεται στο φωτόρευμα. Οι απώλειες επανασύνδεσης στο ενδογενές τμήμα εξαρτώνται από την συγκέντρωση των φορέων, συνεπώς από το παραγόμενο φωτόρευμα.



Σχήμα 3.24. Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου άμορφου πυριτίου.

Η επανασύνδεση στο ενδογενές τμήμα περιγράφεται από την εξίσωση

$$F(x) = \frac{n_f}{\tau_n} + \frac{p_f}{\tau_p}$$

Σχέση 3.2.

όπου τ_n και τ_p είναι ο χρόνος παγίδευσης των ηλεκτρονίων (n_f) και των οπών (p_f) στους μετέωρους δεσμούς. Με την υπόθεση ότι το ηλεκτρικό πεδίο $|E|$ είναι σταθερό κατά μήκος του i τμήματος και ότι οι φορείς δημιουργούνται με ομοιογένεια στο τμήμα αυτό, η σχέση 4.1. αυτή μπορεί να ολοκληρωθεί κατά μήκος όλου του τμήματος i από $x=0$ έως $x=d_i$ ώστε να υπολογιστεί το ολικό ρεύμα απώλειας λόγω επανασύνδεσης.

$$I_{rec} = \int_0^{d_i} F(x) dx$$

$$I_{rec} = I_{ph} \cdot \frac{d_i^2}{(\mu\tau)_{eff} \cdot [V_{bi} - (V - R_s \cdot I)]}$$

$$\mu\tau_{eff} = 2 \cdot \frac{\mu_n^0 \tau_n^0 \cdot \mu_p^0 \tau_p^0}{\mu_n^0 \tau_n^0 + \mu_p^0 \tau_p^0}$$

όπου d_i είναι το πάχος του τμήματος i , V_{bi} είναι το εσωτερικό δυναμικό το οποίο για το άμορφο πυρίτιο είναι $V_{bi}=0.9V$, V και I η τάση και το ρεύμα εξόδου αντίστοιχα, μ^0 και τ^0 η κινητικότητα και ο χρόνος παγίδευσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Ουσιαστικά, το ρεύμα απωλειών λόγω επανασύνδεσης δίνεται από το γινόμενο του παραγόμενου φωτορεύματος με το τετράγωνο του πάχους της ενδογενούς ζώνης προς το ενεργό μήκος ολίσθησης των φορέων:

$$I_{rec} = I_{ph} \cdot \frac{d_i^2}{(\mu\tau)_{eff} \cdot |E|}$$

Σχέση 3.3.

Έτσι το ρεύμα ενός στοιχείου άμορφου πυριτίου δίνεται από τη σχέση

$$I(V) = I_{ph} - I_{ph} \cdot \frac{d_i^2}{(\mu\tau)_{eff} \cdot [V_{bi} - (V - R_s \cdot I)]} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nkT/q}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

Σχέση 3.4.

3.8. Φ/β στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα φ/β στοιχεία άμορφου πυριτίου χάνουν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας λόγω του φαινομένου Staebler-Wronski περίπου το 30% της αρχικής τους απόδοσης. Η μείωση του πάχους της ενδογενούς ζώνης θα είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του εσωτερικού πεδίου, καθιστώντας το λιγότερο ευαίσθητο σε διαταραχές. Κάτι τέτοιο όμως θα είχε σαν αποτέλεσμα μειωμένη απορρόφηση ακτινοβολίας. Ένας τρόπος να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία είναι η χρήση φ/β στοιχείων που αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα επιμέρους υποστοιχείων τα οποία έχουν λεπτό ενδογενές τμήμα. Το συνολικό πάχος ενός τέτοιου στοιχείου είναι παρόμοιο με ένα φ/β στοιχείο μίας στρώσης, αλλά η επίδραση της ακτινοβολίας στην συνολική απόδοση είναι μικρότερη λόγω των λεπτότερων i τμημάτων.

Για την βέλτιστη λειτουργία στοιχείων πολλαπλών στρωμάτων πρέπει να ικανοποιούνται δύο συνθήκες:

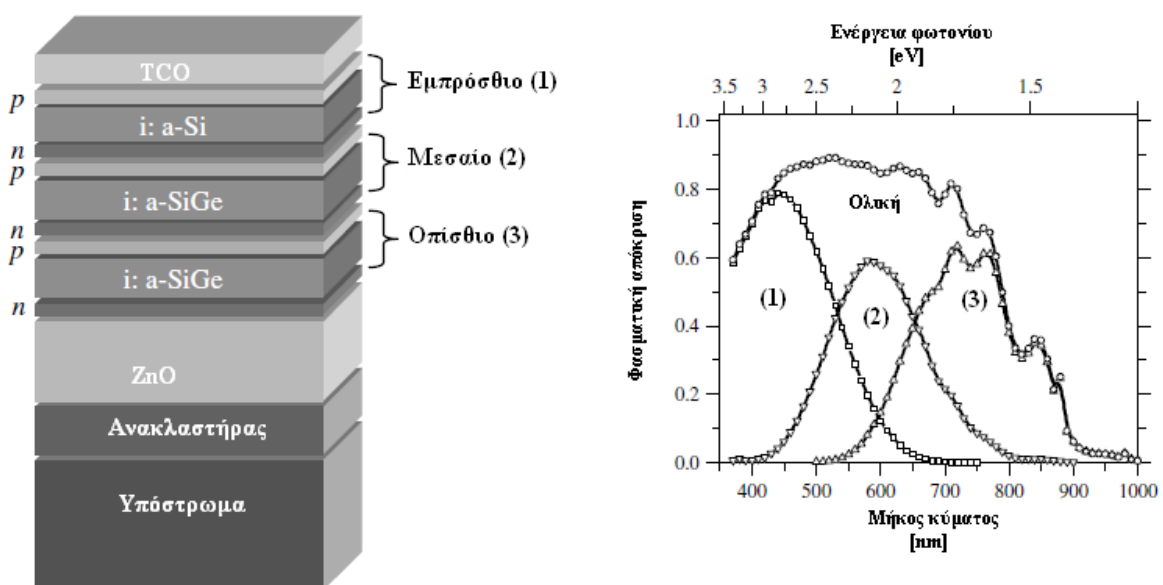
- το ρεύμα που παράγεται στο σημείο μέγιστης ισχύος να είναι ίδιο για όλα τα υποστοιχεία
- η εσωτερική αντίσταση σειράς μεταξύ των υποστοιχείων θα πρέπει να έχει χαμηλές οπτικές και ηλεκτρικές απώλειες.

Η ανάγκη για το ταίριασμα των ρευμάτων σχετίζεται με το γεγονός ότι τα υποστοιχεία που συνδέονται το ένα πάνω από το άλλο, λειτουργούν σαν πηγές ρεύματος συνδεδεμένες σε σειρά. Συνεπώς το ολικό ρεύμα θα καθορίζεται από το υποστοιχείο με την μικρότερη παραγωγή ρεύματος. Καθώς το ρεύμα σχετίζεται άμεσα με την απορρόφηση σε κάθε υποστοιχείο, άρα με το πάχος της ενδογενούς ζώνης, το ταίριασμα επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση του πάχους των i τμημάτων. Σε πολύπλοκα συστήματα πολλαπλών στρωμάτων χρησιμοποιείται η προσομοίωση σε υπολογιστή.

Το σημείο του στοιχείου όπου γίνεται η ένωση μεταξύ των δύο υποστοιχείων είναι στην ουσία μία δίοδος n-p συνδεδεμένη αντίθετα στη φορά λειτουργίας. Για την σωστή λειτουργία του στοιχείου απαιτείται ωμική επαφή μεταξύ των υποστοιχείων και όχι ανορθωτική, στην οποία οι φορείς θα επανασυνδέονται ώστε το στοιχείο να διαρρέεται από ρεύμα. Η επανασύνδεση των φορέων επιτυγχάνεται με χρήση μικροκρυσταλλικού πυριτίου σε ένα από τα δύο νοθευμένα τμήματα ή με την ενσωμάτωση μίας επιφάνειας TCO ανάμεσα στα τμήματα n, p. Όταν η επαφή n-p λειτουργεί σωστά ως ωμική επαφή, τότε η συνολική τάση ανοιχτοκύκλωσης του στοιχείου προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους τάσεων ανοιχτοκύκλωσης των υποστοιχείων.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των στοιχείων πολλαπλών στρωμάτων είναι ότι κάθε υποστοιχείο μπορεί να αντιστοιχηθεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος του ηλιακού φάσματος χρησιμοποιώντας στοιχεία διαφορετικού ενεργειακού διακένου. Έτσι το εμπρόσθιο υποστοιχείο απορροφά τα φωτόνια υψηλής ενέργειας, το επόμενο υποστοιχείο τα φωτόνια ελαφρώς μικρότερης ενέργειας και με την ίδια λογική τοποθετούνται τα υπόλοιπα υποστοιχεία.

Στα στοιχεία άμορφου πυριτίου, το ενεργειακό διάκενο μπορεί να διαμορφωθεί κατά βούληση, μεταβάλλοντας το ποσοστό των προσμίξεων, όπως στο a-SiGe:H. Έτσι μπορούν να κατασκευαστούν στοιχεία πολλαπλών ενώσεων όπου το εμπρόσθιο υποστοιχείο έχει ενεργειακό διάκενο 2eV, το αμέσως επόμενο υποστοιχείο 1.8eV, το τρίτο 1.4eV κ.ο.κ. οδηγώντας σε αποδοτικότερη και πληρέστερη απορρόφηση του φάσματος. Ένα παράδειγμα φ/β στοιχείου τριών στρώσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.24. Στο διάγραμμα της φασματικής απόκρισης είναι ξεκάθαρη η συμβολή του κάθε υποστοιχείου στην απορρόφηση και συλλογή του ολικού στοιχείου.



Σχήμα 3.25. Τυπική δομή φ/β στοιχείου τριών στρώσεων a-Si/a-SiGe/a-SiGe και η αντίστοιχη συμβολή στην φασματική απόκριση.

Σε βιομηχανική κλίμακα, η τεχνολογία του άμορφου πυριτίου χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε φ/β στοιχεία πολλαπλών στρώσεων καθότι παρά τον επιπλέον εξοπλισμό που απαιτείται (μηχανήματα επεξεργασίας υλικών, συστήματα προστασίας έναντι του δηλητηριώδους αερίου GeH₄) το κέρδος στην απόδοση και στη σταθερότητα είναι σημαντικά. Τα πιο γνωστά υλικά είναι το a-Si:H, το a-SiC:H, το a-SiGe:H, το μικροκρυσταλλικό και το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι αρχικές και οι σταθερές αποδόσεις, ύστερα από την μείωση λόγω επίδρασης της ακτινοβολίας, στοιχείων πολλαπλών στρώσεων διαφόρων κατασκευαστών

Δομή	Αρχική απόδοση	Σταθερή απόδοση	Κατασκευαστής
<i>a-Si/a-SiGe/a-SiGe</i>	15.2	13.0	<i>United Solar</i>
<i>a-Si/a-SiGe/a-SiGe</i>	11.7	11.0	<i>Fuji</i>
<i>a-Si/a-SiGe/a-SiGe</i>	12.5	10.7	<i>U.Toledo</i>
<i>a-Si/a-SiGe/a-SiGe</i>	-	10.2	<i>Sharp</i>
<i>a-Si/a-SiGe</i>	11.6	10.6	<i>BP Solar</i>
<i>a-Si/a-SiGe</i>	-	10.6	<i>Sanyo</i>
<i>a-Si/μc-Si</i>	-	12.0	<i>U.Neuchatel</i>
<i>a-Si/μc-Si</i>	13.0	11.5	<i>Canon</i>
<i>a-Si/poly-Si/poly-Si</i>	12.3	11.5	<i>Kaneka</i>
<i>a-Si/a-SiGe/μc-Si</i>	11.4	10.7	<i>ECD</i>
<i>a-Si/a-SiGe</i>	-	12.4	<i>United Solar</i>

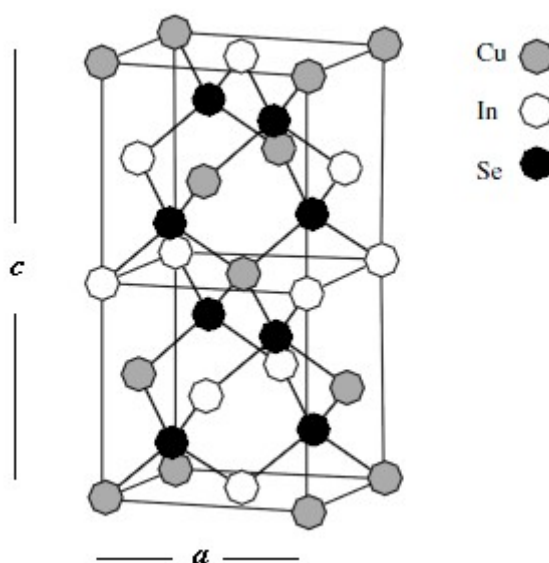
Πίνακας 3.3. Αποδόσεις φ/β στοιχείων πολλαπλών ενώσεων από διάφορους κατασκευαστές.

Φωτοβολταϊκά στοιχεία CIS, CIGS

4.1. Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός $CuInSe_2$, ο δισεληνογαλλιούχος χαλκός $CuGaSe_2$ και η ένωση $Cu(InGa)Se_2$

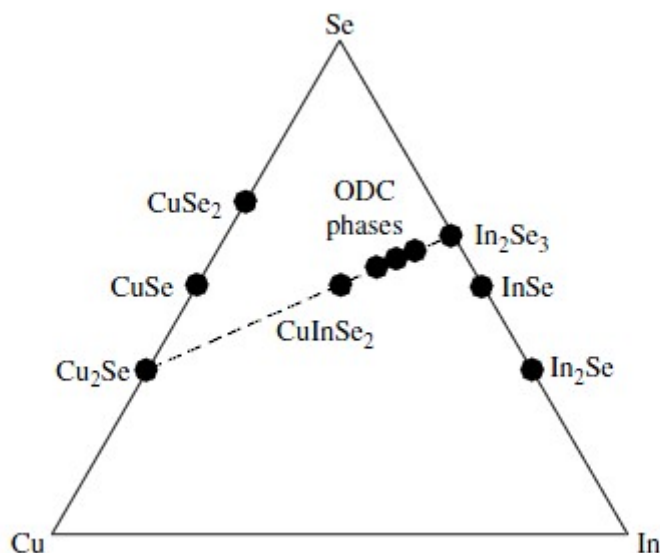
4.1.1. Η δομή

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία CIS/CIGS ανήκουν στην κατηγορία των thin film και το ενεργό τους τμήμα αποτελείται κυρίως από δύο τριαδικά κράματα. Τον δισεληνοϊνδιούχο χαλκό και τον δισεληνογαλλιούχο χαλκό. Αμφότεροι έχουν παρόμοια δομή. Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός $CuInSe_2$ έχει την πλεγματική δομή του χαλκοπυρίτη. Πρόκειται για μία κρυσταλλική δομή παρόμοια με του σφαλερίτη με τη διαφορά ότι τα στοιχεία της II ομάδας, αντικαθίστανται με τα στοιχεία της I (Cu) και III ομάδας (In ή Ga). Κάθε άτομο χαλκού και ινδίου ενώνεται με 2 ομοιοπολικούς δεσμούς με 2 άτομα σελήνιου ενώ κάθε άτομο σελήνιου δημιουργεί 2 δεσμούς με ένα άτομο Cu και με ένα άτομο In. Έτσι προκύπτει η τετράγωνη μορφή του μοναδιαίου στοιχείου του πλέγματος στην οποία ο λόγος των πλεγματικών σταθερών c/a είναι κοντά στην τιμή 2. Η απόκλιση από το $c/a=2$ ονομάζεται τετράγωνη παραμόρφωση και προκύπτει από τις διαφορετικές δυνάμεις των δεσμών Cu-Se και In-Se.



Σχήμα 4.1. Η δομή του δισεληνοϊνδιούχου χαλκού.

Οι πιθανές φάσεις του συστήματος Cu-In-Se διακρίνονται στο τριαδικό διάγραμμα φάσης στο σχήμα 5.2. Τα φ/β στοιχεία Cu-In-Se που παράγονται σε περιβάλλον με περίσσεια σεληνίου, δηλαδή υπό κανονικές συνθήκες για παραγωγή thin film, έχουν περιεκτικότητα στοιχείων που βρίσκεται κοντά ή πάνω στην γραμμή που συνδέει το Cu_2Se και το In_2Se_3 . Κοντά στην επιθυμητή κατάσταση CuInSe_2 βρίσκονται και διάφορες άλλες φάσεις, οι ενώσεις διατεταγμένων ατελειών (ordered defect compound, ODC), οι οποίες έχουν πλεγματική δομή παρόμοια με αυτή του χαλκοπυρίτη όπου όμως εμφανίζονται και διατεταγμένες ενδογενείς ατέλειες.



Σχήμα 4.2. Τριαδικό διάγραμμα φάσης του Cu-In-Se συστήματος.

Το CuInSe_2 μπορεί να σχηματίσει κράμα σε οποιαδήποτε αναλογία με το CuGaSe_2 σχηματίζοντας Cu(InGa)Se_2 . Τα στοιχεία υψηλής απόδοσης έχουν λόγο $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ 0.2 με 0.3.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του Cu(InGa)Se_2 είναι η μεγάλη ανοχή του σε διαφορές στη σύσταση χωρίς σημαντικές αλλαγές των οπτικοηλεκτρονικών του ιδιοτήτων. Υψηλές αποδόσεις μπορούν να επιτευχθούν με αναλογία $\text{Cu}/(\text{In}+\text{Ga})$ από 0.7 έως 1.0. Η ιδιότητα αυτή σχετίζεται με την πολύ μικρή ενέργεια που απαιτείται για τον σχηματισμό διάφορων ατελειών καθώς και με την ηλεκτρική τους ουδετερότητα, όπως το σύμπλεγμα ατέλειας $2\text{V}_{\text{Cu}} + \text{In}_{\text{Cu}}$ όπου λείπουν δύο άτομα χαλκού και ένα άτομο ίνδιου λαμβάνει την πλεγματική θέση ενός ατόμου χαλκού. Τέτοια συμπλέγματα ατελειών δημιουργούν συνθέσεις φτωχές σε χαλκό και πλούσιες σε ίνδιο, χωρίς σημαντικές όμως επιπτώσεις στην φωτοβολταϊκή μετατροπή.

Το εύρος της φάσης όπου υπάρχει μόνο ο χαλκοπυρίτης, κατά την παραγωγή, αυξάνεται με την προσθήκη Ga ή Na. Αυτό οφείλεται στο ότι ο σχηματισμός της ατέλειας Ga_{Cu} είναι λιγότερο προτιμητέος ενεργειακά σε σχέση με την ατέλεια In_{Cu} οδηγώντας έτσι σε μικρότερη τάση εμφάνισης ODC φάσεων. Παρόμοια είναι και η επίδραση του νατρίου στο πλέγμα που τείνει να καλύπτει τις κενές θέσεις χαλκού, μειώνοντας τον σχηματισμό τέτοιων φάσεων.

4.1.2. Οπτικές ιδιότητες

Ο συντελεστής απορρόφησης για το CuInSe_2 είναι μεγαλύτερος από $10^5/\text{cm}$ για φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη των 1.4 eV. Σε αρκετές μελέτες έχει υιοθετηθεί η μοντελοποίηση του συντελεστή απορρόφησης από τη σχέση

$$\alpha = A \cdot (E - E_g)^2 / E$$

Σχέση 4.1.

όπως ισχύει για ημιαγωγούς με άμεσο ενεργειακό διάκενο. Η σταθερά αναλογίας A εξαρτάται από την πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει μία τιμή ενεργειακού διακενου ίση με $E_g = 1.02 \pm 0.02 \text{ eV}$.

Για διαφορετικές περιεκτικότητες στοιχείων το ενεργειακό διάκενο του $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ προκύπτει

$$E_g = 1.010 + 0.626 \cdot x - 0.167 \cdot x \cdot (1 - x)$$

Σχέση 4.2.

4.1.3. Ηλεκτρικές ιδιότητες

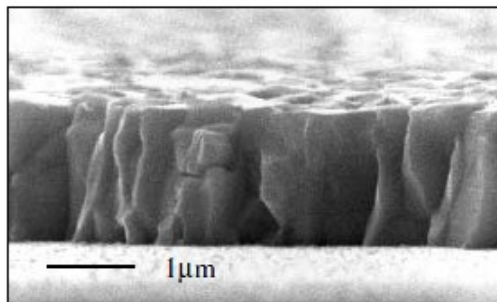
Το $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ έχει την ιδιότητα να μην νοθεύεται εύκολα από εξωγενείς παράγοντες. Αντιθέτως, η νόθευση ελέγχεται με τις ενδογενείς ατέλειες του υλικού. Δείγματα τύπου p κατασκευάζονται αν το υλικό είναι φτωχό σε χαλκό και θερμανθεί σε υψηλή πίεση ατμών σεληνίου, ενώ υλικά με περίσσεια χαλκού και έλλειψη σεληνίου, τείνουν να είναι τύπου n. Έτσι η κενή πλεγματική θέση σεληνίου V_{Se} θεωρείται ο κύριος δότης σε υλικά τύπου n ενώ η κενή πλεγματική θέση χαλκού V_{Cu} ο κύριος αποδέκτης σε υλικά τύπου p.

Η ενέργεια που απαιτείται για τον σχηματισμό ορισμένων ατελειών στο πλέγμα όπως της ατέλειας V_{Cu} είναι σε κάποιες περιπτώσεις αρνητική, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και σε συνθήκες ισορροπίας, εμφανίζεται μεγάλη συγκέντρωση ατελειών. Οι σημαντικότερες ενδογενείς ατέλειες στο πλέγμα του CuInSe_2 είναι :

- Η κενή πλεγματική θέση χαλκού V_{Cu} με ενεργειακή θέση 0.03eV πάνω από τη ζώνη σθένους που λειτουργεί ως αποδέκτης.
- Η κάλυψη θέσης του πλέγματος του χαλκού από άτομο ίνδιου In_{Cu} με ενεργειακή θέση 0.25eV κάτω από τη ζώνη αγωγιμότητας λειτουργώντας ως αντισταθμισμένος δότης.
- Η κενή πλεγματική θέση χαλκού σεληνίου V_{Se} που λειτουργεί ως αντισταθμισμένος δότης.
- Η κάλυψη θέσης του πλέγματος του ίνδιου από άτομο χαλκού Cu_{In} με ενεργειακή θέση 0.29eV πάνω από τη ζώνη σθένους λειτουργώντας ως κέντρο επανασύνδεσης.

4.1.4. Η επιφάνεια και τα όρια των κόκκων

Η μορφολογία της επιφάνειας του CuInSe_2 παρατηρείται με τη μέθοδο SEM (scanning electron microscopy – ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης) ή με τη μέθοδο TEM (transmission electron microscopy – ηλεκτρονική μικροσκοπία διέλευσης). Μία τυπική απεικόνιση της επιφάνειας με τη μέθοδο SEM παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.3. Απεικόνιση επιφάνειας υλικού με τη μέθοδο SEM.

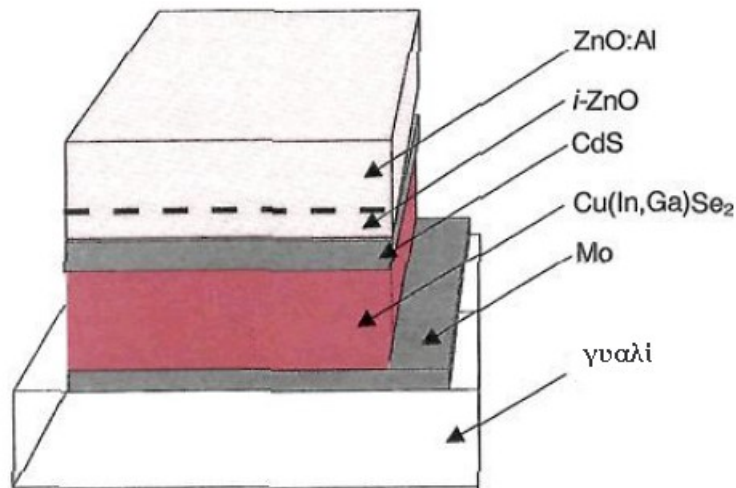
Γενικά, οι στρώσεις υλικού που χρησιμοποιούνται σε φ/β στοιχεία CIS/CIGS έχουν διάμετρο κόκκου της τάξης του 1 μm όμως το μέγεθος καθώς και η μορφολογία ποικίλουν ανάλογα με τη μέθοδο και τις συνθήκες παραγωγής.

Με τη βοήθεια της μεθόδου XPS (X-ray photoelectron spectroscopy – φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων) έχει παρατηρηθεί ότι οι ελεύθερες επιφάνειες των στρωμάτων CuInSe_2 με σύσταση χαμηλής περιεκτικότητας χαλκού εμφανίζουν δομή αρκετά κοντινή σε αυτή του CuIn_3Se_5 που αντιστοιχεί σε μία από τις φάσεις ODC. Ουσιαστικά, η σύσταση μεταβάλλεται από τον όγκο έως την επιφάνεια των στρωμάτων. Η αλλαγή αυτή οφείλεται στην μεταφορά του χαλκού από τα επιφανειακά στρώματα προς τον όγκο, απογυμνώνοντας την επιφάνεια από χαλκό. Η μεταφορά αυτή σταματάει όταν η σύσταση είναι αυτή του CuIn_3Se_5 καθώς περαιτέρω εξάντληση απαιτεί μία δομική αλλαγή του υλικού.

Η αποσύνθεση αυτή σταματάει όταν το υλικό εκτεθεί σε ατμοσφαιρική πίεση στους 200°C και για κάποιο χρονικό διάστημα (συνήθως αρκετές ώρες) καθώς σχηματίζονται οξειδία στην επιφάνειά του. Η οξείδωση της επιφάνειας ενισχύεται με την παρουσία του νατρίου όπου εμφανίζονται ενώσεις όπως In_2O_3 , Ga_2O_3 , SeO_x και Na_2CO_3 . Το κύριο φαινόμενο στο οποίο σχετίζεται το οξυγόνο είναι η παθητικοποίηση των κενών πλεγματικών θέσεων σελήνιου στην επιφάνεια των κόκκων που λειτουργούν ως κέντρα επανασύνδεσης. Η ευεργετική ιδιότητα του νατρίου στην απόδοση των φ/β στοιχείων δεν έχει εξηγηθεί πλήρως, όμως η πιθανότερη εξήγηση είναι ότι το νάτριο λειτουργεί ως καταλύτης στην οξείδωση, μέσω της διάσπασης του μοριακού οξυγόνου σε ατομικό, καθιστώντας την παθητικοποίηση του V_{Se} πιο αποδοτική.

4.2. Η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου CIS

Η δομή που έχει επικρατήσει για την κατασκευή φ/β στοιχείων CIS, έχει σαν βασικό στοιχείο την ετεροένωση $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$. Περιλαμβάνει μία στρώση μολυβδένιου (Mo) πάχους συνήθως 1 μm η οποία εναποτίθεται σε ένα υπόστρωμα γυαλιού ασβεστούχου νατρίου και λειτουργεί ως ο οπίσθιος ακροδέκτης του φ/β στοιχείου. Το $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ εναποτίθεται πάνω στο στρώμα Mo και είναι ο απορροφητής του στοιχείου. Το τμήμα αυτό έχει πάχος 1-2 μm. Η ετεροένωση ολοκληρώνεται με την εναπόθεση του CdS (συνήθως πάχους 50 nm) μέσω της μεθόδου της χημικής εμβάπτισης και με τον ψεκασμό ενός ενδογενούς τμήματος i-ZnO (συνήθως πάχους 50-70 nm) και ενός ισχυρά νοθευμένου τμήματος ZnO. Καθώς το ZnO έχει ενεργειακό διάκενο της τάξης του 3.2 eV είναι αδιαφανές για το μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού φάσματος και για αυτό θεωρείται το “παράθυρο” του φ/β στοιχείου.



Σχήμα 4.4. Δομή του φ/β στοιχείου CIS.

Η παραπάνω δομή έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί αλλαγές σε παλιότερες προτάσεις.

- Η ποιότητα του στοιχείου έχει βελτιωθεί αρκετά μέσω του μηχανισμού κρυσταλλοποίησης που προκαλεί η παρουσία του Cu_3Se .
- Το γυάλινο υπόστρωμα παλιότερα δεν περιείχε νάτριο. Η μεταβολή προς γυάλινο υπόστρωμα με ίχνη νατρίου, οδήγησε σε σημαντική αύξηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των στοιχείων καθώς και σε μεγαλύτερη ανοχή κατά την επεξεργασία. Αρχικά είχε θεωρηθεί ότι η βελτίωση αυτή οφειλόταν στο καλύτερο ταίριασμα των συντελεστών θερμικής διαστολής (thermal expansion coefficient) των στρωμάτων, αλλά το νάτριο, το οποίο διαχεόταν μέσω του τμήματος μολυβδενίου, συνεισέφερε περισσότερο στην ανάπτυξη του απορροφητή και στις δομικές και ηλεκτρικές του ιδιότητες.
- Η μερική αντικατάσταση του ίνδιου με γάλλιο συνέβαλλε στην αύξηση του ενεργειακού διάκενου του απορροφητή από 1.04eV σε 1.1-1.2eV. Το πλεονέκτημα της εισαγωγής 20-30% γαλλίου δεν είναι μόνο το καλύτερο ταίριασμα του ενεργειακού διάκενου με το ηλιακό φάσμα αλλά και η βελτιωμένη ποιότητα του στοιχείου σε σχέση με το καθαρό CuInSe_2 .

4.3. Τεχνικές εναπόθεσης του οπίσθιου ακροδέκτη και του απορροφητή

4.3.1. Το υπόστρωμα

Το γυαλί ασβεστούχου νατρίου, το οποίο χρησιμοποιείται και στα παράθυρα, είναι το πιο δημοφιλές υλικό υποστρώματος για στοιχεία Cu(InGa)Se_2 εξαιτίας της μεγάλης διαθεσιμότητάς του σε χαμηλό κόστος. Η εναπόθεση του απορροφητή απαιτεί θερμοκρασία υποστρώματος T_{ss} τουλάχιστον 350°C ενώ τα στοιχεία με τις μεγαλύτερες αποδόσεις έχουν εναποτεθεί στη μέγιστη θερμοκρασία των 550°C στην οποία το υπόστρωμα γυαλιού μπορεί να αντέξει χωρίς να μαλακώσει ιδιαίτερα. Το γυαλί είναι ηλεκτρικός μονωτής και επιτρέπει την μονολιθική διασύνδεση των στοιχείων όπως περιγράφηκε και στα στοιχεία άμορφου πυριτίου.

Το γυαλί ασβεστούχου νατρίου έχει συντελεστή θερμικής διαστολής ίσο με $9 \times 10^{-6}/\text{K}$ ο οποίος είναι αρκετά κοντά στον αντίστοιχο των στρωμάτων Cu(InGa)Se_2 . Η σύνθεση του γυαλιού συνήθως περιέχει διάφορα οξέα όπως Na_2O , K_2O και CaO . Αυτά παρέχουν τις απαραίτητες ατέλειες που διαχέονται στα στρώματα Mo και Cu(InGa)Se_2 κατά την επεξεργασία. Παρ' όλα αυτά, συχνά προτιμάται μία διαδικασία που επιτρέπει την πιο ελεγχόμενη παροχή νατρίου. Αυτό μπορεί

να επιτευχθεί φράζοντας την διάχυση νατρίου από το υπόστρωμα, με ενώσεις όπως το SiO_x ή το Al_2O_3 και εναποθέτοντας ένα στρώμα ένωσης νατρίου στο τμήμα Mo. Εξαιτίας των διάφορων άλλων ατελειών που μπορεί να έχει το γυάλινο υπόστρωμα ασβεστούχου νατρίου, έχουν γίνει πειραματισμοί και με άλλους τύπους υποστρώματος όμως το κόστος καθώς και η μεγάλη απόκλιση στους θερμικούς συντελεστές επέκτασης ήταν απαγορευτικοί παράγοντες για την ευρεία χρήση τους.

4.3.2. Το στρώμα Mo

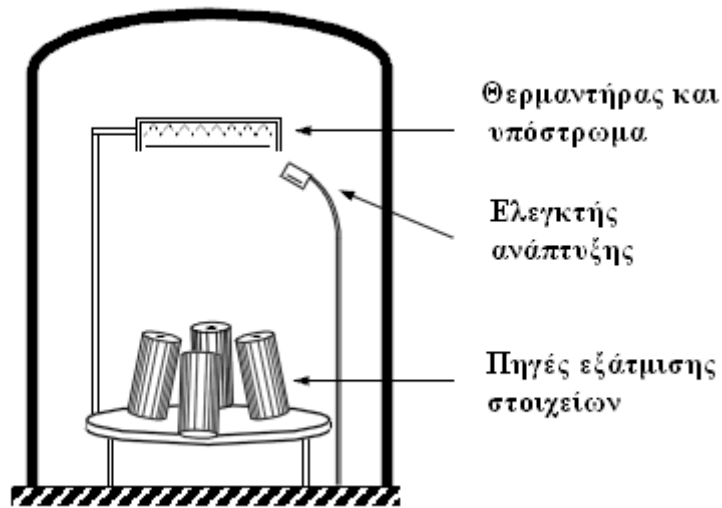
Το στρώμα Mo, συνήθως εναποτίθεται με τεχνικές dc ψεκασμού. Το πάχος του, καθορίζεται από τις απαιτήσεις σε αντίσταση του κάθε φ/β στοιχείου. Οι ιδιότητες του στρώματος Mo και η επιλογή του γυάλινου υποστρώματος είναι πρωταρχικής σημασίας για την ποιότητα του φ/β στοιχείου, εξαιτίας του ρόλου του Na, το οποίο διαχέεται από το γυαλί μέσω του στρώματος Mo προς το αναπτυσσόμενο τμήμα CuInSe_2 . Σε μερικές τεχνικές παραγωγής, χρησιμοποιούνται στρώματα φράγματος όπως SiN_x , SiO_2 ή Cr μεταξύ του γυάλινου υποστρώματος και του στρώματος Mo ώστε να αποφευχθεί η διάχυση του Na προς άλλη κατεύθυνση. Πλέον εναποτίθενται ενώσεις όπως NaF, Na_2Se ή NaS πριν την εναπόθεση του απορροφητή ώστε η διάχυση του Na να είναι ελεγχόμενη και ομογενής. Με τη χρήση αυτών των ενώσεων είναι επιτρεπτή και η χρήση άλλου τύπου υποστρώματος, χωρίς σημαντική μεταβολή στην απόδοση των στοιχείων, δεδομένου ότι παρέχεται ικανοποιητική ποσότητα νατρίου.

Κατά την εναπόθεση του απορροφητή, σχηματίζεται ένα στρώμα MoSe_2 στην επιφάνεια του στρώματος Mo. Το στρώμα αυτό είναι ημιαγωγός με αγωγιμότητα τύπου p και με ενεργειακό διάκενο 1.3eV. Εξαιτίας του μεγαλύτερου ενεργειακού διακενου σε σχέση με τα συνήθη στρώματα Cu(InGa)Se_2 , το τμήμα αυτό αποτελεί έναν ηλεκτρονικό καθρέφτη για τα φωτοδιεγερμένα ηλεκτρόνια ενώ παράλληλα λειτουργεί και ως επαφή χαμηλής αντίστασης για τις οπές.

4.3.3. Τεχνικές εναπόθεσης του απορροφητή

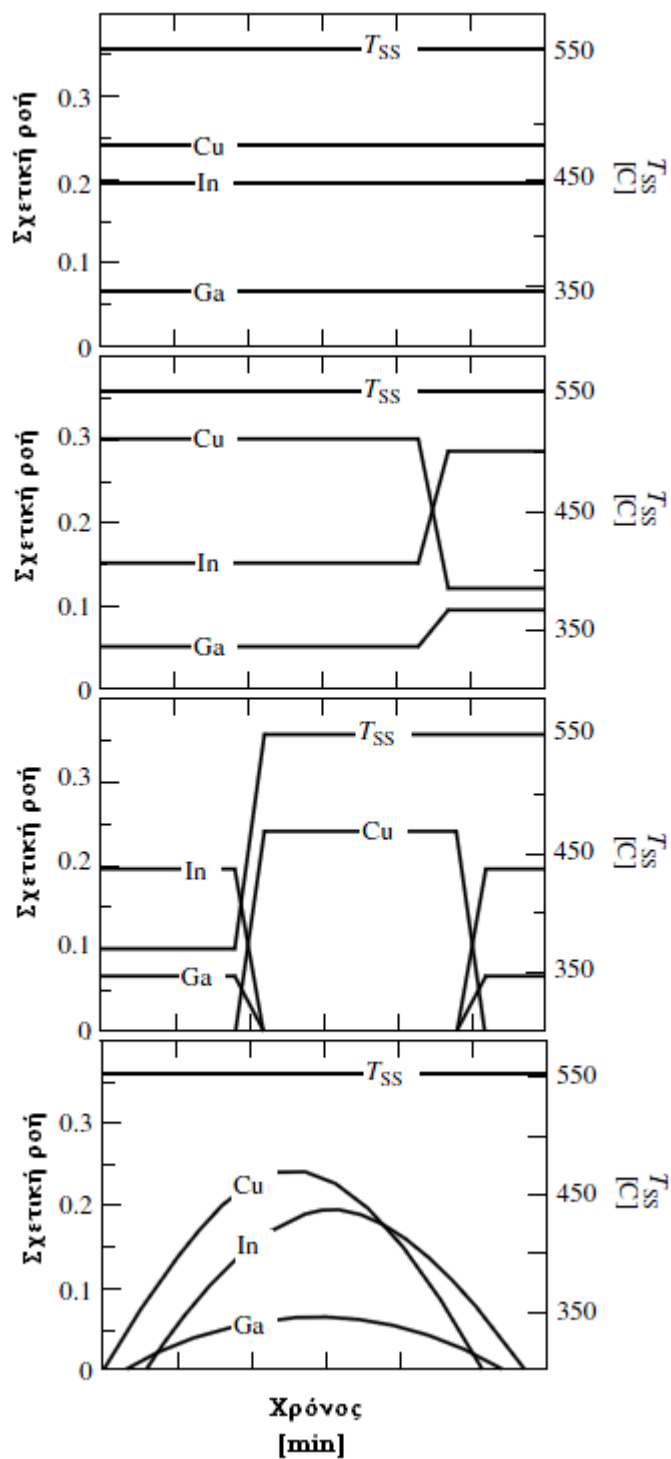
4.3.3.1. Η τεχνική της θερμικής εξάτμισης

Τα φ/β στοιχεία με τις μεγαλύτερες αποδόσεις έχουν σημειωθεί για στοιχεία που παράχθηκαν με τη μέθοδο της θερμικής εξάτμισης των επιμέρους συστατικών. Η διαδικασία περιλαμβάνει ένα θερμαινόμενο υπόστρωμα στο περιβάλλον του οποίου εγχέονται τα στοιχεία από πηγές τύπου Knudsen. Η θερμοκρασία εξάτμισης του κάθε στοιχείου είναι 1300 με 1400°C για τον χαλκό, 1000 με 1100°C για το ίνδιο, 1150 με 1250°C για το γάλλιο και 300 με 350°C για το σελήνιο. Οι συντελεστές προσκόλλησης (sticking coefficients) για τα Cu, In και Ga είναι αρκετά υψηλοί οπότε η σύσταση του στρώματος καθώς και ο ρυθμός ανάπτυξης καθορίζονται από τον ρυθμό έγχυσης της κάθε πηγής. Η σχετική συγκέντρωση του χαλκού έναντι αυτής του ίδιου και του γαλλίου καθορίζουν την σύσταση του στρώματος όπως περιγράφηκε και στο σχήμα 5.2. Η σχετική συγκέντρωση του ίδιου έναντι αυτής του γαλλίου, καθορίζει το ενεργειακό διάκενο του απορροφητή. Το σελήνιο έχει μεγαλύτερη πίεση σε μορφή ατμών και μικρότερο συντελεστή προσκόλλησης, και για αυτό το λόγο η ποσότητα που εξατμίζεται είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται για το στρώμα. Σε περίπτωση που εξατμιστεί ανεπαρκής ποσότητα Se τότε εμφανίζονται κενές πλεγματικές θέσεις ίδιου και γαλλίου στη μορφή In_2Se ή Ga_2Se .



Σχήμα 4.5. Αναπαράσταση μεθόδου εναπόθεσης με εξάτμιση στοιχείων.

Φ/β στοιχεία με απόδοση μεγαλύτερη του 16% έχουν παραχθεί με τη μέθοδο της συνεξάτμισης (coevaporation) όπου η ροή των ατμών του κάθε στοιχείου δεν έχει απαραίτητα την ίδια τιμή καθ' όλη τη διάρκεια της εναπόθεσης. Στο σχήμα 4.6. παρουσιάζονται οι πιο γνωστές παραλλαγές της μεθόδου όσον αφορά τη ροή. Σε κάθε περίπτωση η επιθυμητή σύσταση είναι ελλειπής σε χαλκό με λόγο $Cu/(In+Ga)=0.8-0.9$. Ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης του στρώματος ποικίλει από 10 έως 90 λεπτά, ανάλογα με τους ρυθμούς έγχυσης από τις πηγές. Έτσι για ένα στρώμα πάχους 2μm οι συνήθεις ρυθμοί εναπόθεσης είναι 20 με 200nm/min.



Σχήμα 4.6. Σχετικές ροές των Cu, In, Ga και θερμοκρασία υποστρώματος για διάφορες μεθόδους συνεξάτμισης. Σε κάθε περίπτωση η ροή σελήνιου είναι σταθερή.

Η πρώτη μέθοδος είναι αυτή στην οποία όλες οι ροές είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως οι ροές μεταβάλλονται, εφαρμόζοντας την λεγόμενη μέθοδο Boeing, στην οποία ο όγκος του στρώματος αναπτύσσεται με περίσσεια χαλκού ώστε να περιέχει και μία φάση Cu_xSe μαζί με το $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$. Ύστερα αυξάνονται οι ροές του ίνδιου και του γάλλιου ώστε το τελικό στρώμα να έχει την επιθυμητή σύσταση ελλείμματος χαλκού. Μία παραλλαγή της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται στο δεύτερο διάγραμμα του σχήματος 4.6. στην οποία επιτυγχάνεται η εναπόθεση στρωμάτων $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ σε υποστρώματα που δεν

περιέχουν νάτριο σε θερμοκρασία υποστρώματος $T_{ss}=450^{\circ}\text{C}$ δημιουργώντας στρώματα με μεγάλο μέγεθος κόκκων και αυξημένη απόδοση.

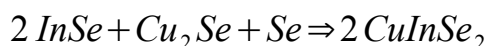
Στην τρίτη μέθοδο του σχήματος 4.6. το ίνδιο και το γάλλιο εναποτίθενται πριν την εναπόθεση του χαλκού. Έτσι δημιουργείται $(\text{InGa})_x\text{Se}_y$ και ακολουθεί η εναπόθεση του χαλκού και του σεληνίου έως ότου το στρώμα αποκτήσει την επιθυμητή σύσταση. Μία παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η διαρκής ροή χαλκού μέχρι το στρώμα να αποκτήσει περίσσεια χαλκού. Ένα τρίτο βήμα προστίθεται στην διαδικασία κατά το οποίο εναποτίθεται πάλι ίνδιο και γάλλιο, παρουσία περίσσειας σεληνίου, ώστε το στρώμα να επιστρέψει σε σύσταση έλλειψης χαλκού. Τα μέταλλα διαχέονται και σχηματίζουν την επιθυμητή μορφή του τριαδικού χαλκοπυρίτη. Με τη μέθοδο αυτή έχουν παραχθεί τα φ/β στοιχεία CIS/CIGS με την μεγαλύτερη απόδοση.

Στην τελευταία μέθοδο του σχήματος 4.6. η ροή του κάθε συστατικού προκύπτει από την μετακίνηση του υποστρώματος πάνω από τις πηγές των Cu, In, Ga .

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου συνεξάτμισης των στοιχείων για την εναπόθεση στρωμάτων $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ είναι η ευχέρεια επιλογής της σύστασης του στρώματος και του ενεργειακού του διάκενου.

4.3.3.2. Η τεχνική της σεληνοποίησης

Μία άλλη τεχνική εναπόθεσης $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ είναι η επονομαζόμενη τεχνική των δύο βημάτων ή σεληνοποίηση. Η κεντρική ιδέα είναι ο ψεκασμός στρωμάτων που αποτελούνται από χαλκό και ίνδιο τα οποία αντιδρούν με H_2Se ή με ατμούς σεληνίου στους 400 με 500°C για 30 με 60 λεπτά ώστε να σχηματιστεί CuInSe_2 . Το πλεονέκτημα της αντίδρασης αυτής είναι ότι μπορεί να γίνει σε ατμοσφαιρική πίεση και να ελεγχθεί πλήρως, όμως η χρήση του δηλητηριώδους αερίου H_2Se απαιτεί αυστηρά προληπτικά μέτρα. Τα αρχικά στρώματα χαλκού και ίνδιου αντιδρούν με το σεληνιο παράγοντας διάφορες δυαδικές ενώσεις και το CuInSe_2 προκύπτει από την παρακάτω αντίδραση



Η προσθήκη γάλλιου δεν οδηγεί σε ομοιόμορφη αύξηση του ενεργειακού διάκενου, αλλά αντιθέτως το γάλλιο τείνει να συσσωρεύεται κοντά στο τμήμα Mo δίνοντας έτσι δομή $\text{CuInSe}_2/\text{CuGaSe}_2$. Αυτή η δομή λειτουργεί σαν στρώμα CuInSe_2 έχοντας μειωμένη τάση λειτουργίας εξαιτίας του μειωμένου ενεργειακού διάκενου. Παρ' όλα αυτά, η συσσώρευση του γάλλιου αποφέρει μεγαλύτερη προσκόλληση του στρώματος CuInSe_2 στο τμήμα Mo προσδίδοντας καλύτερη απόδοση πιθανότατα εξαιτίας των μειωμένων ατελειών. Η διάχυση του ίνδιου και του γάλλιου για ομοιόμορφη σύσταση, μπορεί να επιτευχθεί με τη θέρμανση για μία ώρα στους 600°C . Επειδή αυτό το βήμα όμως δεν είναι πρακτικό από παραγωγικής άποψης, η βελτίωση του ενεργειακού διάκενου, άρα και της τάσης λειτουργίας, γίνεται με την εισαγωγή θείου S κοντά στην εμπρόσθια επιφάνεια σχηματίζοντας έτσι $\text{Cu}(\text{InGa})(\text{SeS})_2$.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η χρήση πιο γνωστών και ήδη εφαρμοσμένων τεχνικών για την εναπόθεση των μετάλλων και της θέρμανσης. Η σύσταση και η ομοιομορφία ελέγχονται με την εναπόθεση του αρχικού στρώματος χαλκού και ίνδιου.

4.4. Σχηματισμός της ετεροένωσης

4.4.1. Εναπόθεση από χημικό λουτρό

Το βασικό συστατικό στα φ/β στοιχεία CIS/CIGS είναι η ετεροένωση $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$. Η εναπόθεση του CdS στον απορροφητή γίνεται με τη μέθοδο της εναπόθεσης από χημικό λουτρό (Chemical Bath Deposition, CBD). Η μέθοδος αυτή είναι το αντίστοιχο στην υγρή φάση της

μεθόδου χημικής εναπόθεσης ατμών.

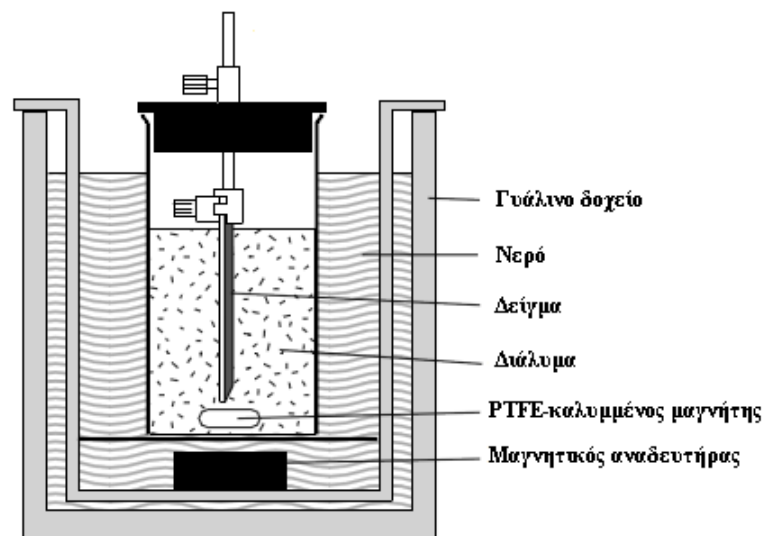
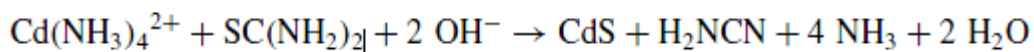
Η εναπόθεση των στρωμάτων CdS στο Cu(InGa)Se₂ γίνεται σε ένα υγρό αλκαλικό διάλυμα (pH>9) με τα παρακάτω συστατικά:

- ένα καδμιούχο άλας όπως CdSO₄, CdCl₂, CdI₂, Cd(CH₃COO)₂
- NH₃ (αμμωνία)
- μία θειούχα ένωση, συνηθέστερα SC(NH₂)₂ (θειουρία)

Οι συγκεντρώσεις των διάφορων συστατικών ποικίλουν. Ένα παράδειγμα συγκεντρώσεων για την εναπόθεση CdS είναι

- 1.4 x10⁻³M CdI₂ ή CdSO₄
- 1M NH₃
- 0.14M SC(NH₂)₂

Το στρώμα του Cu(InGa)Se₂ βυθίζεται στο υγρό διάλυμα και η εναπόθεση λαμβάνει χώρα μέσα σε λίγα λεπτά σε θερμοκρασία 60 με 80°C. Η βύθιση στο διάλυμα μπορεί να γίνει σε θερμοκρασία δωματίου και να ακολουθήσει η θέρμανση ή εναλλακτικά με προθέρμανση του διαλύματος. Η αντίδραση που συμβαίνει δίνεται από τον παρακάτω τύπο



Σχήμα 4.7. Αναπαράσταση της μεθόδου CBD.

Η ανάπτυξη στρωμάτων CdS με τη μέθοδο CBD προκύπτει από την αντίδραση ιόντων ή από την ομαδοποίηση των κolloειδών σωματιδίων. Ανάλογα με τις συνθήκες της βύθισης το πλέγμα του προκύπτοντος CdS μπορεί να είναι κυβικό, εξαγωνικό ή ένα μείγμα των δύο. Για την παραγωγή φ/β στοιχείων CIS/CIGS τα λεπτά στρώματα CdS αναπτύσσονται με αντιδράσεις ιόντων οδηγώντας σε πυκνά ομογενή τμήματα με μεικτή δομή ή με κυριαρχούσα την εξαγωνική δομή. Τα στρώματα αυτά έχουν κόκκους μεγέθους της τάξης των 10nm.

Συχνά παρατηρούνται αποκλίσεις στη δομή του CdS που παράγεται. Τα στρώματα CdS τείνουν να έχουν έλλειμμα θείου και να περιέχουν σημαντικές ποσότητες οξυγόνου. Εκτός από το οξυγόνο, σε φ/β στοιχεία CIS/CIGS έχουν παρατηρηθεί και σημαντικές συγκεντρώσεις υδρογόνου, άνθρακα και

αζώτου. Οι συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων σχετίζονται με τη μείωση του οπτικού ενεργειακού διάκενου και το ποσοστό του κυβικού CdS σε σχέση με το εξαγωνικό CdS.

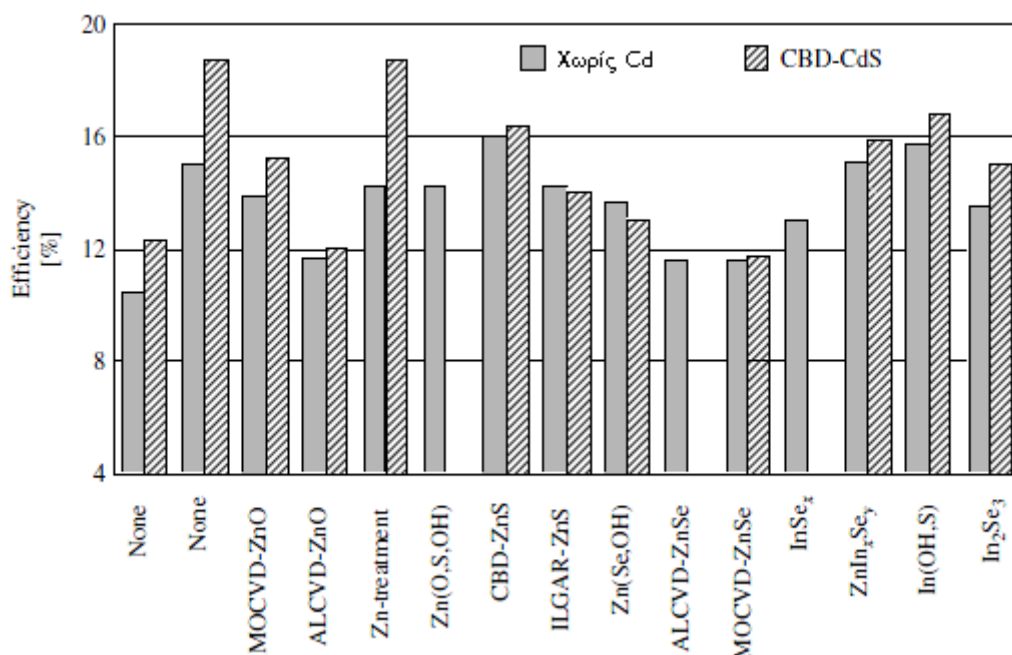
4.4.2. Άλλες μέθοδοι εναπόθεσης

Πριν εφαρμοστεί η μέθοδος CBD για την εναπόθεση του στρώματος CdS στο στρώμα Cu(InGa)Se₂, εφαρμόζοταν η μέθοδος της εξάτμισης σε κενό για την εναπόθεση στρωμάτων CdS πάχους 2 έως 3μm. Τα στοιχεία στα οποία η εναπόθεση του CdS έχει γίνει με αυτή τη μέθοδο έχουν δείξει απόδοση έως 9.4%, ενώ δεν είναι εφικτή η εναπόθεση λεπτότερων στρωμάτων.

Θερμαίνοντας το υπόστρωμα σε θερμοκρασίες των 150 με 200°C μπορούν να εναποτεθούν ατμοί CdS με ικανοποιητικές οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Η δημιουργία κράματος του CdS με ZnS οδήγησε σε βελτιωμένη απόδοση εξαιτίας του μεγαλύτερου ενεργειακού διάκενου και του καλύτερου ταιριάσματος των πλεγμάτων του CdS και του Cu(InGa)Se₂. Το μειονέκτημα της εξάτμισης σε κενό είναι ότι το στρώμα του CdS συχνά δεν είναι ομοιόμορφο και δεν καλύπτει όλη την επιφάνεια του στρώματος Cu(InGa)Se₂. Η μέθοδος του ψεκασμού μπόρεσε να καλύψει αυτό το μειονέκτημα, οδηγώντας σε φ/β στοιχεία με απόδοση έως και 12.1%, τιμή αρκετά κοντά σε αυτή που αντιστοιχεί σε φ/β στοιχεία παραγμένα με τη μέθοδο CBD στο 12.9%.

4.4.3. Εναλλακτικά ενδιάμεσα στρώματα (buffer layers)

Εξαιτίας της τοξικής φύσης του κάδμιου απέναντι στον άνθρωπο, είναι προτιμητέο να μην χρησιμοποιείται σε φ/β στοιχεία παρά το γεγονός ότι η ποσότητα που υπάρχει σε αυτά είναι πολύ χαμηλή και ενώ τηρούνται οι κανόνες ασφάλειας κατά την παραγωγή. Για τη δημιουργία φ/β στοιχείων που δεν περιέχουν κάδμιο θα πρέπει αυτό να αντικατασταθεί με κάποιο άλλο στοιχείο ή να είναι δυνατή η εναπόθεση του τμήματος ZnO απευθείας στο στρώμα Cu(InGa)Se₂. Οι δύο αυτοί στόχοι ταυτίζονται όταν η εναπόθεση του CdS αντικαθίσταται με την κατάλληλη τροποποίηση της επιφάνειας του Cu(InGa)Se₂ ώστε να εναποτεθεί το ZnO. Μερικές ενδιαφέρουσες λύσεις παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 4.8. Σύγκριση απόδοσης φ/β στοιχείων με χρήση καδμίου και χωρίς, για διάφορες τεχνολογίες εναλλακτικού ενδιάμεσου τμήματος.

4.4.4. Εμπρόσθιοι ακροδέκτες

Στα πρώτα φ/β στοιχεία CIS/CIGS ο εμπρόσθιος ακροδέκτης ήταν ένα στρώμα CdS νοθευμένο με In ή Ga. Τα φωτόνια μικρού μήκους κύματος (<520nm) απορροφούνταν κοντά στην επιφάνεια και δεν δημιουργούσαν ρεύμα. Με τη χρήση της μεθόδου CBD, έγινε εφικτή η εναπόθεση λεπτότερων στρωμάτων CdS, τα οποία δεν εμπόδιζαν πλέον την απορρόφηση των φωτονίων μικρού μήκους κύματος στο στρώμα Cu(InGa)Se₂, επιτρέποντας την αύξηση του φωτορεύματος με την αύξηση του ενεργειακού διάκενου των εμπρόσθιων ακροδεκτών. Επειδή ο εμπρόσθιος ακροδέκτης πρέπει να έχει και μεγάλη αγωγιμότητα για να γίνεται αποτελεσματικά η συλλογή των φορέων, χρησιμοποιούνται διαφανή αγώγιμα οξειδία (TCO), όπως και στην περίπτωση του άμορφου πυρίτιου. Τρεις είναι οι πιο γνωστές ενώσεις TCO. Το ZnO, το SnO₂ και το In₂O₃:Sn (Indium Tin Oxide – ITO). Η εναπόθεση του SnO₂ απαιτεί μεγάλες τιμές θερμοκρασίας. Το ITO δεν προτιμάται ιδιαίτερα λόγω αυξημένου κόστους σε σχέση με το ZnO. Η πιο γνωστή μέθοδος εναπόθεσης του TCO είναι ο ψεκασμός.

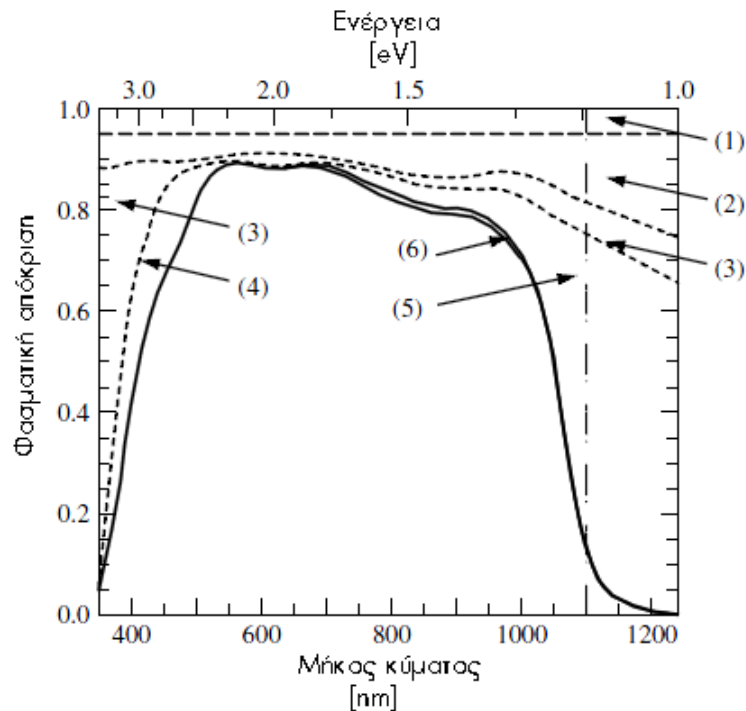
Ένας συνήθης σχεδιασμός των φ/β στοιχείων CIS/CIGS είναι η χρήση ενός ενδιάμεσου στρώματος ανόθευτου ZnO υψηλής αντίστασης. Ανάλογα με τις συνθήκες και μεθόδους εναπόθεσης, αυτό το στρώμα μπορεί να έχει ειδική αντίσταση 1-100 Ωcm ενώ το νοθευμένο τμήμα ZnO έχει ειδική αντίσταση της τάξης του 10⁻⁴-10⁻³ Ωcm. Το στρώμα έχει πάχος περίπου 50nm και εναποτίθεται με ψεκασμό σε ραδιοσυχνότητες. Το κέρδος στην απόδοση εξαιτίας του τμήματος αυτού, σε στοιχεία με CBD-CdS σχετίζεται με το πάχος του στρώματος CdS. Η τοπική ανομοιομορφία στην ποιότητα του στρώματος Cu(InGa)Se₂ μοντελοποιείται από μία δίοδο σε παραλληλία με μεγάλο ρεύμα επανασύνδεσης. Η επιρροή των περιοχών αυτών στην απόδοση του στοιχείου, μειώνεται με την επίδραση της εν σειρά αντίστασης του ανόθευτου τμήματος ZnO. Σε περίπτωση που το πάχος του στρώματος CdS είναι αρκετά μεγάλο τότε, δεν είναι αισθητή η επίδραση του τμήματος αυτού. Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο προστίθεται στην δομή του φ/β στοιχείου το τμήμα αυτό, είναι η προστασία του στοιχείου κατά την εναπόθεση με ψεκασμό του TCO τμήματος, ένα βήμα το οποίο χαρακτηρίζεται από αρκετά αντίξοες συνθήκες για την επιφάνεια του στοιχείου.

4.5. Λειτουργία του φ/β στοιχείου CIS/CIGS

Τα φ/β στοιχεία CIS/CIGS έχουν πετύχει απόδοση κοντά στο 20%, το υψηλότερο για τις τεχνολογίες thin film. Χαρακτηρίζονται από υψηλή φασματική απόκριση και μεγάλο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυξάνεται με το ενεργειακό διάκενο και δεν είναι ευαίσθητη στα όρια των κόκκων και σε άλλες ατέλειες της διεπαφής CdS/Cu(InGa)Se₂. Η λειτουργία του φ/β στοιχείου χαρακτηρίζεται από τρεις τύπους απωλειών. Οι οπτικές απώλειες που περιορίζουν την διέγερση των φορέων συνεπώς το ρεύμα, οι απώλειες επανασύνδεσης στα όρια των κόκκων, στον όγκο του απορροφητή και στην επαφή CdS/Cu(InGa)Se₂ που περιορίζουν την τάση και οι παρασιτικές απώλειες όπως η αντίσταση σειράς και η παράλληλη χωρητικότητα.

4.5.1. Το φωτόρευμα

Το στοιχείο Cu(InGa)Se₂ με τη μεγαλύτερη απόδοση, έχει J_{sc}=35.2 mA/cm² σε αντίθεση με το θεωρητικό μέγιστο των 42.8 mA/cm² για στοιχείο με ενεργειακό διάκενο 1.12eV υπό ακτινοβολία AM1.5. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, το φωτόρευμα προκύπτει από το ολοκλήρωμα του γινομένου της φασματικής απόκρισης και του φάσματος ακτινοβολίας. Η φασματική απόκριση εξαρτάται από το ενεργειακό διάκενο του απορροφητή, του στρώματος CdS, του στρώματος ZnO καθώς και από διάφορους μηχανισμούς απωλειών. Οι απώλειες αυτές διακρίνονται στο σχήμα 5.9 όπου έχει σχεδιαστεί η φασματική απόκριση για δύο τάσεις λειτουργίας του στοιχείου, V₁=0V και V₂=-1V.



Σχήμα 4.9. Τυπική φασματική απόκριση ϕ/β στοιχείου CIGS

Οι απώλειες στο παραπάνω σχήμα είναι:

1. Σκίαση εξαιτίας των ακροδεκτών συλλογής φορέων.
2. Ανάκλαση στην εμπρόσθια επιφάνεια. Στα στοιχεία υψηλής απόδοσης, η ανάκλαση αυτή ελαχιστοποιείται με τη χρήση ενός αντιανακλαστικού τμήματος MgF_2 πάχους $\sim 100\text{nm}$.
3. Απορρόφηση στο τμήμα TCO. Συνήθως παρατηρείται απορρόφηση 1-3% στις ορατές ακτινοβολίες η οποία αυξάνεται κοντά στην περιοχή IR ($\lambda > 900\text{nm}$) και για $\lambda < 400\text{nm}$ δηλαδή κοντά στο ενεργειακό διάκενο του ZnO .
4. Απορρόφηση στο τμήμα CdS. Η απορρόφηση στο τμήμα αυτό γίνεται μεγαλύτερη για μήκη κύματος μικρότερα των $\sim 520\text{nm}$ που αντιστοιχούν στο ενεργειακό διάκενο του CdS ($E_g = 2.42\text{eV}$). Οι απώλειες στην φασματική απόκριση για $\lambda < 500\text{nm}$ είναι ανάλογες με το πάχος του CdS μιας κ θεωρείται ότι ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται στο τμήμα αυτό, δεν συλλέγονται. Στο παραπάνω σχήμα το στοιχείο έχει τμήμα CdS πάχους $\sim 30\text{nm}$. Πρακτικά, το τμήμα αυτό είναι παχύτερο συνεπώς οι απώλειες απορρόφησης είναι μεγαλύτερες.
5. Μειωμένη απορρόφηση στο στρώμα $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ στην περιοχή κοντά στο ενεργειακό διάκενο του τμήματος αυτού. Αν το στρώμα του απορροφητή είναι πιο λεπτό από $\sim 1.0\mu\text{m}$ οι απώλειες αυτές γίνονται μεγαλύτερες.
6. Μειωμένη συλλογή των φωτοδιεγερμένων φορέων στο τμήμα του $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$.

Η φασματική απόκριση δίνεται από τη σχέση

$$QE(\lambda, V) = [1 - R(\lambda)] \cdot [1 - A_{ZnO}(\lambda)] \cdot [1 - A_{CdS}(\lambda)] \cdot QE_{\varepsilon\sigma}(\lambda, V)$$

Σχέση 4.2.

όπου R είναι η συνολική ανάκλαση, A_{ZnO} είναι η απορρόφηση στο τμήμα ZnO και A_{CdS} η απορρόφηση στο τμήμα του CdS. $QE_{\varepsilon\sigma}$ είναι η εσωτερική φασματική απόκριση που ορίζεται ως ο λόγος των συλλεγμένων φωτοδιεγερμένων φορέων προς τη ροή φωτονίων που φτάνει στον απορροφητή και δίνεται από τη σχέση

$$QE_{\varepsilon\sigma}(\lambda, V) \approx 1 - \frac{\exp[-\alpha(\lambda) \cdot W(V)]}{\alpha \cdot L + 1}$$

Σχέση 4.3.

όπου α είναι ο συντελεστής απορρόφησης του $Cu(InGa)Se_2$, W είναι το πάχος της περιοχής χωρικού φορτίου (ουδέτερη ζώνη στον όγκο του απορροφητή) και L είναι το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας. Από αυτή τη μοντελοποίηση, συνεπάγεται ότι όλοι οι φορείς που δημιουργούνται στην περιοχή χωρικού φορτίου συλλέγονται χωρίς απώλειες επανασύνδεσης. Δεδομένου ότι το W εξαρτάται από την τάση V , η εσωτερική φασματική απόκριση και συνεπώς το παραγόμενο φωτόρρευμα εξαρτώνται από την τάση. Η εξάρτηση αυτή φαίνεται και στο σχήμα 5.8 όπου η μεταβολή της τάσης επιφέρει αύξηση της φασματικής απόκρισης. Για τάση 0V οι τυπικές τιμές του W είναι 0.1-0.5 μ m.

4.5.2. Η δίοδος

Η σχέση ρεύματος-τάσης των στοιχείων $Cu(InGa)Se_2/CdS$ περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο

$$J = J_L - J_D = J_L - G \cdot V - J_O \cdot \exp\left[\frac{q}{A \cdot k \cdot T} \cdot (V - R_s J)\right]$$

Σχέση 4.4.

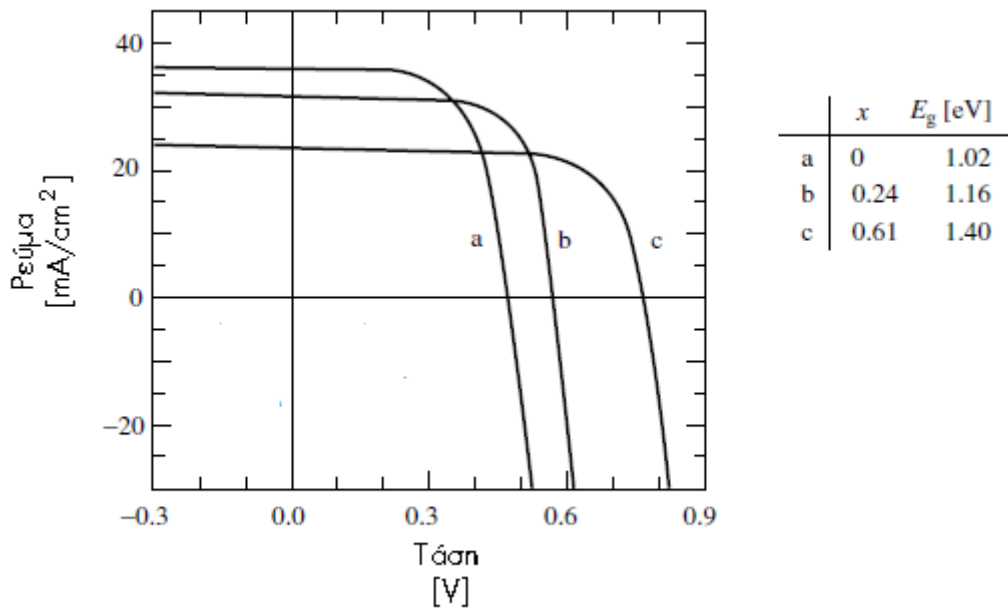
όπου το ρεύμα της διόδου δίνεται από τη σχέση

$$J_O = J_{OO} \cdot \exp\left(-\frac{\Phi_b}{A \cdot k \cdot T}\right)$$

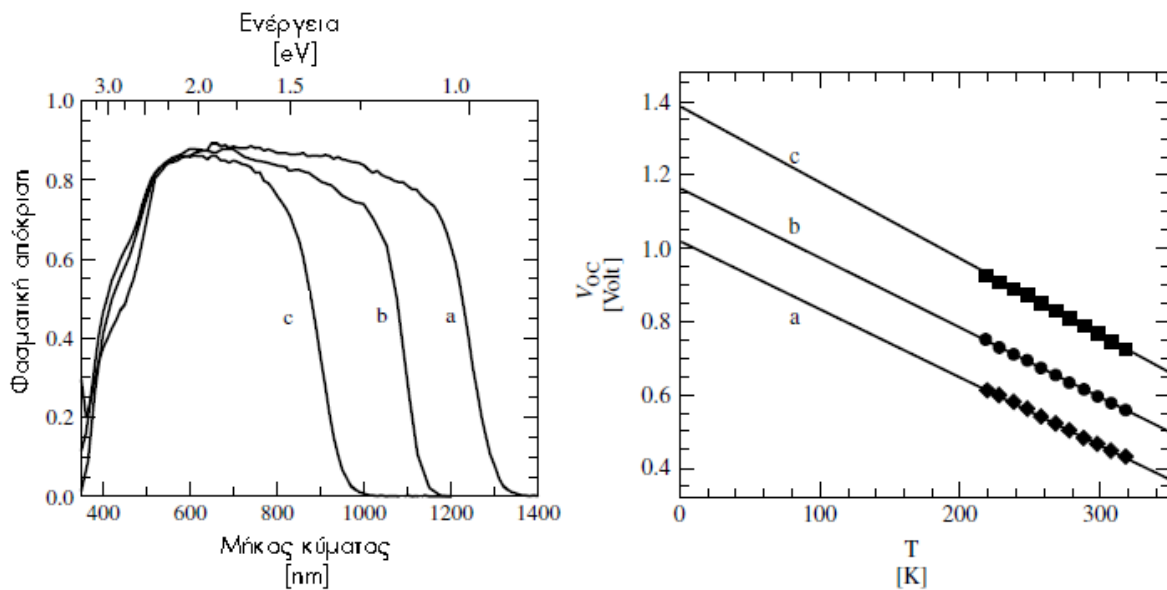
Σχέση 4.5.

Ο συντελεστής ποιότητας A , το φράγμα δυναμικού Φ_b και ο συντελεστής J_{OO} εξαρτώνται από τους μηχανισμούς επανασύνδεσης ενώ η αντίσταση σειράς και η αγωγιμότητα παραλληλίας είναι επιπλέον παρασιτικές απώλειες.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η αλλαγή στην χαρακτηριστική καμπύλη J-V καθώς και στην φασματική απόκριση και στην εξάρτηση από τη θερμοκρασία των στοιχείων CIGS με διαφορετικό λόγο $x = \text{Ga}/(\text{In} + \text{Ga})$.



Σχήμα 4.10. Χαρακτηριστική J-V για διαφορετικές τιμές του x .



Σχήμα 4.11. Φασματική απόκριση και εξάρτηση από τη θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές του x .

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης για $G \ll J_L V_{oc}$ προκύπτει από τη σχέση

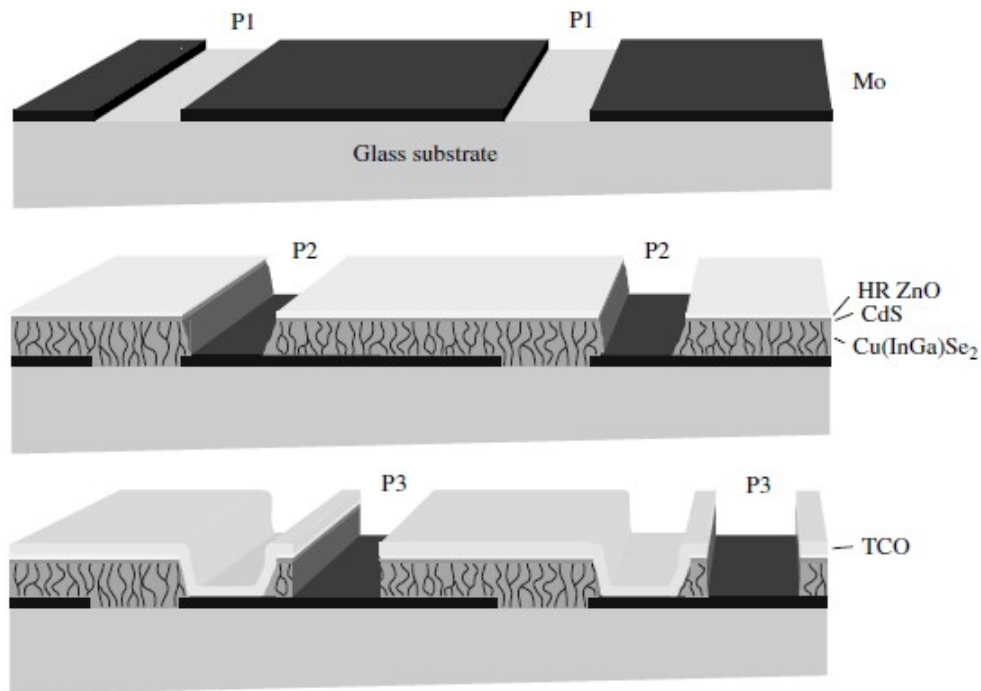
$$V_{oc} = \frac{E_g}{q} - \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{J_{00}}{J_L}\right)$$

Σχέση 4.6.

4.6. Παραγωγή φ/β στοιχείων CIGS

Μία μέθοδος μείωσης του συνολικού κόστους των φ/β πλαισίων των CIGS και εν γένει της τεχνολογίας thin film είναι η μονολιθική εσωτερική διασύνδεση των φ/β στοιχείων. Όπως αναφέρθηκε και στα φ/β στοιχεία άμορφου πυρίτιου, δεν είναι απαραίτητη η παραγωγή ξεχωριστών φ/β στοιχείων και η μεταξύ τους διασύνδεση για να δημιουργηθεί ένα φ/β πλαίσιο αφού με την παραπάνω μέθοδο τα επιμέρους στοιχεία είναι ήδη διασυνδεδεμένα.

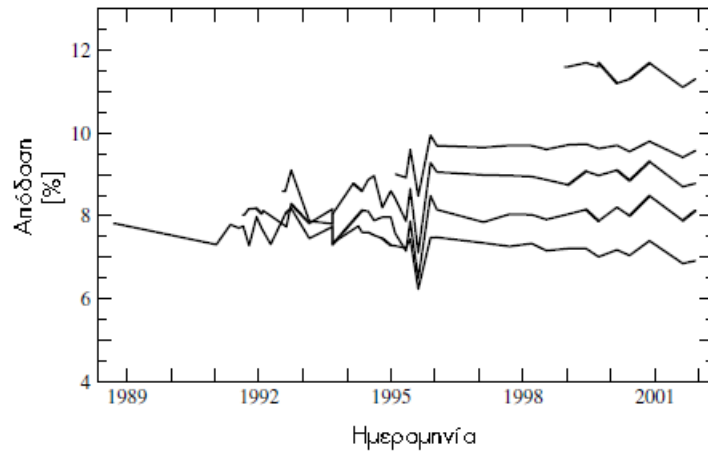
Η ενθυλάκωση των φ/β στοιχείων CIGS γίνεται και εδώ με τη χρήση ενός υμένα πολυμερούς EVA (ethylene vinyl acetate)



Σχήμα 4.12. Τα διαδοχικά βήματα για την εσωτερική διασύνδεση των φ/β στοιχείων.

Η εσωτερική διασύνδεση επιφέρει απώλεια περίπου του 1% της απόδοσης του στοιχείου. Αυτό οφείλεται στην αντίσταση σειράς καθώς και στην μη ενεργό επιφάνεια του στοιχείου. Οι απώλειες αυτές μειώνονται δραστικά αν χρησιμοποιηθούν μεταλλικά πλέγματα για την εσωτερική διασύνδεση.

Στα φ/β στοιχεία άμορφου πυρίτιου αναφέρθηκε το φαινόμενο Staebler-Wronski. Παρόμοια συμπεριφορά δεν έχει παρατηρηθεί στα φ/β στοιχεία CIGS καθότι έχει καταγραφεί μικρή απώλεια απόδοσης σε φ/β πλαίσια εντός χρονικού διαστήματος μεγαλύτερου των 12 χρόνων.



Σχήμα 4.13. Απόδοση φ/β στοιχείων μετρημένα από το NREL. Το στοιχείο το οποίο καταμετράται από το 1988 έχει εμβαδόν 0.1m^2 ενώ όλα τα υπόλοιπα 0.4m^2 .

Παρ' όλα αυτά, έχει παρατηρηθεί μεγάλη υποβάθμιση σε φ/β στοιχεία τα οποία έχουν εκτεθεί σε περιβάλλον με ποσοστά υγρασίας 85% σε θερμοκρασία 85°C για 1000 ώρες. Η επίδοση των φ/β στοιχείων σε τέτοιες συνθήκες αποτελεί έλεγχο πιστοποίησης και παρ' όλο που είναι εν γένει αρκετά αυστηρό, δείχνει την ανάγκη ενθυλάκωσης των στοιχείων και της προστασίας τους από την υγρασία.

Ένα πλεονέκτημα των φ/β πλαισίων CIGS έναντι αυτών του κρυσταλλικού πυριτίου είναι ότι μπορούν να τεμαχιστούν σε μικρότερα τμήματα, ώστε να προσαρμοστούν σε οποιαδήποτε ανάγκη ισχύος.

Εργαστηριακό Μέρος

5.1. Περιγραφή των πειραμάτων

Δύο σημαντικοί παράγοντες που αφορούν στην απόδοση ενός φ/β συστήματος είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας H που τροφοδοτεί το σύστημα και η θερμοκρασία θ στην οποία αυτό λειτουργεί.

Η αυξημένη ένταση ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} , επηρεάζοντας περισσότερο το I_{sc} ενώ η V_{oc} δεν μεταβάλλεται εξίσου σημαντικά. Τελικώς, η μέγιστη ισχύς P_m του συστήματος αυξάνεται και εμφανίζεται για μεγαλύτερες τιμές τάσης εξόδου.

Το αντίθετο συμβαίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το ρεύμα I_{sc} και η τάση V_{oc} μειώνονται, με πιο αισθητή την μείωση της V_{oc} . Τελικώς, η μέγιστη ισχύς P_m μειώνεται και εμφανίζεται για μικρότερα επίπεδα τάσης εξόδου.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα. Στο πρώτο πείραμα που διεξήχθη, μελετήθηκαν φ/β στοιχεία άμορφου πυριτίου σε διάφορες συνθήκες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Στο δεύτερο πείραμα, μελετήθηκαν φ/β στοιχεία διαφορετικού τύπου σε περιβάλλον τεχνητού φωτός με δυνατότητα προσαρμογής της θερμοκρασίας. Στόχος είναι η συλλογή δεδομένων για την χάραξη των καμπυλών $I-V$, $P-V$, ο υπολογισμός της απόδοσης, των εσωτερικών αντιστάσεων σειράς και παραλληλίας καθώς και η πρακτική επαλήθευση της επίδρασης της έντασης ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά των στοιχείων. Επιπρόσθετα, μελετήθηκαν διάφορες συνδεσμολογίες φ/β στοιχείων ίδιου τύπου με σκοπό την μικρής κλίμακας προσομοίωση λειτουργίας ενός φ/β πλαισίου.

5.2. Εξοπλισμός

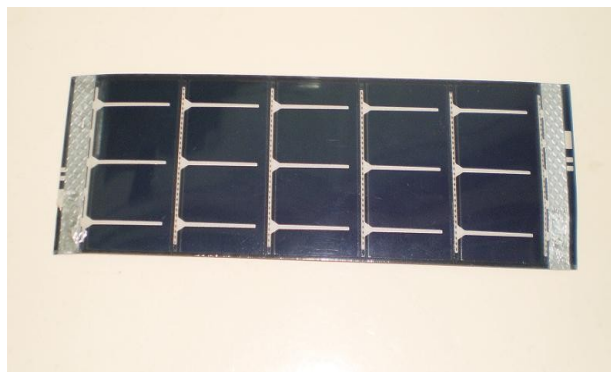
Για την διεξαγωγή των δύο πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

5.2.1. Φ/β στοιχεία CIS με χαρακτηριστικά $P_{max}=250mW$, $V_{oc}=4.5V$, $I_{sc}=100mA$ διαστάσεων $6cm \times 6cm$. Το thin film έχει εναποτεθεί σε γυαλί πάχους $2.4mm$. Σημαντική ιδιότητα των στοιχείων αυτών είναι ότι, όπως πληροφορεί ο κατασκευαστής αποδίδουν τη μέγιστη ισχύ τους ύστερα από 2 έως 3 ώρες λειτουργίας. Οι διαστάσεις της ενεργής επιφάνειας των στοιχείων είναι $5.5cm \times 5.5cm$.



Σχήμα 5.1. Φ/β στοιχείο CIS.

5.2.2. Εύκαμπτα φ/β στοιχεία a-Si με χαρακτηριστικά $V_{oc}=4.1V$, $I_{sc}=60mA$ διαστάσεων $3.75cm \times 10.05cm$. Το thin film έχει εναποτεθεί σε πολυμερές υλικό και το συνολικό πάχος του στοιχείου είναι $0.2mm$.



Σχήμα 5.2. Εύκαμπτο φ/β στοιχείο a-Si.

5.2.3. Γραμμικά ποτενσιόμετρα 100Ω και 1000Ω ανοχής 5% σε κουτί συνδεσμολογίας για απευθείας σύνδεση αμπερόμετρου, βολτόμετρου και ηλεκτρικής πηγής.



Σχήμα 5.3. Γραμμικό ποτενσιόμετρο.

5.2.4. Ψηφιακά πολύμετρα για μέτρηση τάσης και ρεύματος.



Σχήμα 5.4. Ψηφιακά πολύμετρα.

5.2.5. Φ/β αισθητήρας προσαρμοσμένος σε βολτόμετρο (Solar sensor ss-100). Ο αισθητήρας είναι ένα βαθμονομημένο φ/β στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου κυκλικού σχήματος διαμέτρου 2 ιντσών (5.08cm) και πάχους 275μm. Κάθε 1 mV αναγραφόμενης τιμής στην οθόνη του βολτόμετρου, αντιστοιχεί σε ένταση ακτινοβολίας 1mW/cm². Ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιήθηκε για την καταμέτρηση των συνθηκών ακτινοβολίας σε κάθε μέτρηση.



Σχήμα 5.5. Φ/β αισθητήρας.

5.2.6. Θάλαμος δοκιμών ελεγχόμενης θερμοκρασίας (WEISS KWP64). Η διάταξη αυτή αποτελείται από ένα θάλαμο και ένα σύστημα ελέγχου, μέσω του οποίου ρυθμίζεται η θερμοκρασία του θαλάμου. Το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας της διάταξης είναι από -75°C έως 130°C. Η ρύθμιση πραγματοποιείται με ακρίβεια $\pm 0,5^\circ\text{C}$ και ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας είναι κατά προσέγγιση 2.5°C/min κατά τη φάση της ψύξης και 3.0°C/min κατά τη φάση της θέρμανσης. Η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για να διατηρεί τη θερμοκρασία σταθερή σε ένα ορισμένο επίπεδο, είτε για να πραγματοποιήσει μια ορισμένη καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας που έχει καθοριστεί εκ των προτέρων. Ο χειρισμός της διάταξης γίνεται μέσω του πλαισίου ελέγχου που βρίσκεται στο μπροστινή επιφάνειά της, ή με τη βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή, μέσω σειριακής θύρας επικοινωνίας (RS232C) και του αντίστοιχου λογισμικού.



Σχήμα 5.6. Περιβαλλοντικός θάλαμος.

5.2.7. Λαμπτήρας πυρακτώσεως ισχύος 60W της Phillips. Ο συγκεκριμένος λαμπτήρας χρησιμοποιήθηκε σαν πηγή ακτινοβολίας για τις μετρήσεις εντός του περιβαλλοντικού θαλάμου.

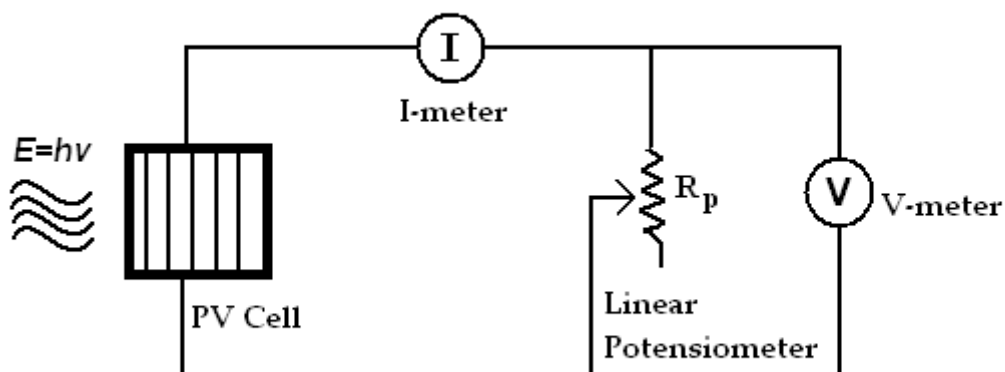


Σχήμα 5.7. Λαμπτήρας πυρακτώσεως.

5.3. Περιγραφή συλλογής δεδομένων

Τα δύο πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο χρονικό διάστημα Φεβρουάριος-Μάρτιος 2011. Το πρώτο πείραμα έλαβε χώρα στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (γεωγραφικά δεδομένα 37.975151B, 23.784981A) και στα Σπάτα Αττικής (γεωγραφικά δεδομένα 37.963558B, 23.908006A) σε ανοιχτό χώρο σε συνθήκες καθαρού ουρανού, ενώ το δεύτερο πείραμα διεξήχθη στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, σε εσωτερικό χώρο του εργαστηρίου. Οι περιοχές αυτές βρίσκονται στο Βόρειο ημισφαίριο, στην εύκρατη ζώνη, άρα ο ήλιος δεν φτάνει ποτέ στο ζενίθ, συνεπώς τα φ/β στοιχεία πρέπει να στρέφονται προς το νότο για μέγιστη απολαβή ισχύος. Στόχος των πειραμάτων δεν είναι η εκμετάλλευση της μέγιστης ισχύος των φ/β στοιχείων, αλλά η παρατήρηση της συμπεριφοράς τους και για αυτό το λόγο δεν θεωρήθηκε κρίσιμη η τοποθέτησή τους σε κλίση μέγιστης ισχύος.

Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε και στις δύο περιπτώσεις, απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.8. Κύκλωμα μετρήσεων.

Το σύστημα των φ/β στοιχείων, δέχεται την ακτινοβολία της φωτεινής πηγής που στο πρώτο πείραμα είναι ο ήλιος, ενώ στο δεύτερο ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως 60W. Ο θετικός ακροδέκτης του φ/β συστήματος, συνδέεται σε ένα πολύμετρο το οποίο λειτουργεί ως αμπερόμετρο. Ακολουθεί η σύνδεση σε ένα ποτενσιόμετρο, πάνω στο οποίο έχει συνδεθεί ένα δεύτερο πολύμετρο, ώστε να καταμετρά την τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της μεταβλητής αντίστασης. Το κύκλωμα κλείνει, με τη σύνδεση του αρνητικού ακροδέκτη του φ/β συστήματος στον ακροδέκτη μεσαίας λήψης του ποτενσιόμετρου.

Με σταθερό βήμα ανά τμήματα, μεταβάλλεται η αντίσταση του ποτενσιόμετρου και καταγράφονται η τιμή του ρεύματος I_x και της τάσης V_x για την αντίστοιχη τιμή της R_p . Η διεξαγωγή της κάθε μέτρησης γίνεται σε γρήγορους ρυθμούς καθώς στόχος είναι η συλλογή δεδομένων για όσο το δυνατόν σταθερή ηλιακή ακτινοβολία. Μεγάλη καθυστέρηση στην καταγραφή των μετρήσεων θα είχε σαν αποτέλεσμα την μη αμελητέα μεταβολή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συνεπώς τον χαρακτηρισμό των αποτελεσμάτων ως μη αξιόπιστων.

Με τη συλλογή των τιμών αυτών είναι εύκολο να χαραχθεί η χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ του φ/β συστήματος και αφότου υπολογιστούν και οι τιμές της ισχύος, μέσω της σχέσης

$$P_x = I_x \times V_x \quad , \quad x=1,2,3 \dots n \quad \text{όπου } n \text{ το πλήθος των μετρήσεων}$$

Τύπος Μ.5.1.

χαράζεται και η καμπύλη $P-V$ από όπου βρίσκεται η μέγιστη ισχύς P_{max} .

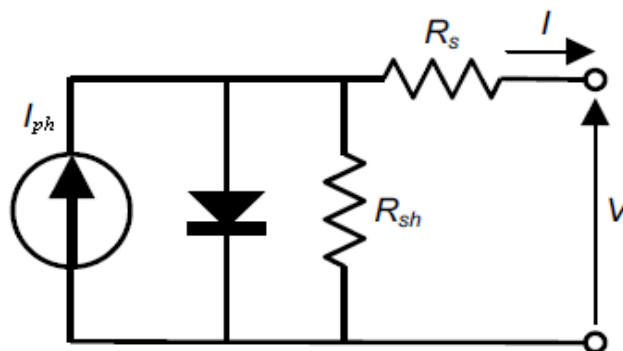
Για τον υπολογισμό της απόδοσης ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια, των φ/β στοιχείων εφαρμόζεται ο τύπος

$$n = \frac{P_{max}}{H \times S}$$

P_{max} : Μέγιστη ισχύς εξόδου (mW)
 H : ένταση ακτινοβολίας (mW/cm^2)
 S : Εμβαδόν επιφάνειας που ακτινοβολείται (cm^2)

Τύπος Μ.5.2.

Για τη μελέτη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φ/β στοιχείων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μονής διόδου, αντίστασης σειράς και αντίστασης παραλληλίας όπως παρουσιάστηκε στο 2ο κεφάλαιο.



Σχήμα 5.9. Ηλεκτρικό ισοδύναμο πραγματικού φ/β στοιχείου.

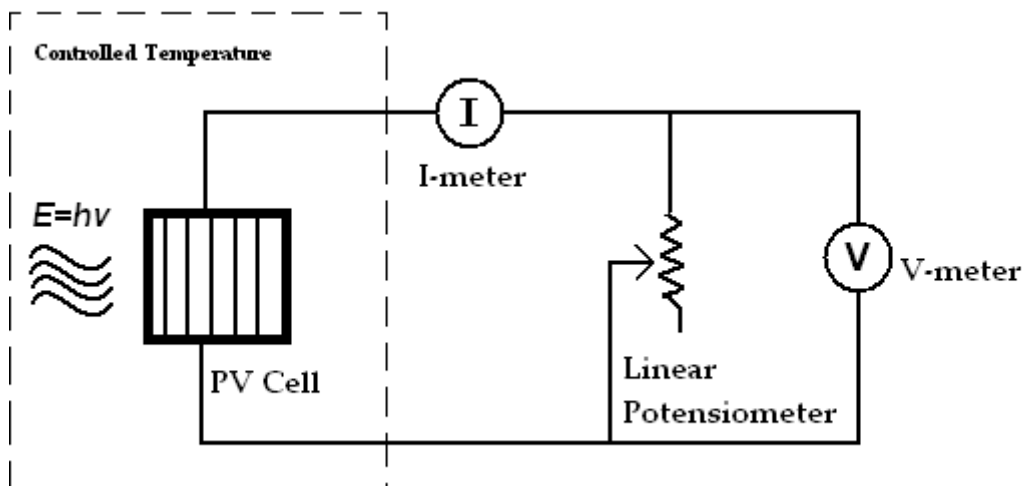
όπου ο υπολογισμός των αντιστάσεων γίνεται με εφαρμογή της σχέσης

$$R_{shunt} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad R_{series} = \frac{V_n - V_{n-1}}{I_{n-1}}$$

Τύπος Μ.5.3.

όπου ο εκάστοτε δείκτης είναι ο αυξαν αριθμός της κάθε μέτρησης, με τον δείκτη 1 να αφορά τη μέτρηση για αντίσταση ποτενσιόμετρο ίση με το μηδέν και το δείκτη n να αφορά τη μέτρηση για τη μέγιστη αντίσταση του ποτενσιόμετρου. Οι παραπάνω τύποι είναι προσεγγιστικοί, καθότι για ακρίβεια θα έπρεπε να υπολογιστεί η εφαπτομένη της καμπύλης I-V στα σημεία όπου $I \rightarrow 0$ και $V \rightarrow 0$.

Στο πρώτο πείραμα, τα φ/β στοιχεία βρίσκονται σε κάθε μέτρηση σε οριζόντια θέση και σε χώρο με άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Στο δεύτερο πείραμα, η συνδεσμολογία παραμένει ίδια, ωστόσο ο λαμπτήρας πυρακτώσεως και το φ/β σύστημα, βρίσκονται σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.10. Κύκλωμα μετρήσεων στον περιβαλλοντικό θάλαμο.

Ο τρόπος συλλογής των δεδομένων παραμένει ίδιος, το φ/β σύστημα όμως βρίσκεται σε βέλτιστη κλίση ως προς τη φωτεινή πηγή (κατακόρυφη θέση ως προς το επίπεδο) ώστε να μεγιστοποιείται η ένταση ακτινοβολίας.

Για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας, το φ/β σύστημα θα μπορούσε να τοποθετηθεί πολύ κοντά στην φωτεινή πηγή. Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως όμως, έχει σαν βάση λειτουργίας, την εκπομπή φωτονίων από ένα σώμα το οποίο θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς η τοποθέτηση των φ/β στοιχείων σε πολύ μικρή απόσταση από τον λαμπτήρα πυρακτώσεως θα είχε ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του φ/β στοιχείου και ενδεχομένως την καταστροφή του πλαστικού περιβλήματος των καλωδίων.



Σχήμα 5.11.Μετρήσεις στον περιβαλλοντικό θάλαμο.



Σχήμα 5.12.Μετρήσεις στον περιβαλλοντικό θάλαμο.



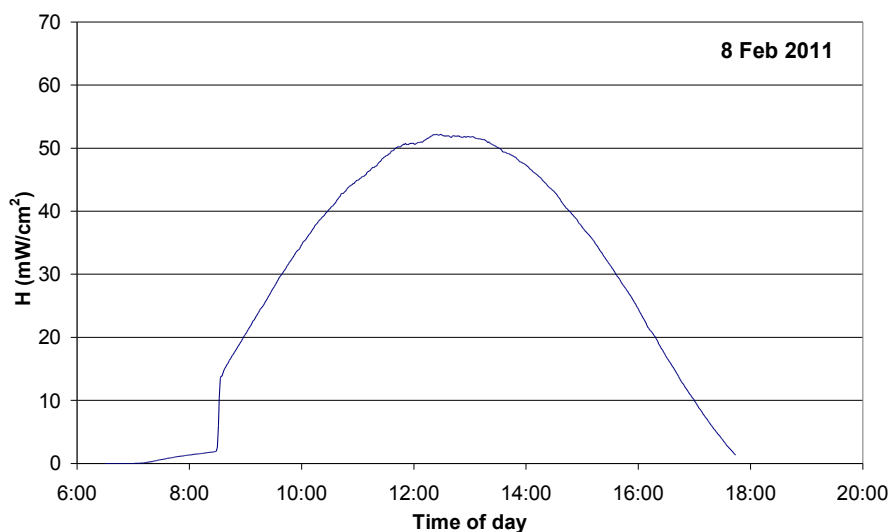
Σχήμα 5.13.Μετρήσεις στον περιβαλλοντικό θάλαμο.

Για αυτούς τους λόγους επιλέχθηκε μία απόσταση 25cm τοποθέτησης των ϕ/β στοιχείων, στην οποία ο λαμπτήρας ακτινοβολούσε με ένταση $7.3\text{mW}/\text{cm}^2$.

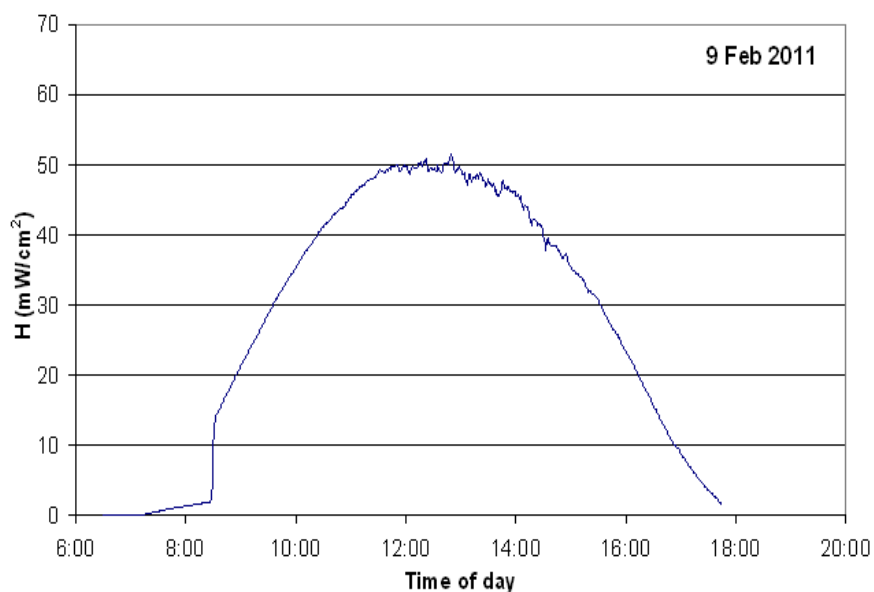
Σχεδόν σε όλες τις μετρήσεις το ποτενσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε έχει μέγιστη τιμή τα 1000Ω . Η αιτία για την επιλογή αυτού του ποτενσιόμετρου είναι διότι με το ποτενσιόμετρο των 100Ω δεν ήταν πάντα εφικτή η καταγραφή του σημείου μέγιστης ισχύος, το οποίο είναι και το κέντρο ενδιαφέροντος στα πειράματα που διεξήχθησαν.

5.4. Γραφικές Παραστάσεις I-V, P-V

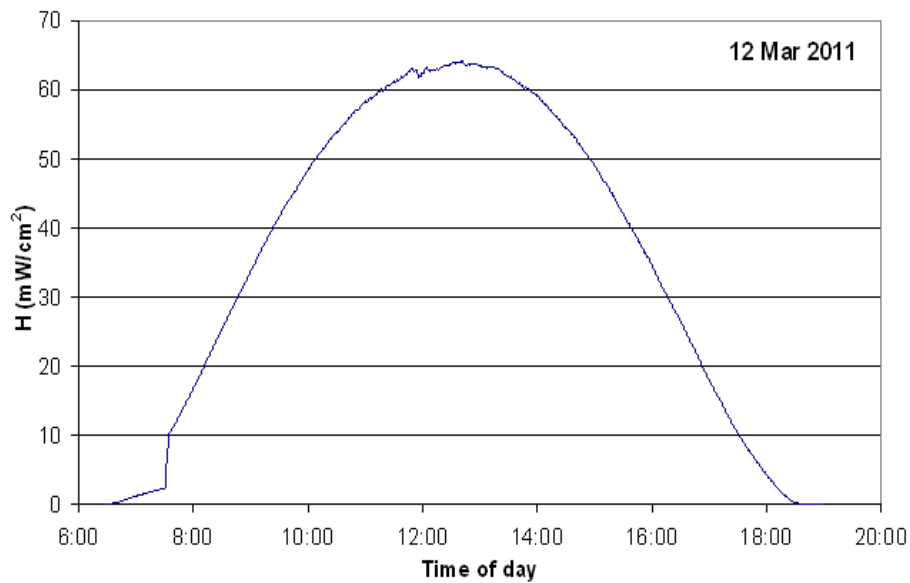
Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τις ημερομηνίες $08-02-2011$, $09-02-2011$, $12-03-2011$, $16-03-2011$ και $17-03-2011$. Στις 2 τελευταίες ημέρες, διεξήχθησαν τα πειράματα εντός του εργαστηρίου χρησιμοποιώντας τον περιβαλλοντικό θάλαμο, ενώ στις τρεις αρχικές ημερομηνίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα με φωτεινή πηγή τον ήλιο. Για τις ημέρες αυτές παρατίθεται η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο όπως καταγράφηκε από τα όργανα μέτρησης του Εργαστηρίου Ηλιακής Ακτινοβολίας της σχολής Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π. (<http://eml.ece.ntua.gr>)



Σχήμα 5.14. Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο για 08-02-2011



Σχήμα 5.15. Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο για 09-02-2011



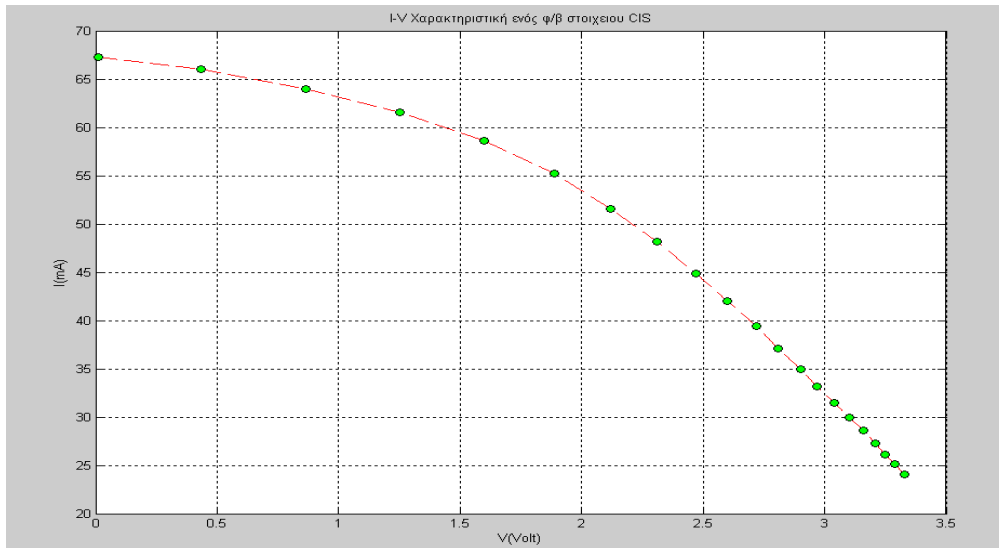
Σχήμα 5.16. Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο για 12-03-2011

Τα παραπάνω γραφήματα απεικονίζουν την ένταση ακτινοβολίας σε μονάδες mW/cm^2 στην περιοχή που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, για τις ημερομηνίες που ενδιαφέρουν. Παρατηρείται ότι στις 3 καμπύλες δεν εμφανίζεται καμία σπουδαία διαταραχή, την οποία θα προκαλούσε κάποιο φυσικό εμπόδιο συνεπώς οι ημέρες αυτές χαρακτηρίζονται από πλήρη ηλιοφάνεια.

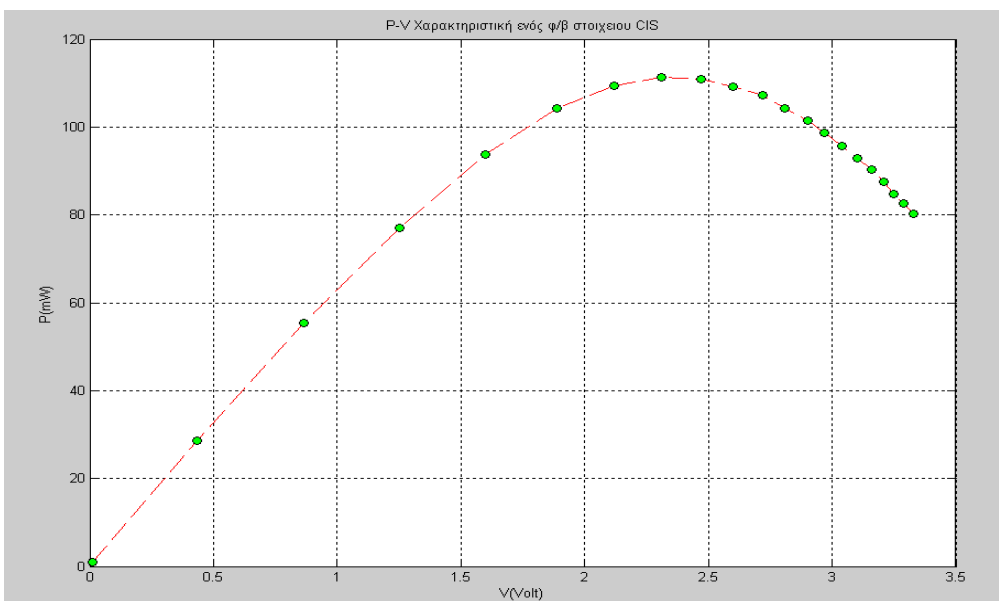
Με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου *Matlab* (Version 7.5.0.342), καταχωρήθηκαν τα καταγεγραμμένα δεδομένα και σχεδιάστηκαν οι καμπύλες $I-V$, $P-V$.

5.4.1 Μετρήσεις ενός στοιχείου CIS υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας

5.4.1.1. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=80mW/cm^2$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 08-02-2011



Σχήμα 5.17. Καμπύλη $I-V$.

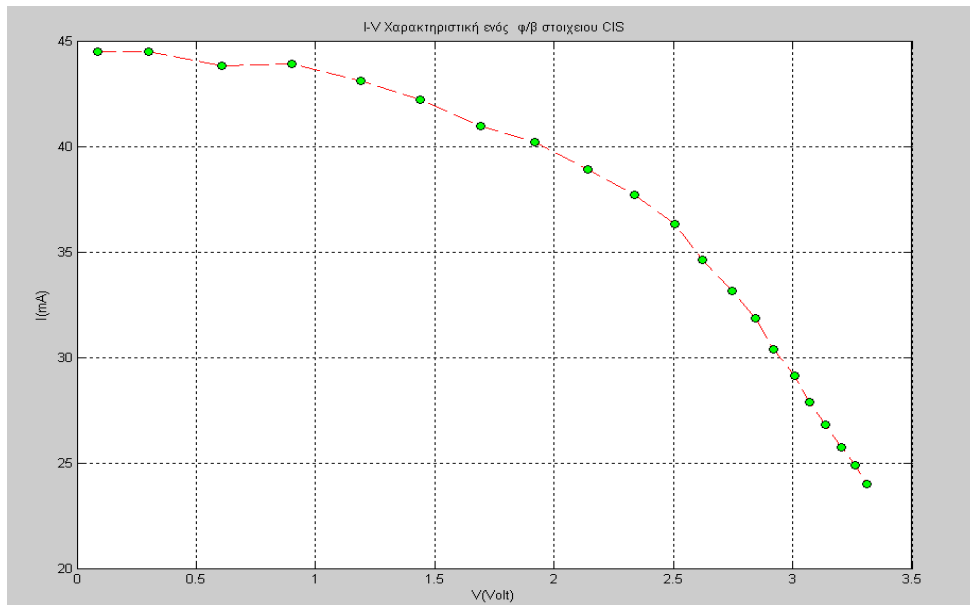


Σχήμα 5.18. Καμπύλη $P-V$.

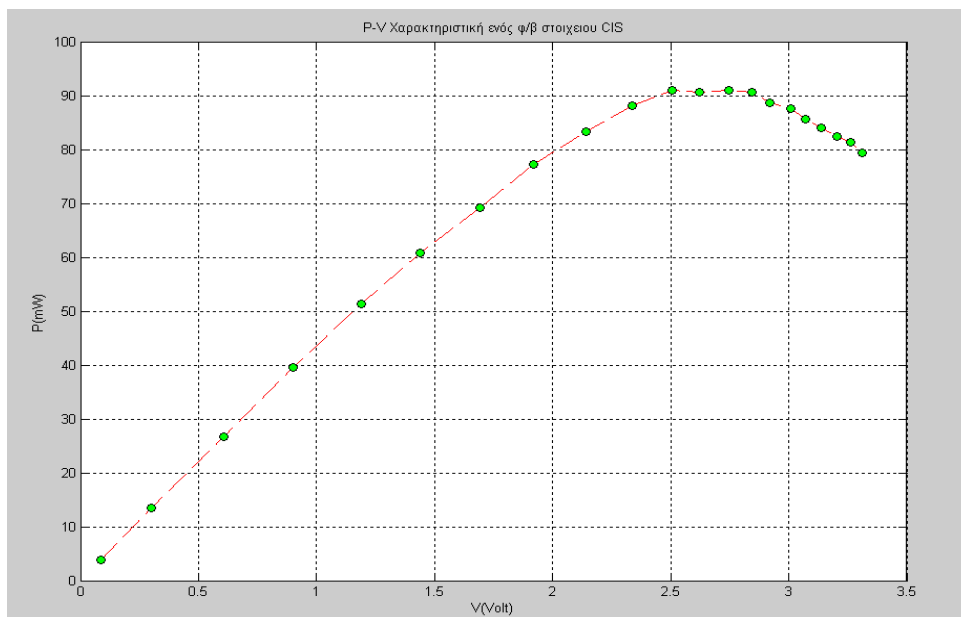
$$\begin{aligned}
 P_{max} &= 111.342 \text{ mW} & R_{series} &= 40 \ \Omega \\
 I_{Pmax} &= 48.2 \text{ mA} & R_{shunt} &= 322.3077 \ \Omega \\
 V_{Pmax} &= 2.31 \text{ V} & n &= 3.866\% \\
 & & R_{Pmax} &= 35 \ \Omega
 \end{aligned}$$

5.4.1.2. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=64.7mW/cm^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 09-02-2011



Σχήμα 5.19. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.20. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 91.0299 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 33.15 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.746 \text{ V}$$

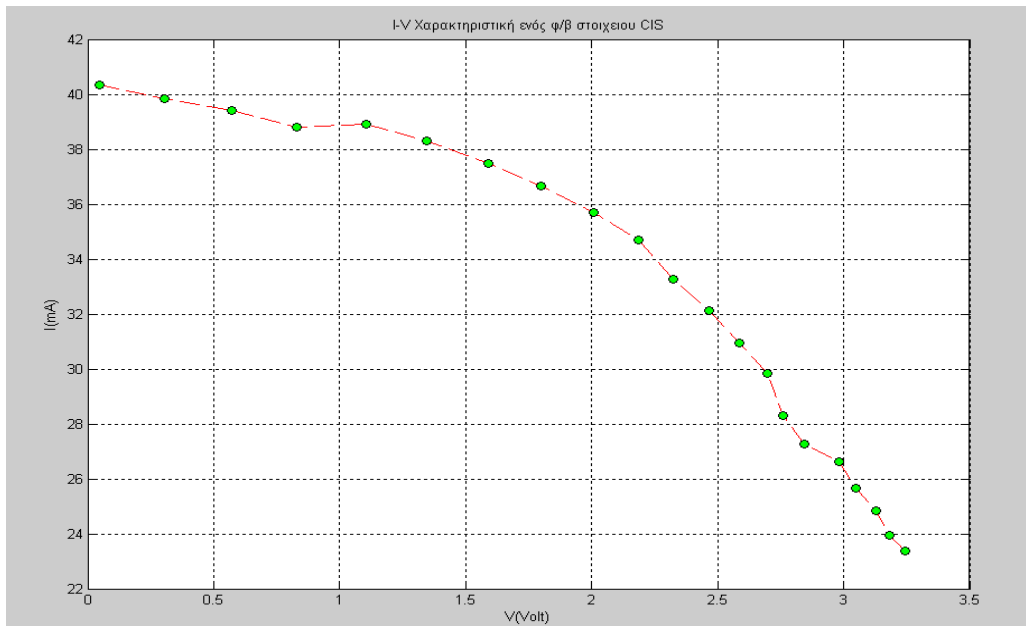
$$R_{series} = 52.1739 \text{ } \Omega$$

$$R_{shunt} = 744.2857 \text{ } \Omega$$

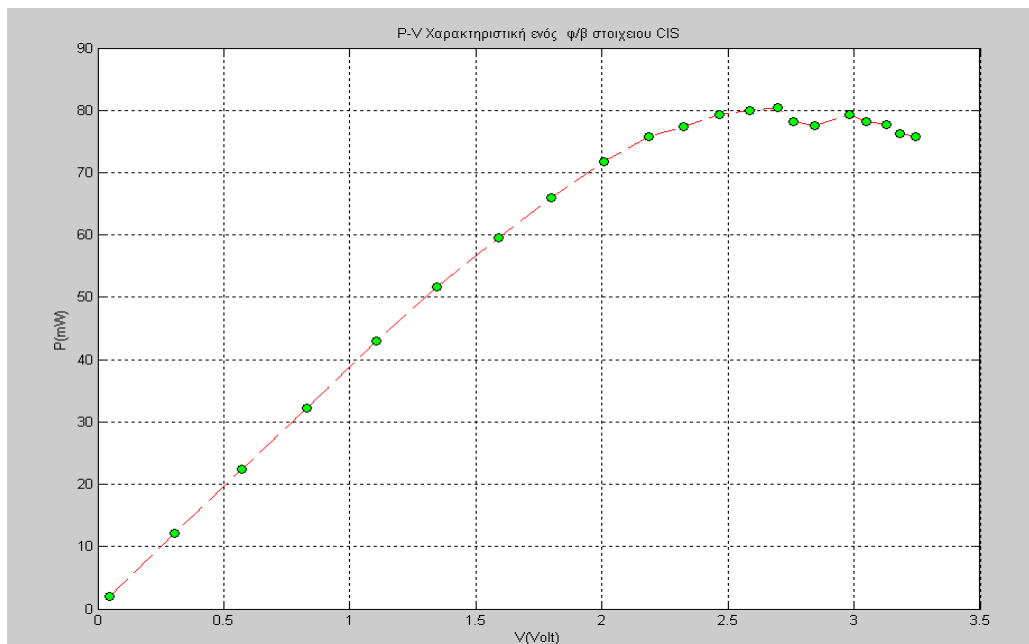
$$n = 3.908\%$$

$$R_{Pmax} = 60 \text{ } \Omega$$

5.4.1.3. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=56mW/cm^2$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 09-02-2011



Σχήμα 5.21. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.22. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 80.4756 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 29.85 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.696 \text{ V}$$

$$R_{series} = 110.3448 \Omega$$

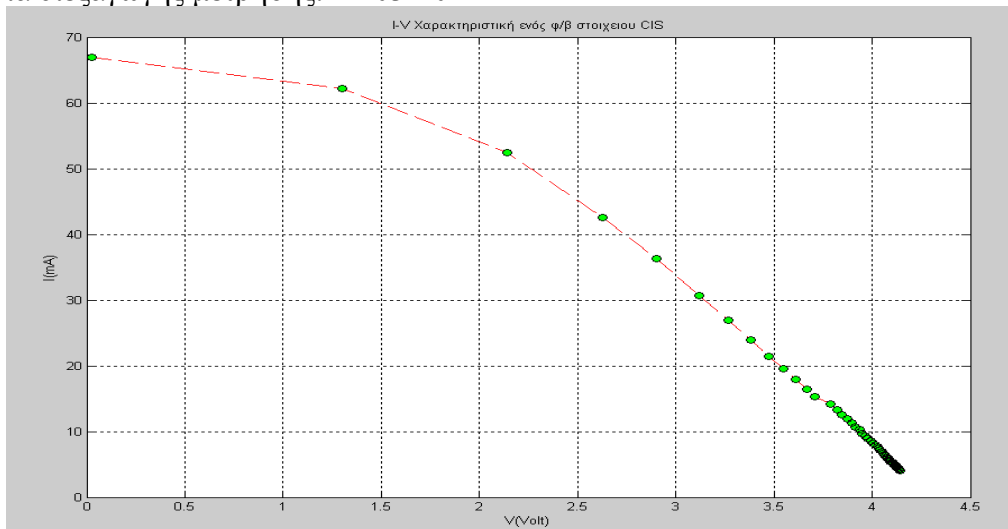
$$R_{shunt} = 512 \Omega$$

$$n = 3.992\%$$

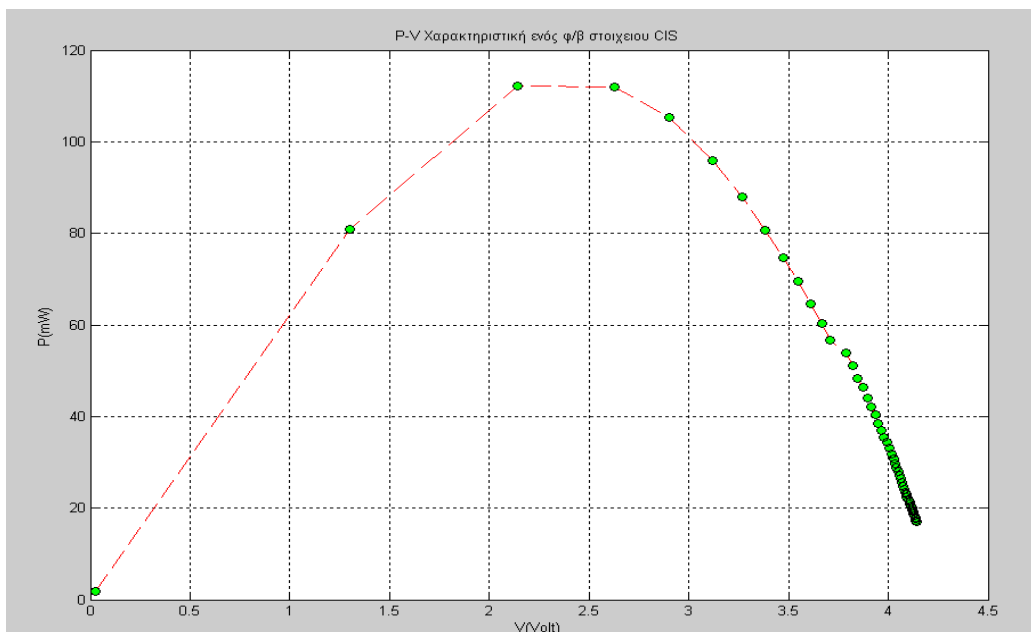
$$R_{Pmax} = 65 \Omega$$

5.4.1.4 Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=63.58mW/cm^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.23. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.24. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 112.14 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 52.4 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.14 \text{ V}$$

$$R_{series} = 33.3333 \ \Omega$$

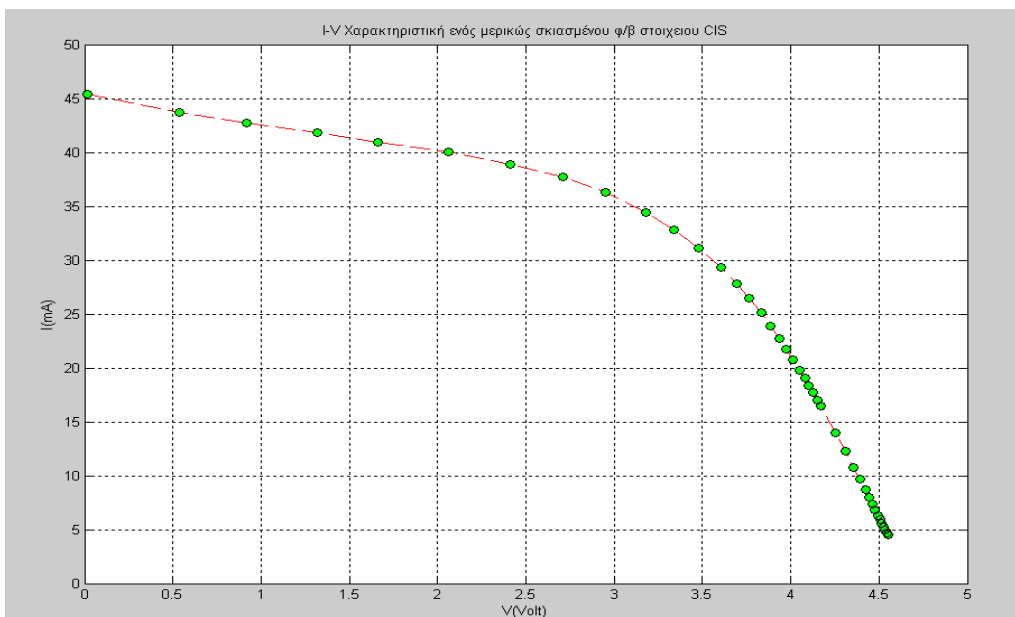
$$R_{shunt} = 270.6383 \ \Omega$$

$$n = 4.899\%$$

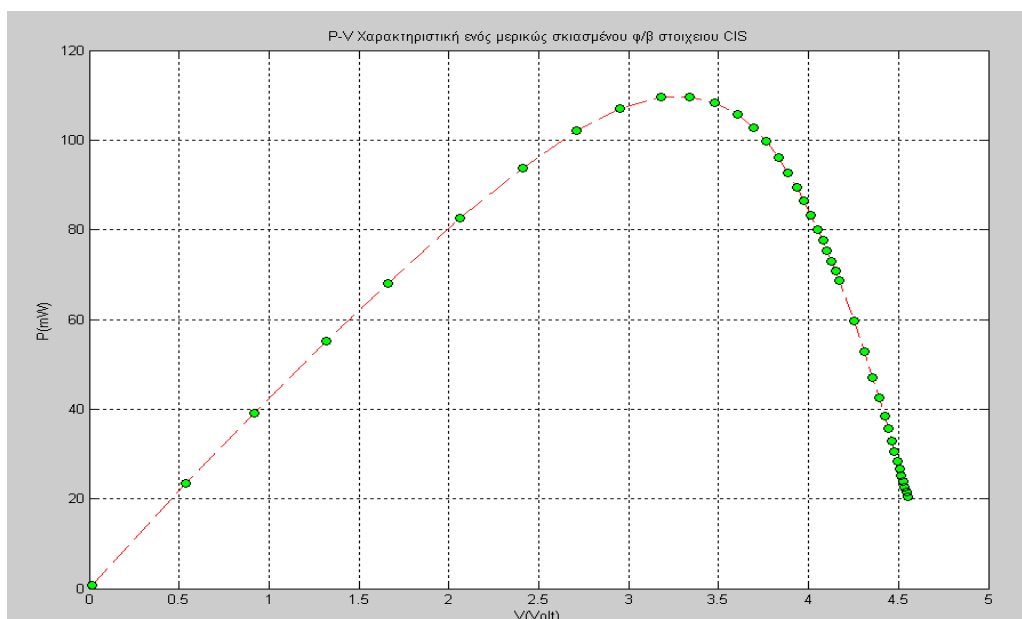
$$R_{Pmax} = 40 \ \Omega$$

5.4.1.5. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός μερικώς σκιασμένου ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=57.66mW/cm^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.25. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.26. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 109.6194 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 32.83 \text{ mA}$$

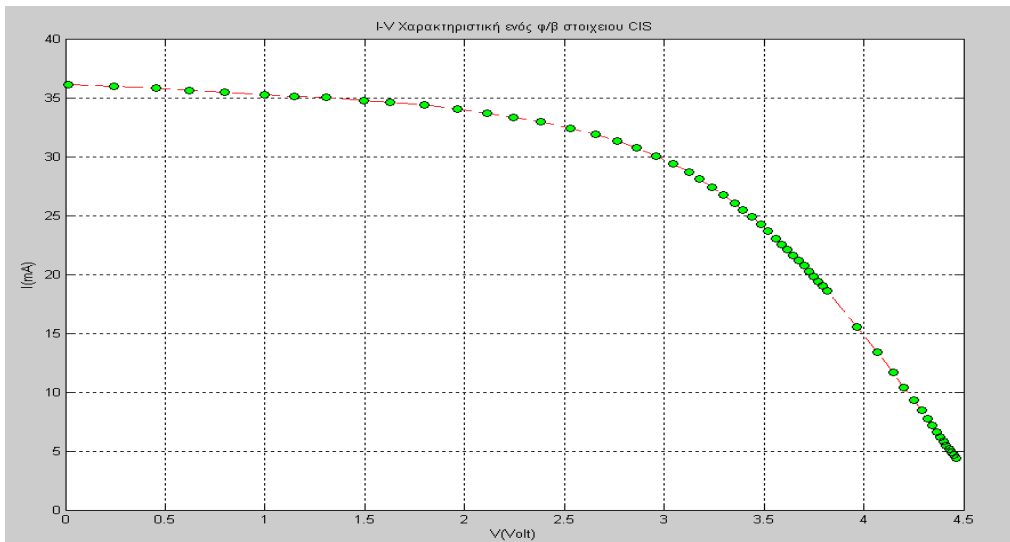
$$V_{Pmax} = 3.339 \text{ V}$$

$$R_{series} = 27.2727 \text{ } \Omega$$

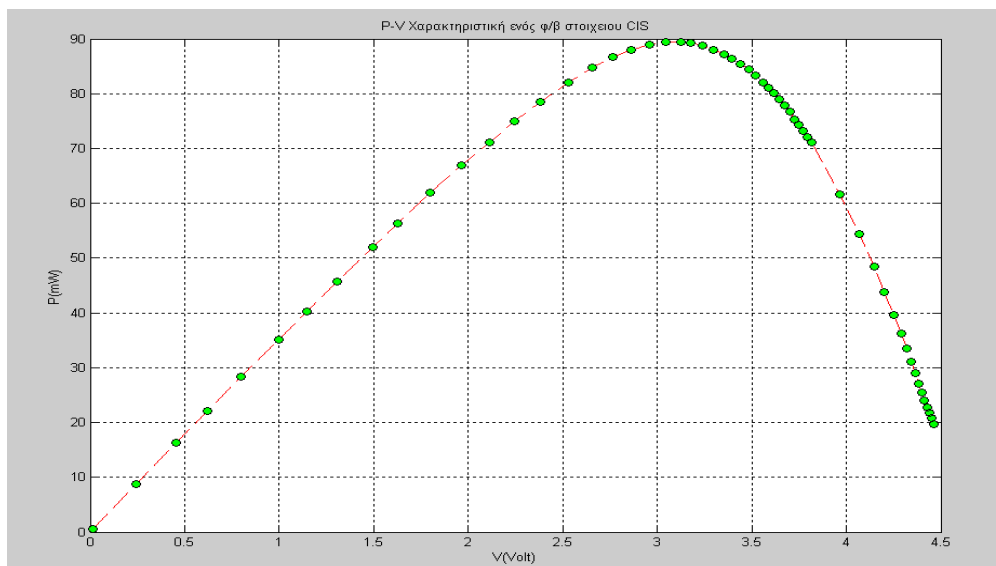
$$R_{shunt} = 315.2439 \text{ } \Omega$$

5.4.1.6. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=34.81mW/cm^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.27. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.28. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 89.4765 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 28.66 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 3.122 \text{ V}$$

$$R_{series} = 38.4615 \text{ } \Omega$$

$$R_{shunt} = 1642.9 \text{ } \Omega$$

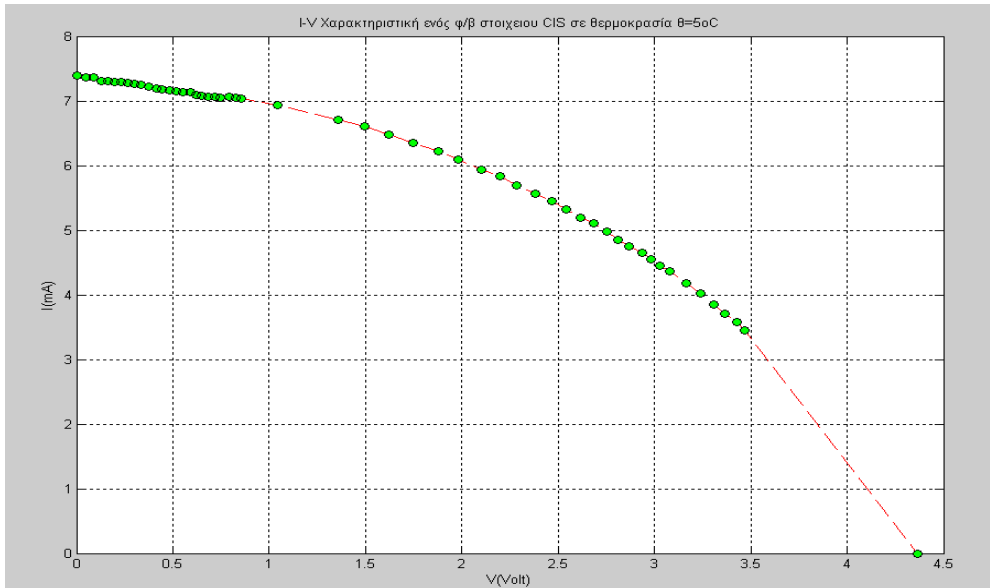
$$n = 7.14\%$$

$$R_{Pmax} = 105 \text{ } \Omega$$

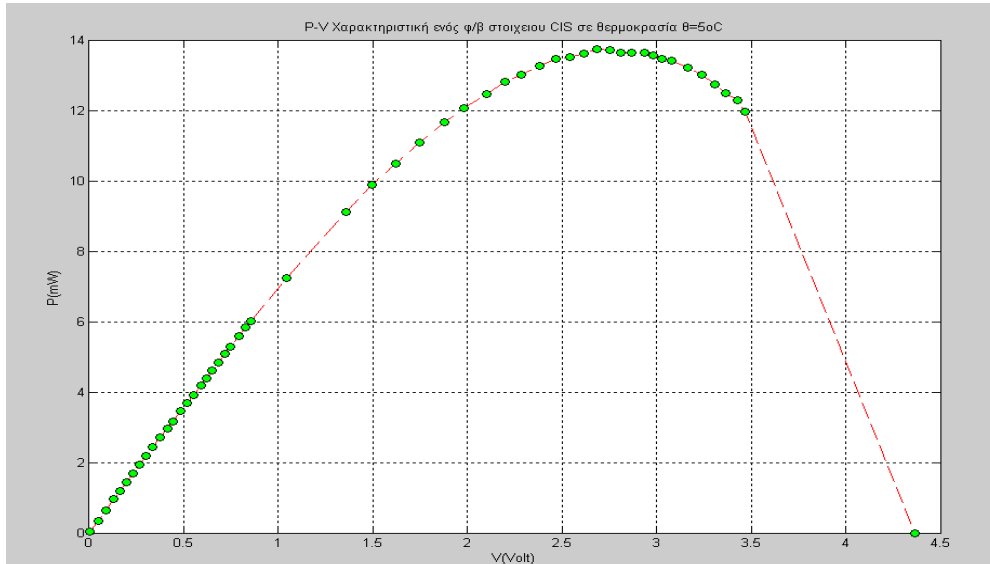
5.4.2. Μετρήσεις ενός στοιχείου CIS σε διαφορετικές θερμοκρασίες

5.4.2.1. Καμπύλες $I-V, P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=5^\circ\text{C}$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011



Σχήμα 5.29. Καμπύλη I-V.

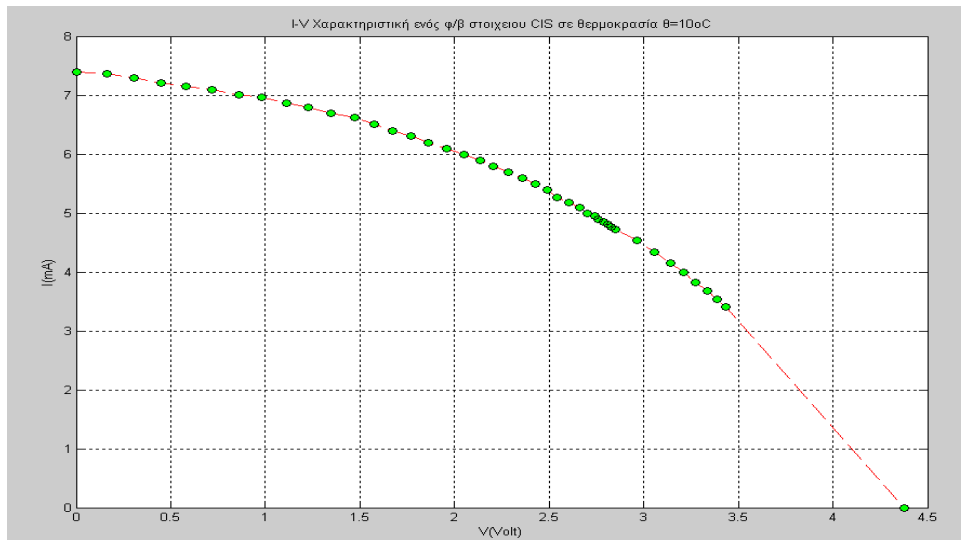


Σχήμα 5.30. Καμπύλη P-V.

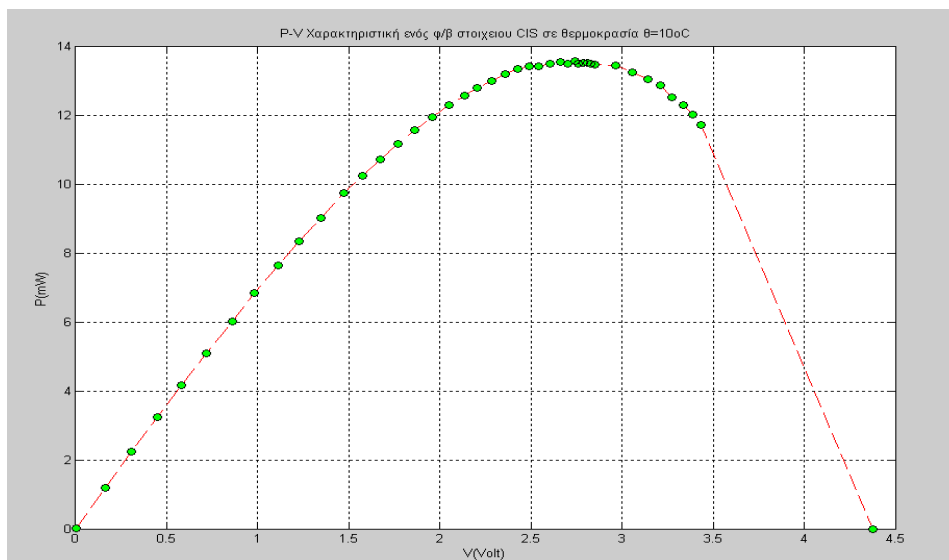
$$P_{max} = 13.7255 \text{ mW}$$
$$I_{Pmax} = 5.11 \text{ mA}$$
$$V_{Pmax} = 2.686 \text{ V}$$

$$R_{series} = 259.7101 \ \Omega$$
$$R_{shunt} = 2100 \ \Omega$$
$$n = 5.22\%$$
$$R_{Pmax} = 550 \ \Omega$$

5.4.2.2. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=10^\circ C$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011



Σχήμα 5.31. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.32. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 13.563 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 4.95 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.74 \text{ V}$$

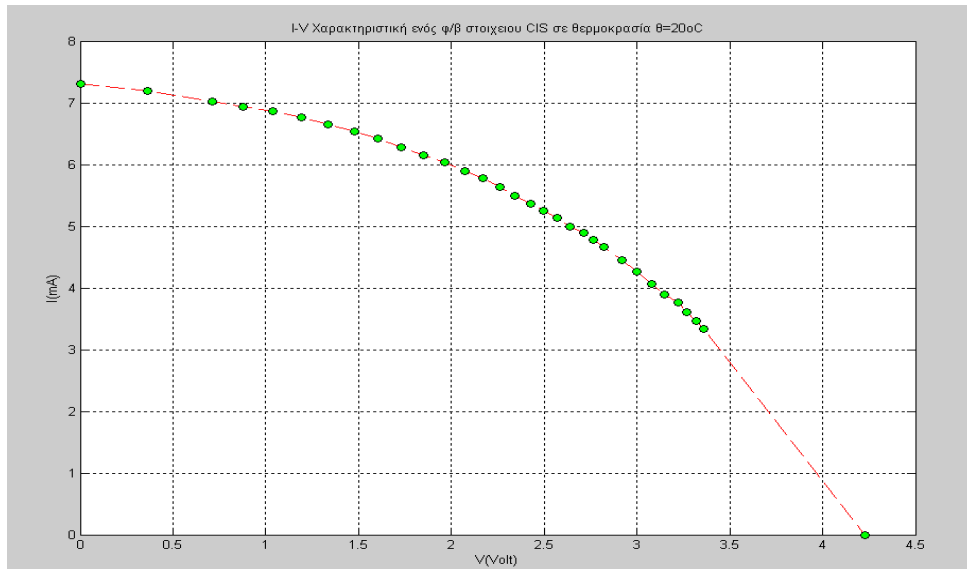
$$R_{series} = 275.9531 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 3975 \ \Omega$$

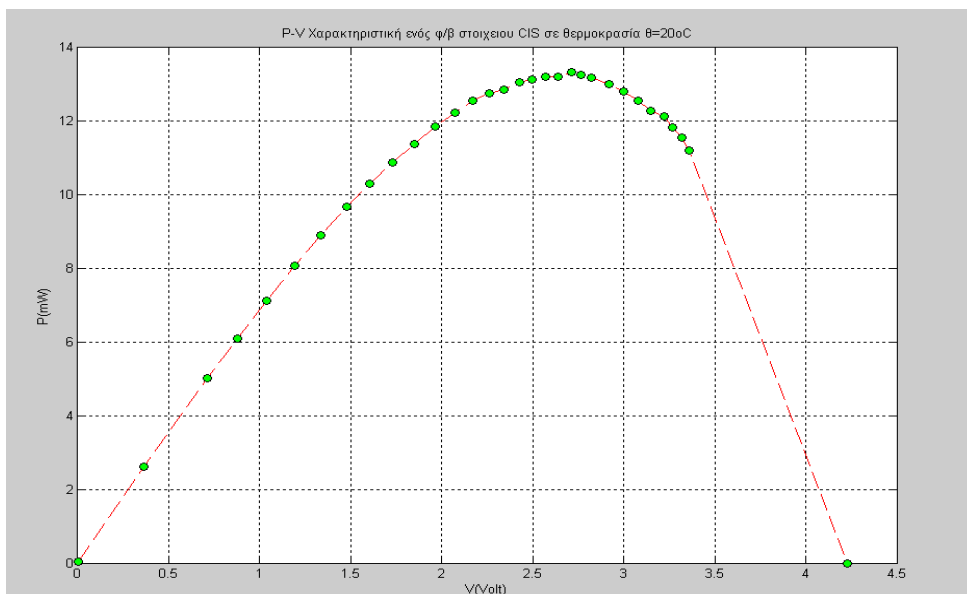
$$n = 5.16\%$$

$$R_{Pmax} = 550 \ \Omega$$

5.4.2.3. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011



Σχήμα 5.33. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.34. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 13.3084 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 4.9 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.716 \text{ V}$$

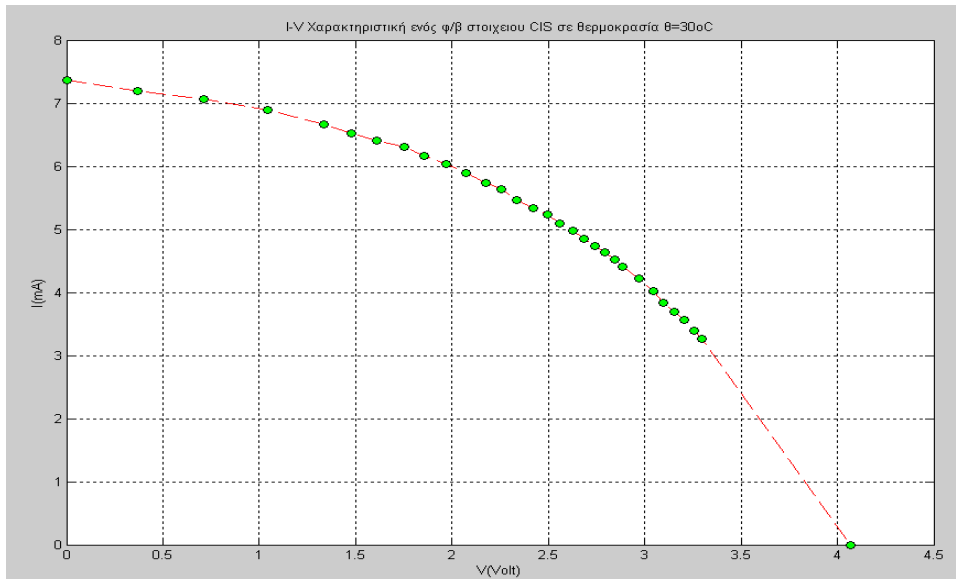
$$R_{series} = 260.6607 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 3254.5 \ \Omega$$

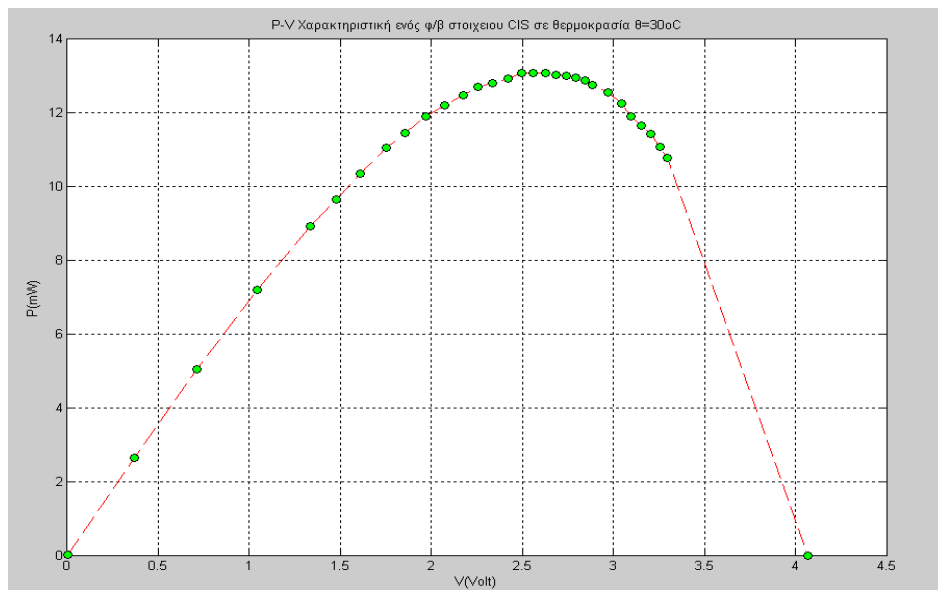
$$n = 5.06 \%$$

$$R_{Pmax} = 550 \ \Omega$$

5.4.2.4. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=30^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011



Σχήμα 5.35. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.36. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 13.0725 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 4.98 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.625 \text{ V}$$

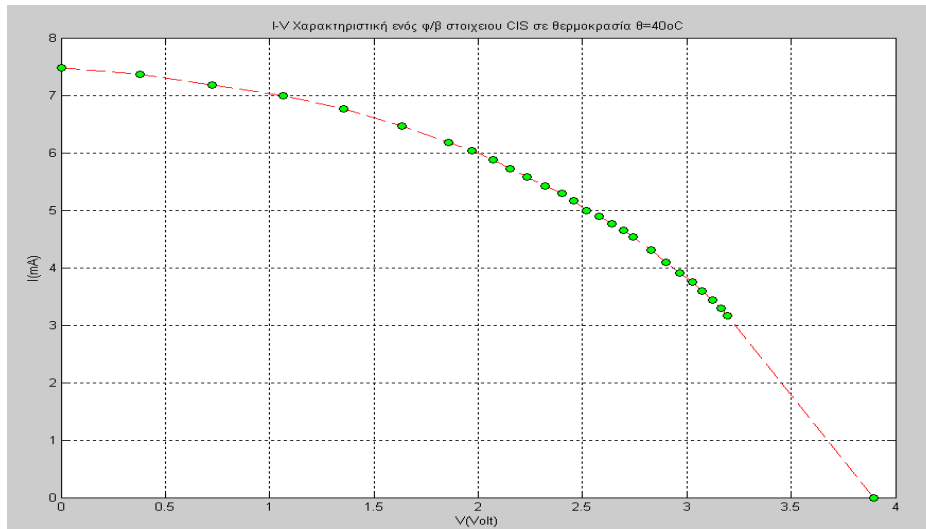
$$R_{series} = 236.0856 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 2022.2 \ \Omega$$

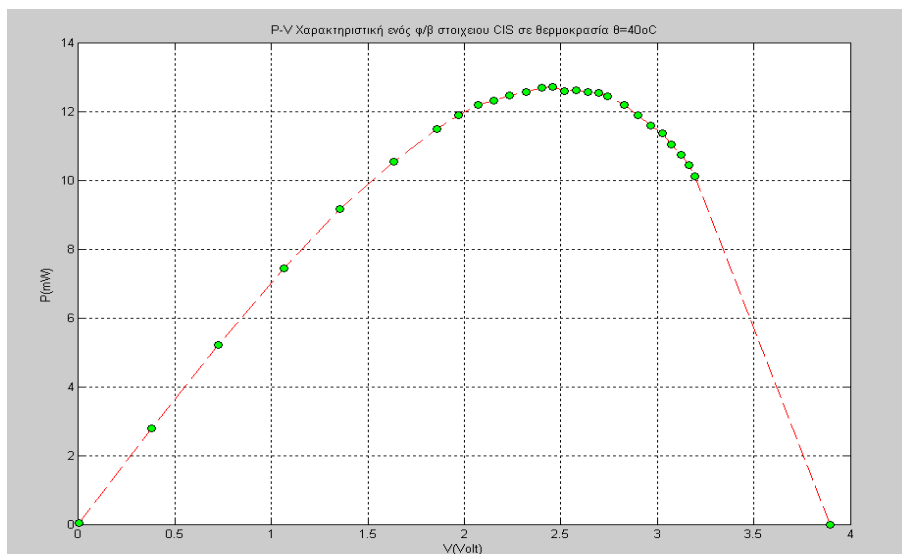
$$n = 4.97\%$$

$$R_{Pmax} = 525 \ \Omega$$

5.4.2.5. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=40^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011



Σχήμα 5.37. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.38. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 12.7027 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 5.17 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.457 \text{ V}$$

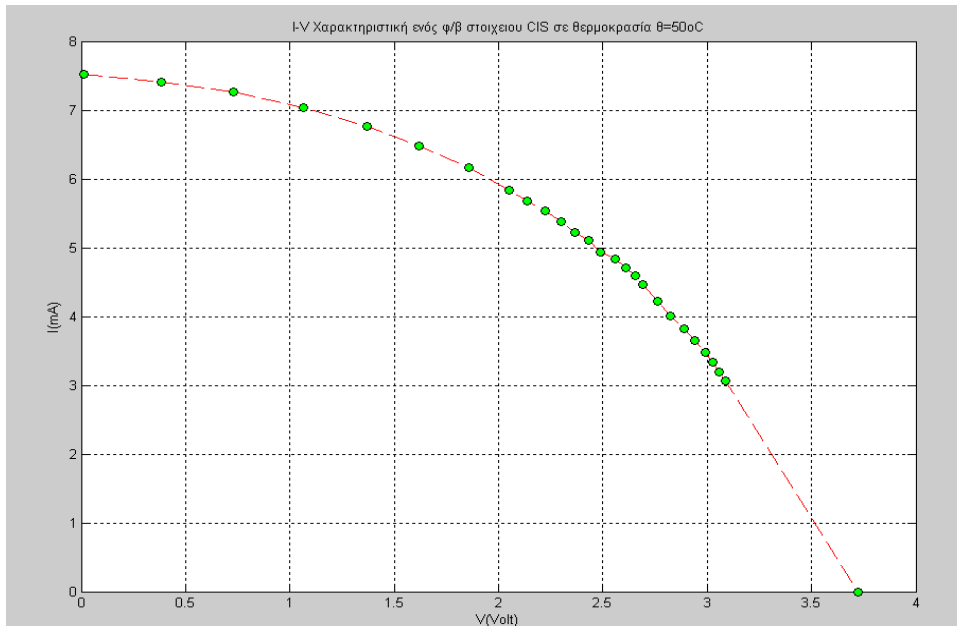
$$R_{series} = 222.082 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 3125 \ \Omega$$

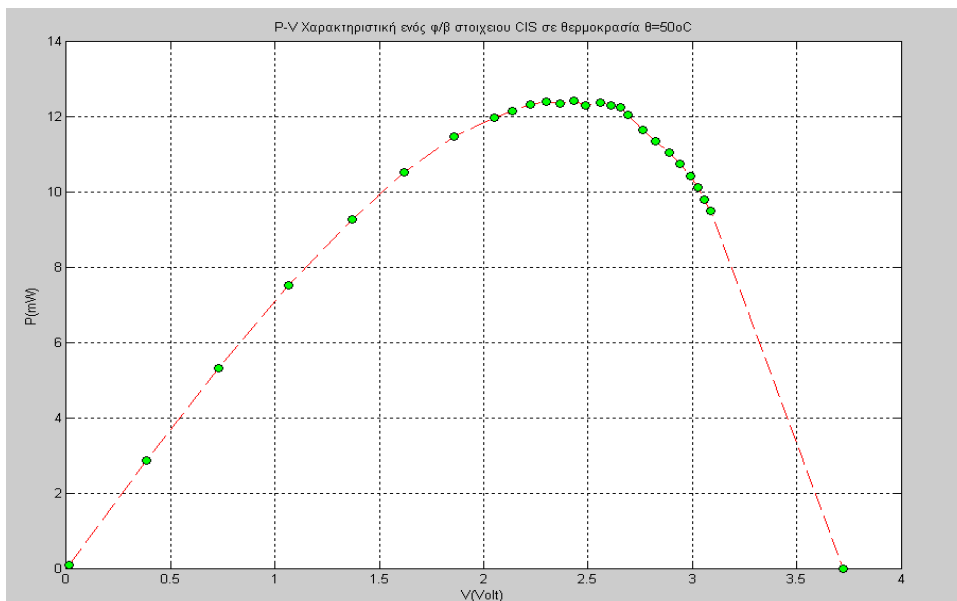
$$n = 4.83 \%$$

$$R_{Pmax} = 475 \ \Omega$$

5.4.2.6. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=50^\circ C$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011



Σχήμα 5.39. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.40. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 12.4173 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 5.11 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.43 \text{ V}$$

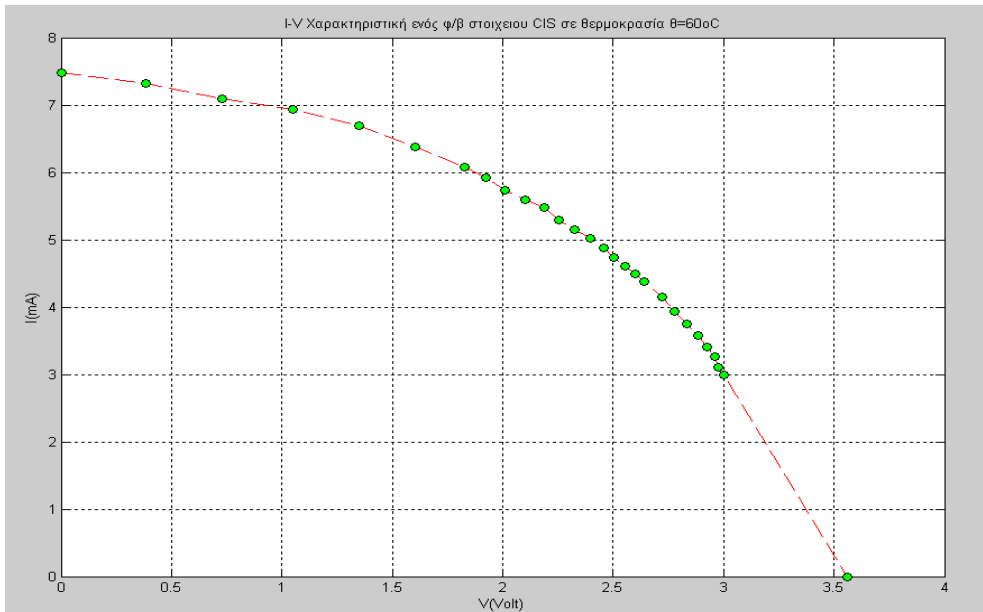
$$R_{series} = 206.5147 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 3381.8 \ \Omega$$

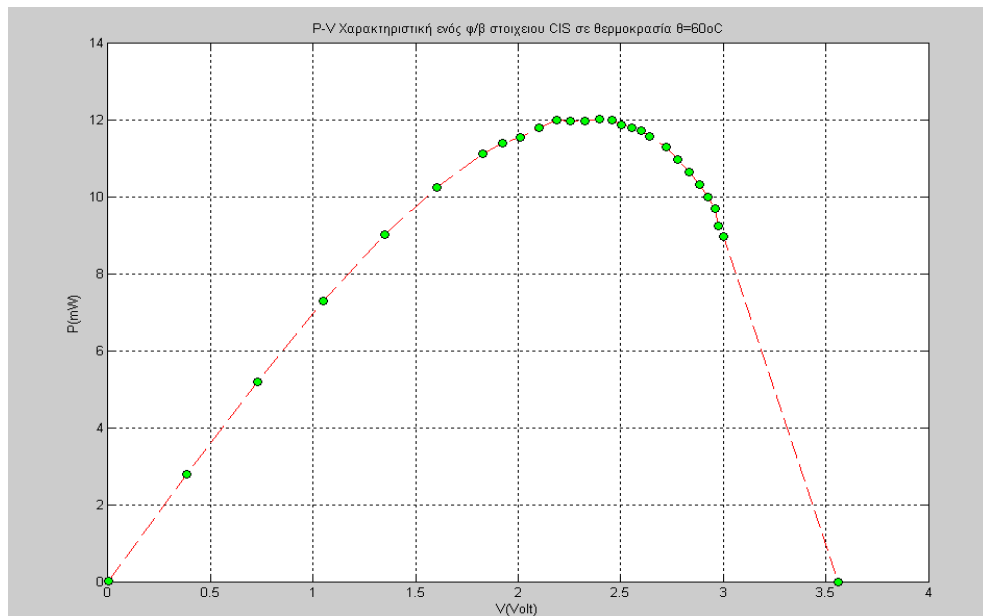
$$n = 4.73\%$$

$$R_{Pmax} = 475 \ \Omega$$

5.4.2.7. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός ϕ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=60^\circ C$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011



Σχήμα 5.41. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.42. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 12.0229 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 5.02 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.395 \text{ V}$$

$$R_{series} = 187.291 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 2368.7 \ \Omega$$

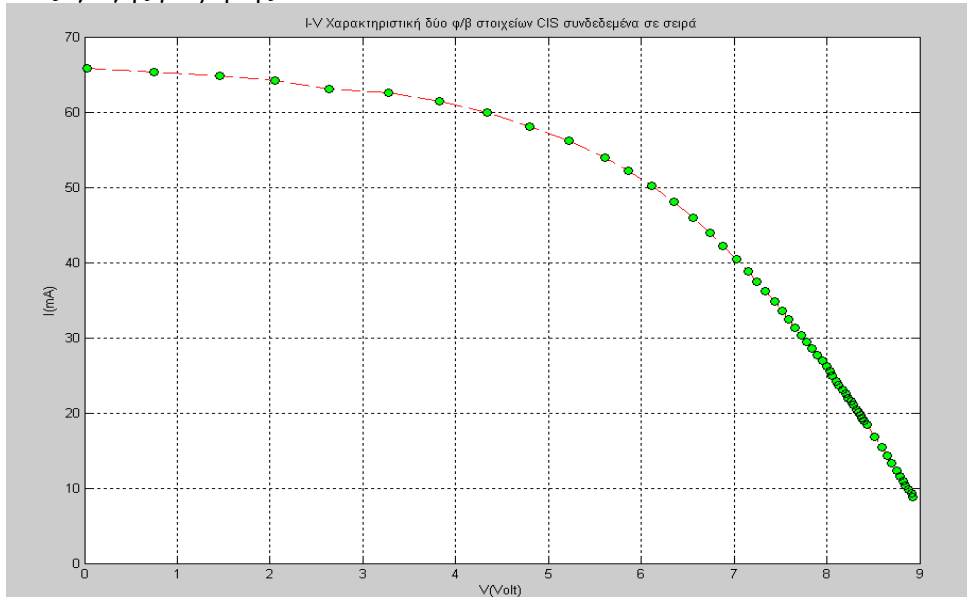
$$n = 4.6 \%$$

$$R_{Pmax} = 475 \ \Omega$$

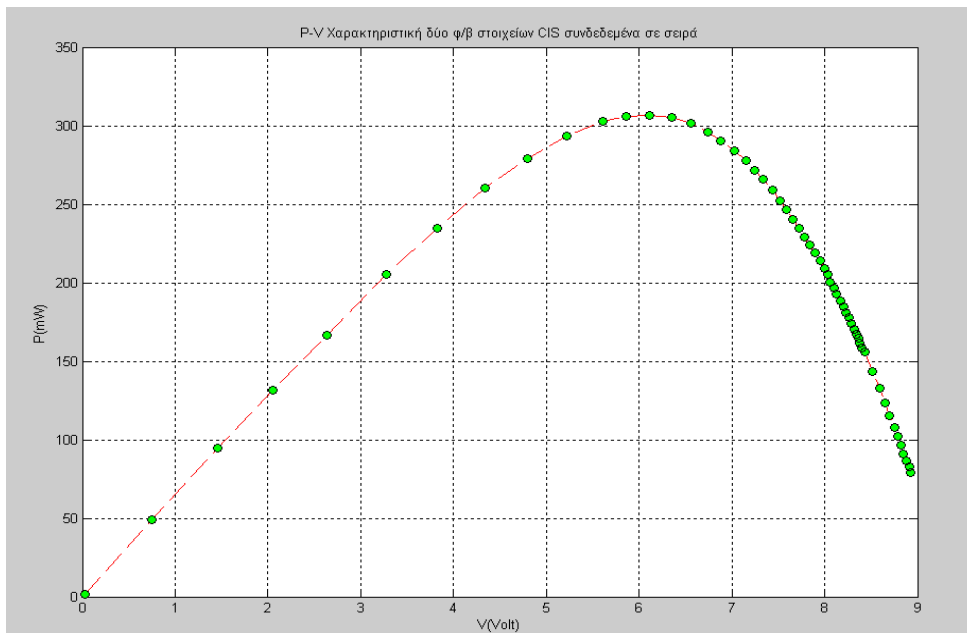
5.4.3. Μετρήσεις στοιχείων CIS σειριακής και παράλληλης συνδεσμολογίας

5.4.3.1. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ δύο φ/β στοιχείων CIS συνδεδεμένα σε σειρά σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=61.07\text{mW/cm}^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.43. Καμπύλη I-V.



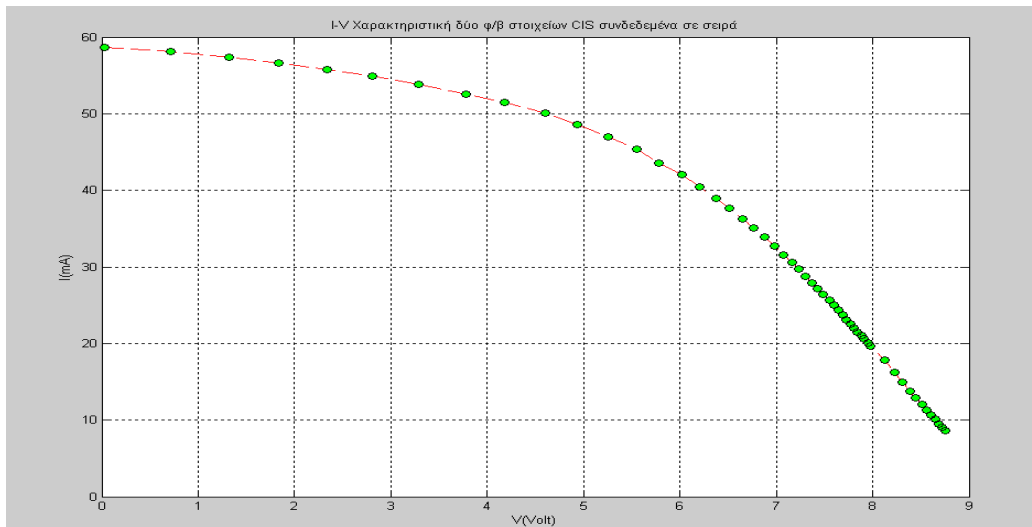
Σχήμα 5.44. Καμπύλη P-V.

$$\begin{aligned} P_{max} &= 306.8397 \text{ mW} \\ I_{Pmax} &= 50.17 \text{ mA} \\ V_{Pmax} &= 6.116 \text{ V} \end{aligned}$$

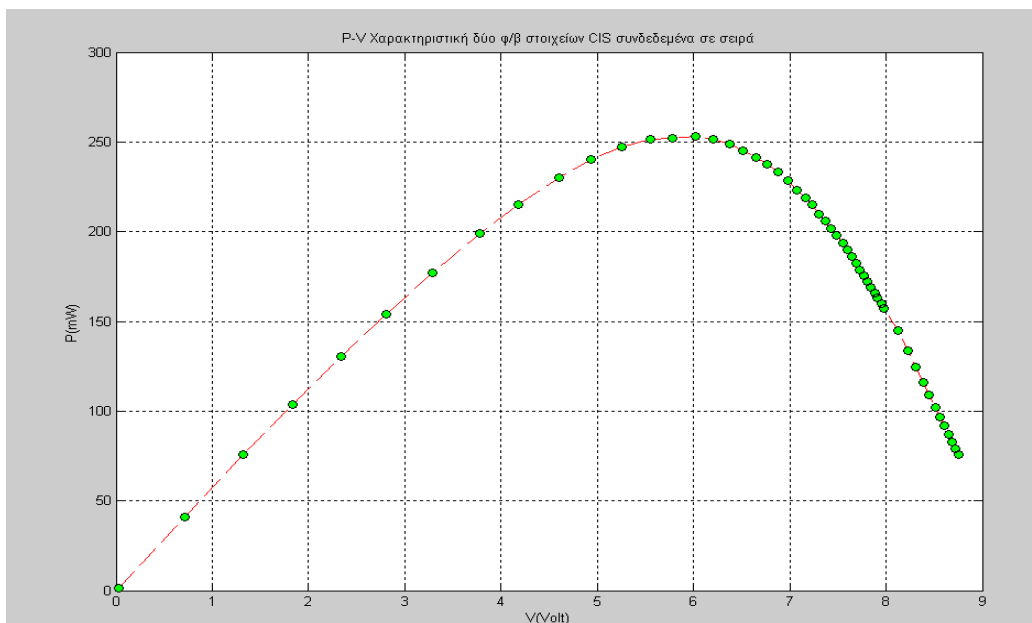
$$\begin{aligned} R_{series} &= 62.5 \ \Omega \\ R_{shunt} &= 1417.6 \ \Omega \\ n &= 6.978 \% \\ R_{Pmax} &= 120 \ \Omega \end{aligned}$$

5.4.3.2. Μετρήσεις δύο φ/β στοιχείων CIS συνδεδεμένων σε σειρά σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=54.77mW/cm^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.45. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.46. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 253.1467 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 42.03 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 6.023 \text{ V}$$

$$R_{series} = 69.7674 \text{ } \Omega$$

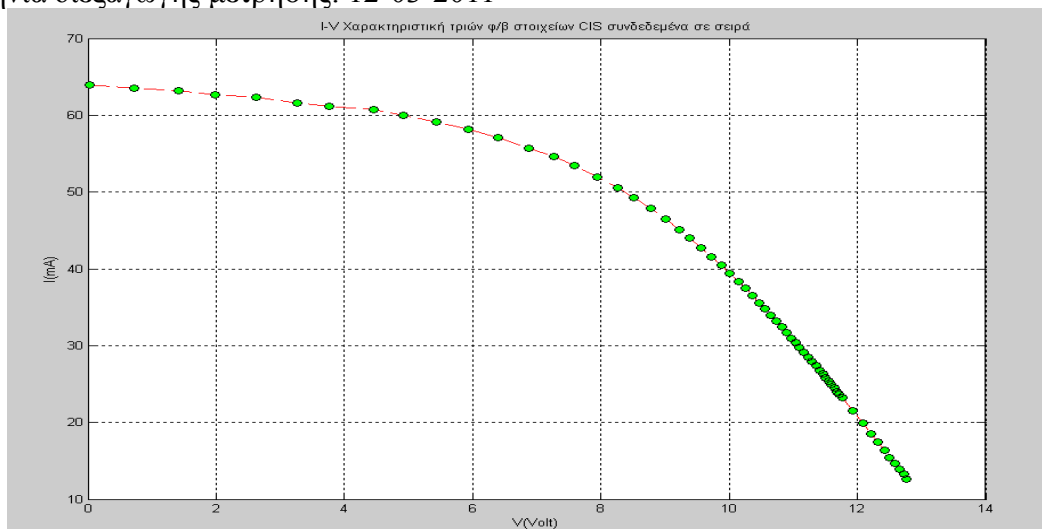
$$R_{shunt} = 1124.6 \text{ } \Omega$$

$$n = 6.419\%$$

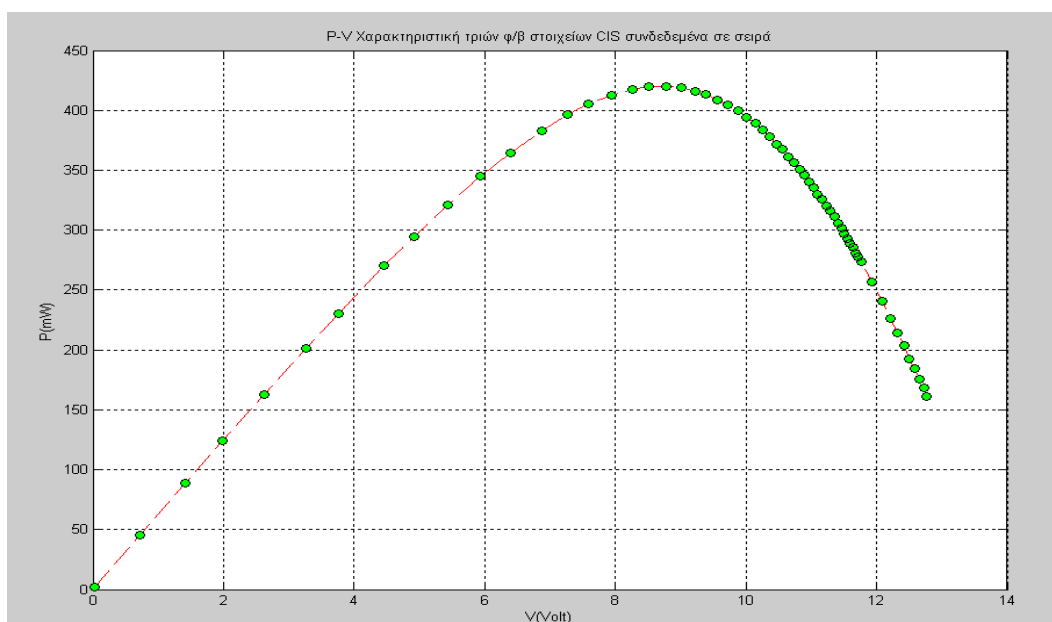
$$R_{Pmax} = 140 \text{ } \Omega$$

5.4.3.3. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ τριών p/n στοιχείων CIS συνδεδεμένων σε σειρά σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=59.74\text{mW/cm}^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.47. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.48. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 420.2108 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 47.86 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 8.78 \text{ V}$$

$$R_{series} = 80.6452 \ \Omega$$

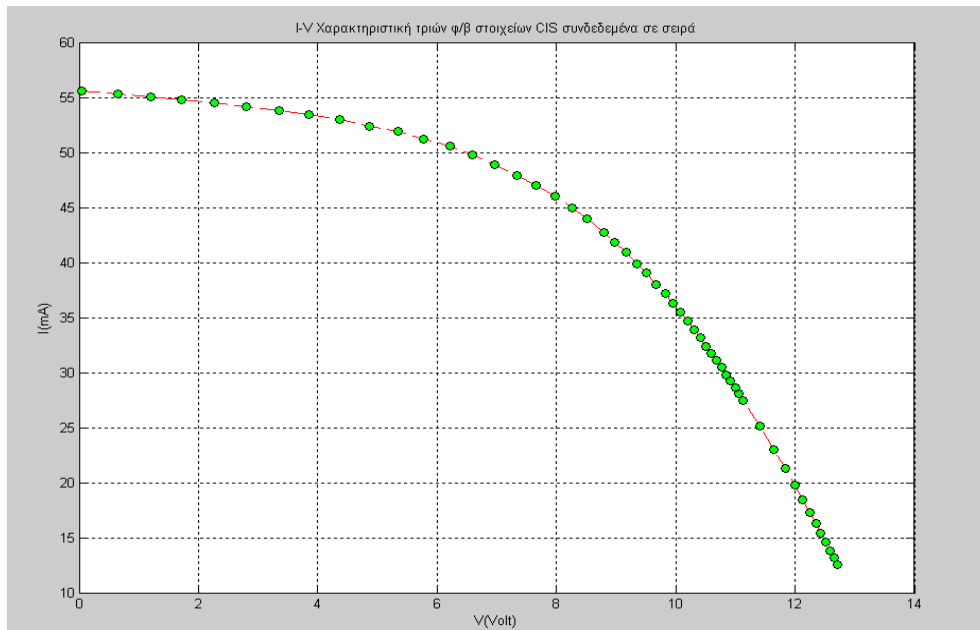
$$R_{shunt} = 2081.8 \ \Omega$$

$$n = 6.512\%$$

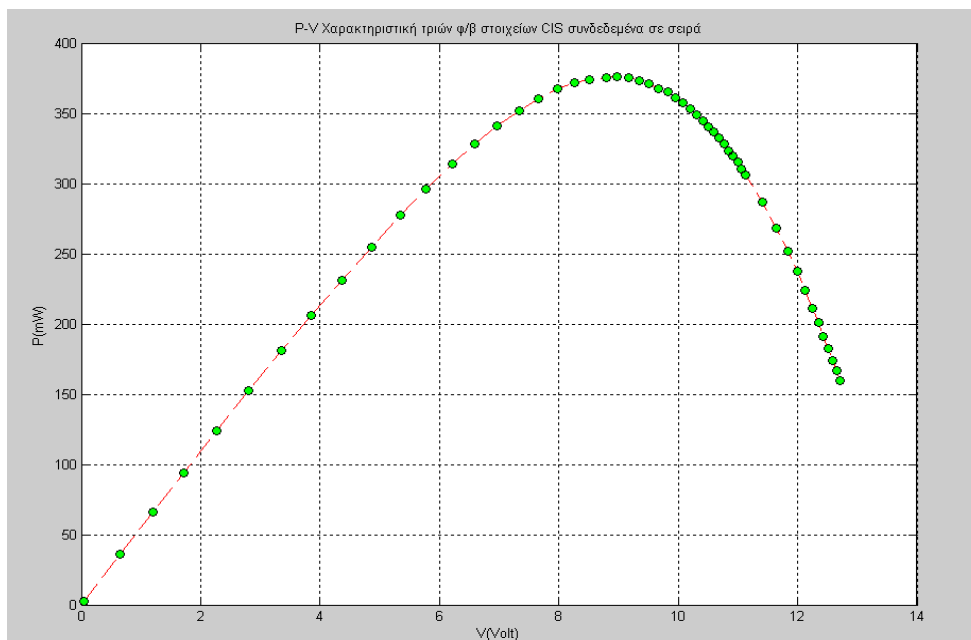
$$R_{Pmax} = 180 \ \Omega$$

5.4.3.4. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ τριών φ/β στοιχείων CIS συνδεδεμένων σε σειρά σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=52.9\text{mW/cm}^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.49. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.50. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 375.813 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 41.85 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 8.98 \text{ V}$$

$$R_{series} = 81.9672 \ \Omega$$

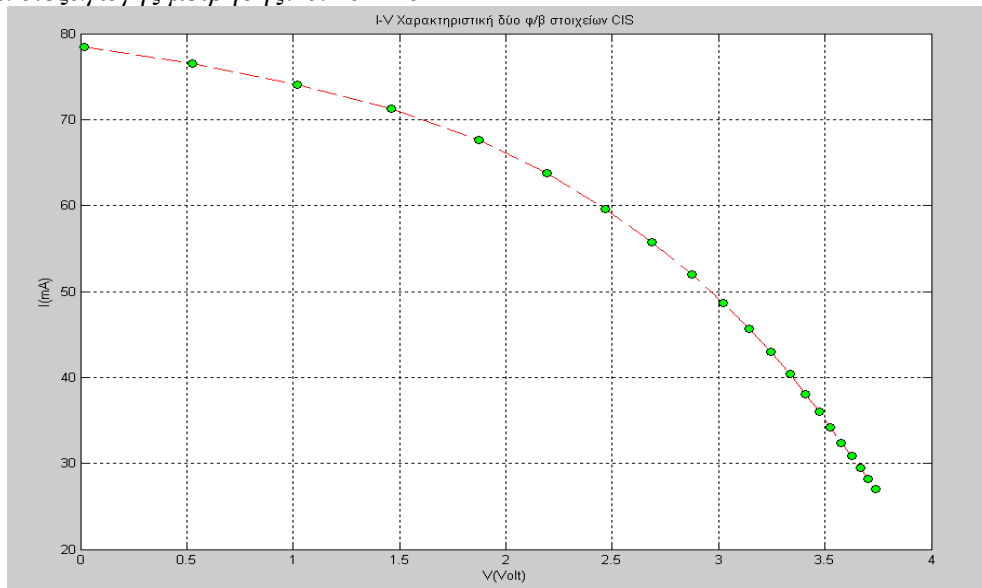
$$R_{shunt} = 1758.8 \ \Omega$$

$$n = 6.578\%$$

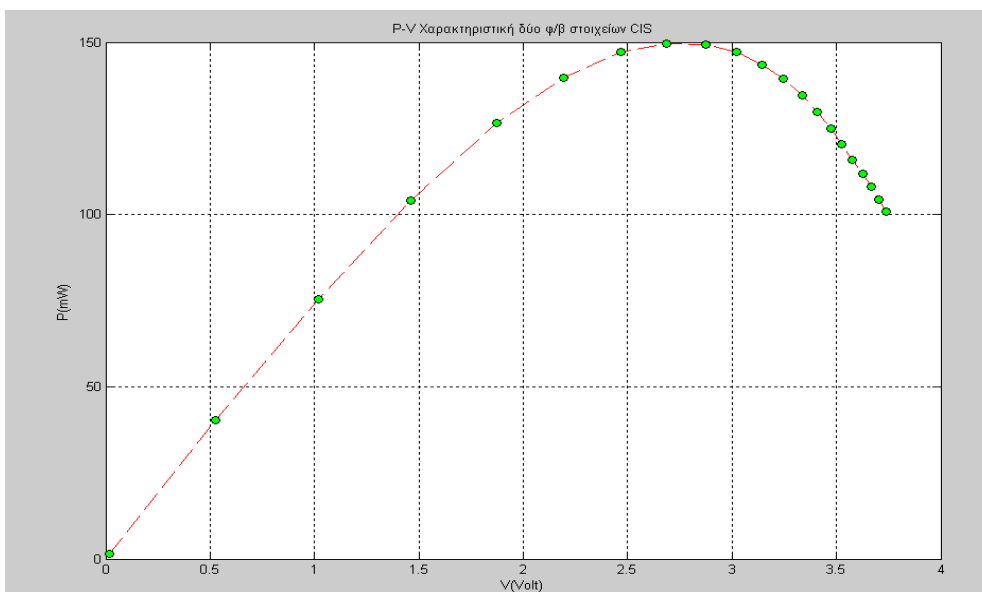
$$R_{Pmax} = 210 \ \Omega$$

5.4.3.5. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ δύο ϕ/β στοιχείων CIS συνδεδεμένων σε παράλληλια σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=51.4mW/cm^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 09-02-2011



Σχήμα 5.51. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.52. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 149.6639 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 55.72 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.686 \text{ V}$$

$$R_{series} = 29.661 \text{ } \Omega$$

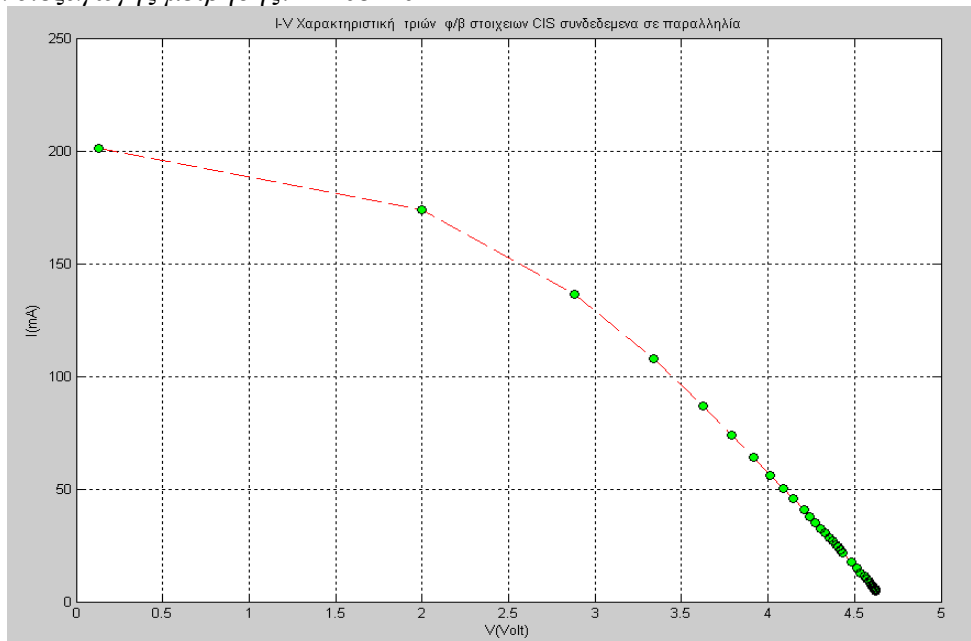
$$R_{shunt} = 275 \text{ } \Omega$$

$$n = 4.044 \%$$

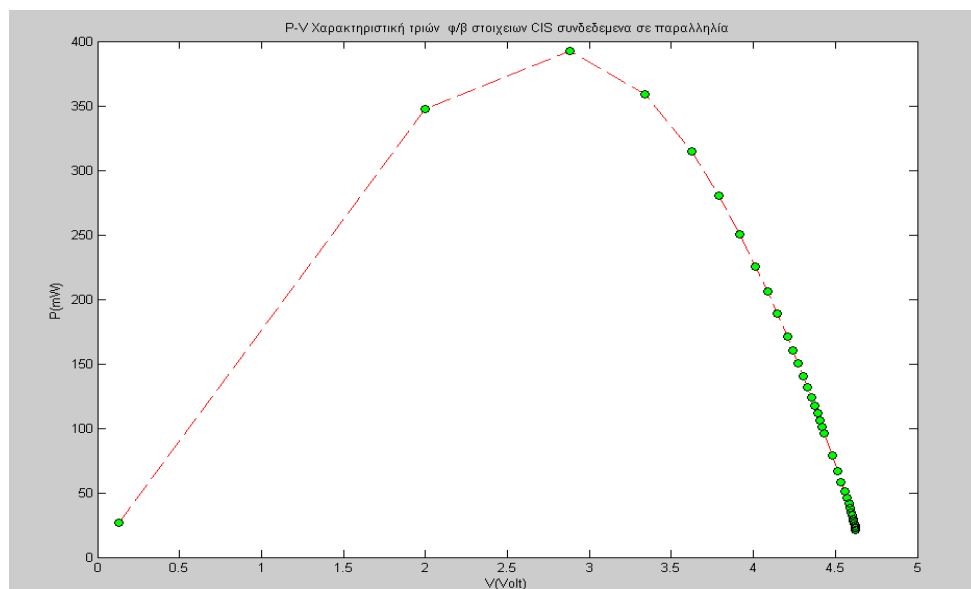
$$R_{Pmax} = 35 \text{ } \Omega$$

5.4.3.6. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ τριών ϕ/β στοιχείων CIS συνδεδεμένα σε παραλληλία σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=62.05mW/cm^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.53. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.54. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 392.3922 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 136.2 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.8810 \text{ V}$$

$$R_{series} = 4.3478 \ \Omega$$

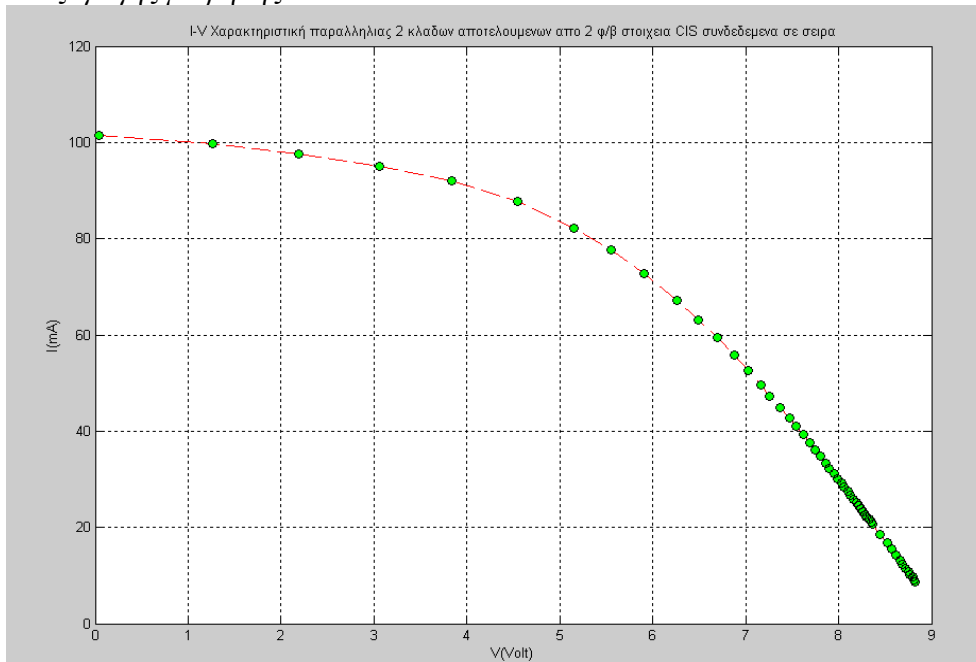
$$R_{shunt} = 69.1481 \ \Omega$$

$$n = 5.855\%$$

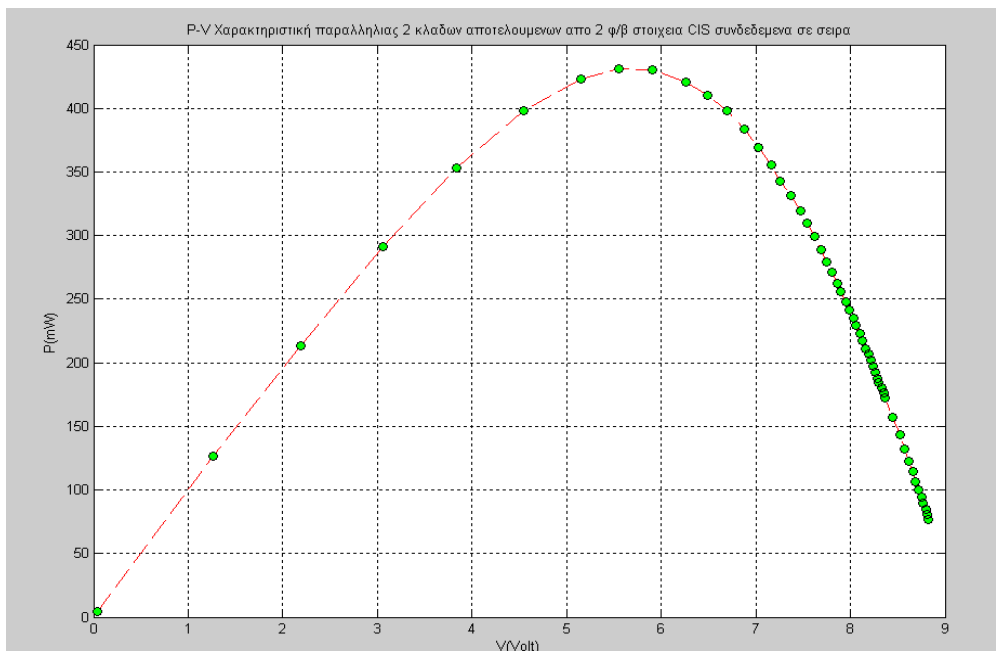
$$R_{Pmax} = 20 \ \Omega$$

5.4.3.7. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ φ/β συστήματος **4 στοιχείων CIS** (2 παράλληλοι κλάδοι αποτελούμενοι από δύο στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά) σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=48.3mW/cm^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



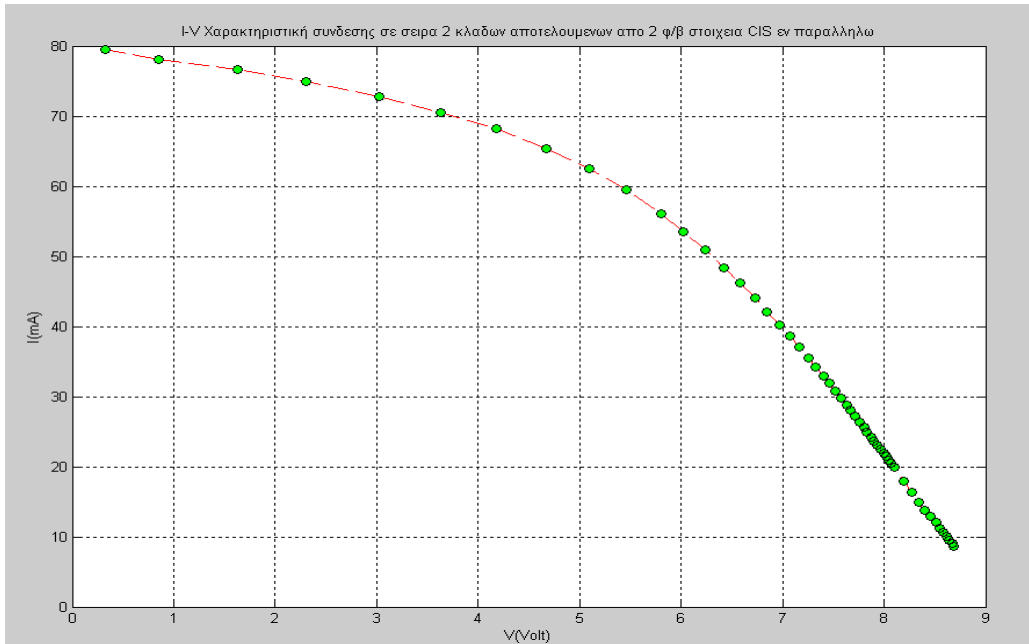
Σχήμα 5.55. Καμπύλη I-V.



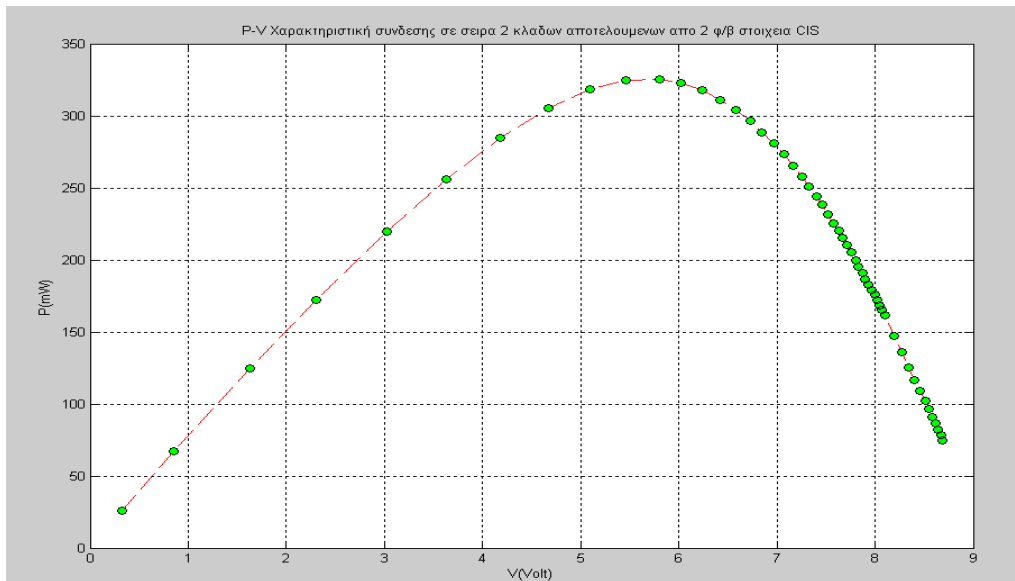
Σχήμα 5.56. Καμπύλη P-V.

$$\begin{aligned}
 P_{max} &= 431.0018 \text{ mW} & R_{series} &= 22.2222 \ \Omega \\
 I_{Pmax} &= 77.63 \text{ mA} & R_{shunt} &= 739.1566 \ \Omega \\
 V_{Pmax} &= 5.552 \text{ V} & n &= 6.197\% \\
 & & R_{Pmax} &= 70 \ \Omega
 \end{aligned}$$

5.4.3.8. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ φ/β συστήματος 4 στοιχείων CIS (2 εν σειρά κλάδοι αποτελούμενοι από δύο στοιχεία συνδεδεμένα σε παραλληλία) σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $H=38.45mW/cm^2$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011



Σχήμα 5.57. Καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.58. Καμπύλη P-V.

$$P_{max} = 325.4263 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 56.05 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 5.806 \text{ V}$$

$$R_{series} = 47.619 \ \Omega$$

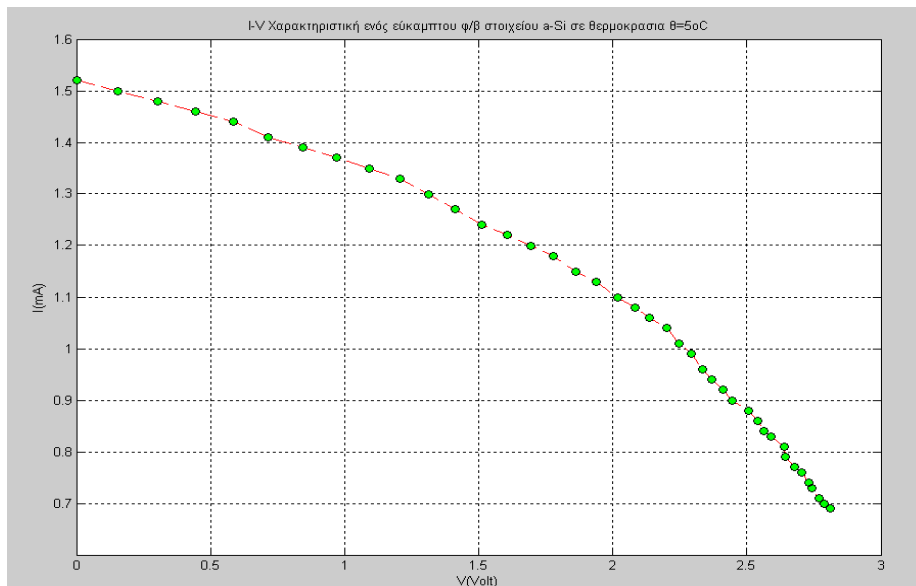
$$R_{shunt} = 358.5034 \ \Omega$$

$$n = 5.878\%$$

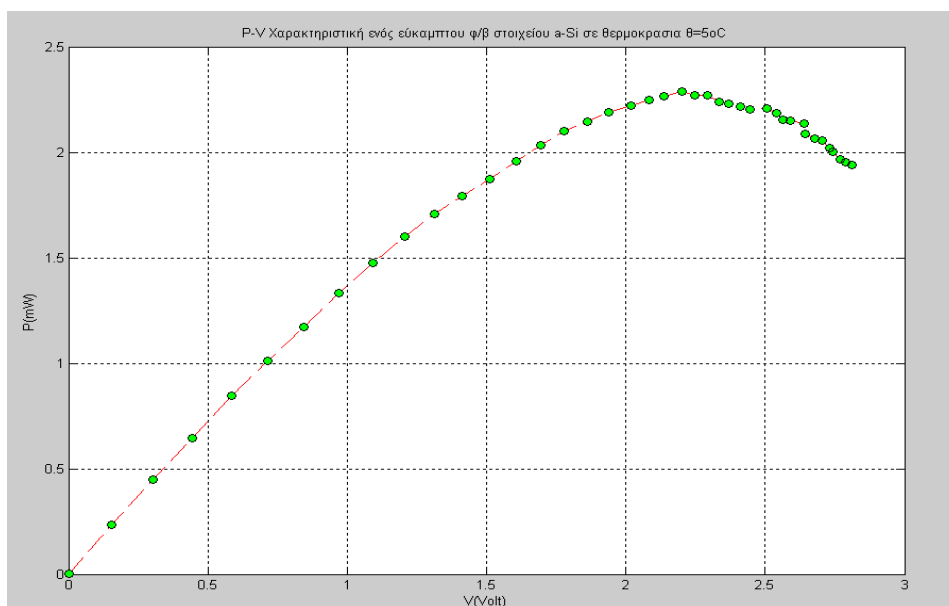
$$R_{Pmax} = 100 \ \Omega$$

5.4.4 Μετρήσεις εύκαμπτων στοιχείων α-Si σε διαφορετικές θερμοκρασίες

5.4.4.1. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός εύκαμπτου φ/β στοιχείου α-Si σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=5^\circ\text{C}$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011



Σχήμα 5.59. Καμπύλη I-V.

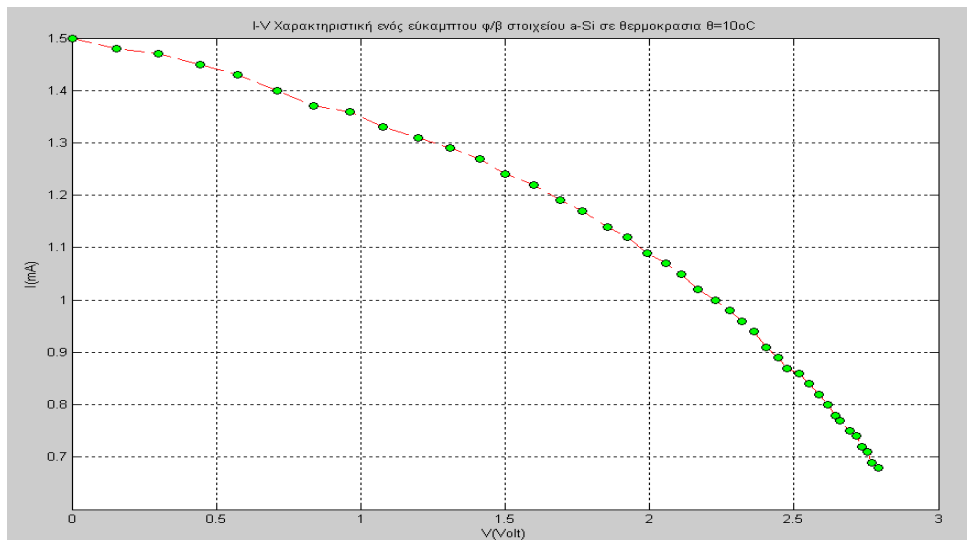


Σχήμα 5.60. Καμπύλη P-V.

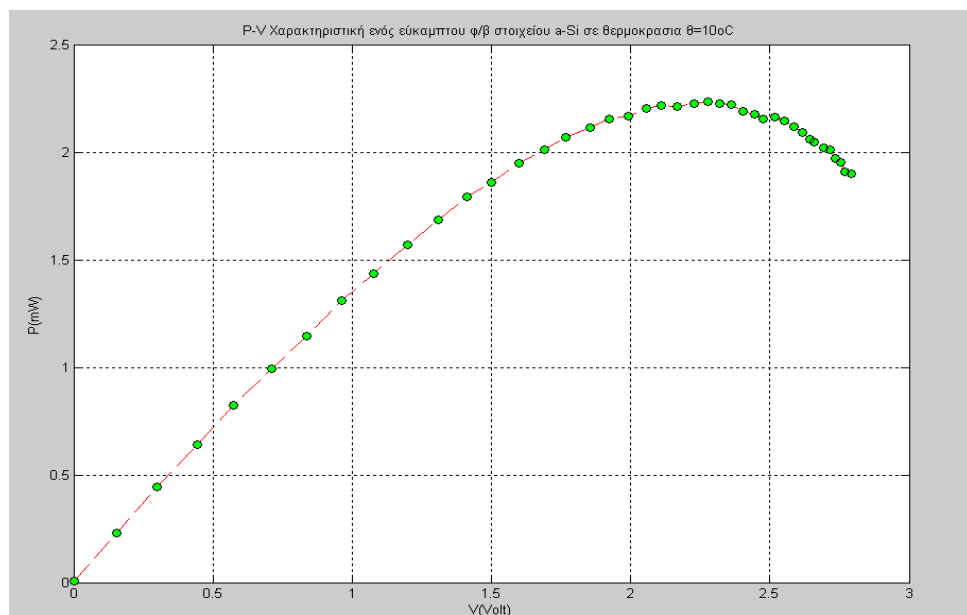
$$\begin{aligned} P_{max} &= 2.288 \text{ mW} \\ I_{Pmax} &= 1.04 \text{ mA} \\ V_{Pmax} &= 2.200 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{series} &= 2300 \ \Omega \\ R_{shunt} &= 7750 \ \Omega \\ n &= 0.83\% \\ R_{Pmax} &= 2100 \ \Omega \end{aligned}$$

5.4.4.2. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός εύκαμπτου ϕ/β στοιχείου $a-Si$ σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=10^\circ C$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011



Σχήμα 5.61. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.62. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 2.2324 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 0.98 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.278 \text{ V}$$

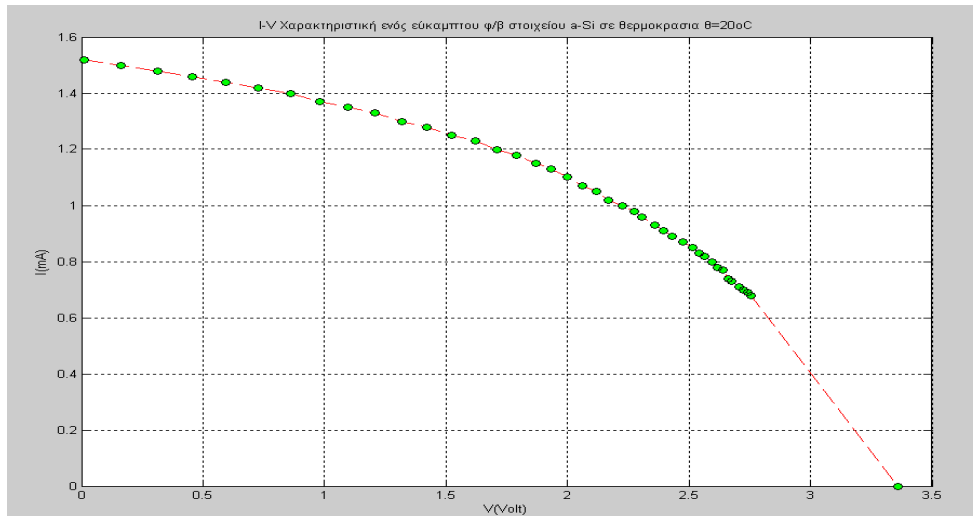
$$R_{series} = 2500 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 7600 \ \Omega$$

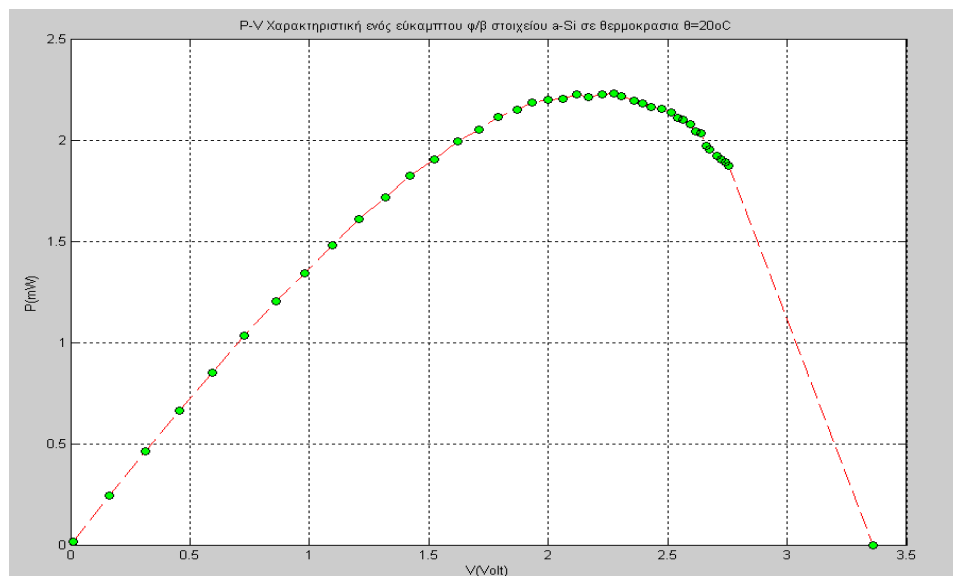
$$n = 0.81 \%$$

$$R_{Pmax} = 2300 \ \Omega$$

5.4.4.3. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός εύκαμπτου ϕ/β στοιχείου $a-Si$ σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ C$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011



Σχήμα 5.63. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.64. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 2.2305 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 0.98 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.276 \text{ V}$$

$$R_{series} = 889.7059 \ \Omega$$

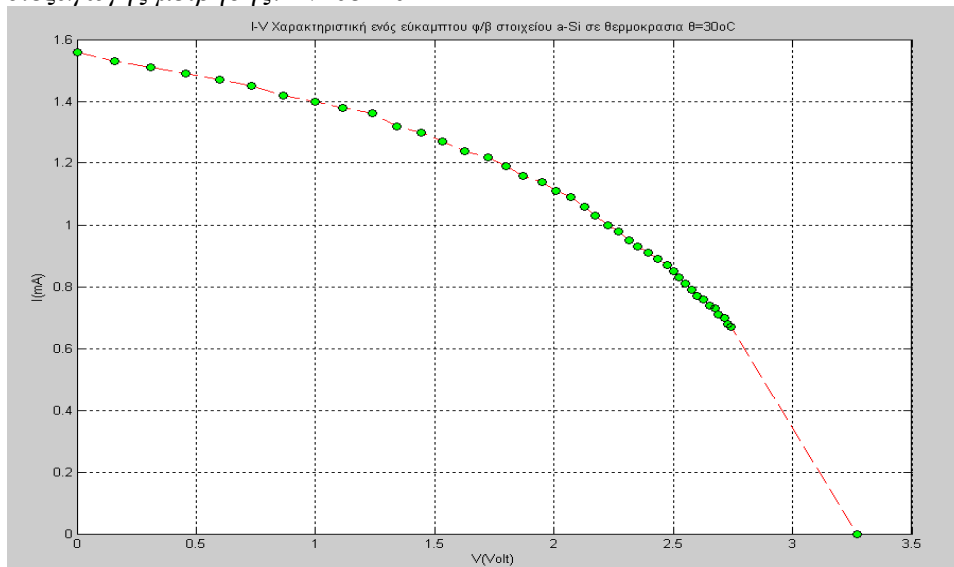
$$R_{shunt} = 7600 \ \Omega$$

$$n = 0.81 \%$$

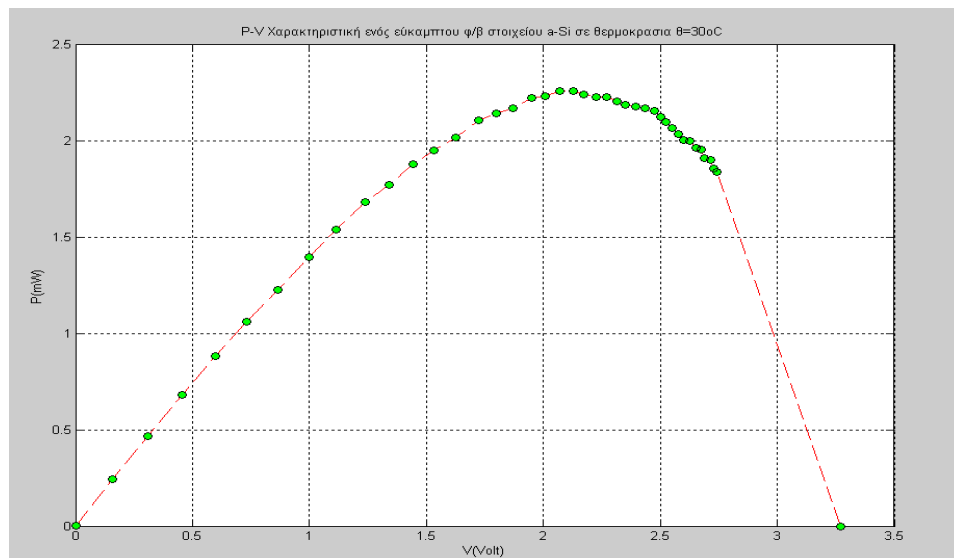
$$R_{Pmax} = 2300 \ \Omega$$

5.4.4.4. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός εύκαμπτου α/β στοιχείου $a-Si$ σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=30^\circ C$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011



Σχήμα 5.65. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.66. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 2.2578 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 1.06 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.13 \text{ V}$$

$$R_{series} = 791.0448 \ \Omega$$

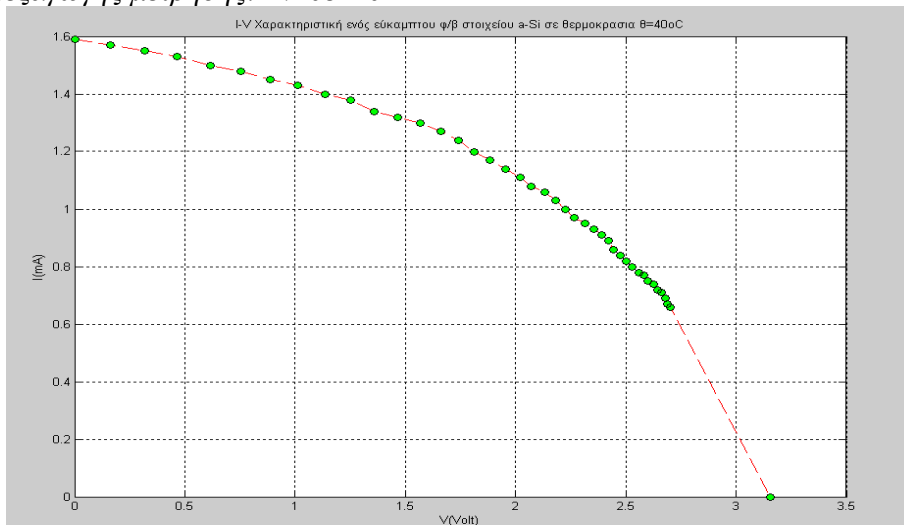
$$R_{shunt} = 5200 \ \Omega$$

$$n = 0.82 \%$$

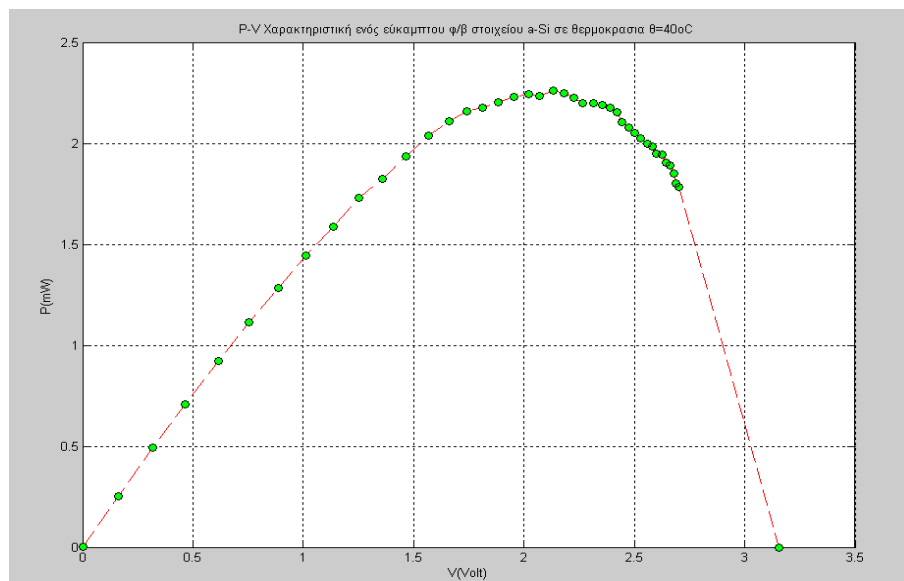
$$R_{Pmax} = 2000 \ \Omega$$

5.4.4.5. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός εύκαμπτου ϕ/β στοιχείου $a-Si$ σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=40^\circ C$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011



Σχήμα 5.67. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.68. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 2.2599 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 1.06 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.132 \text{ V}$$

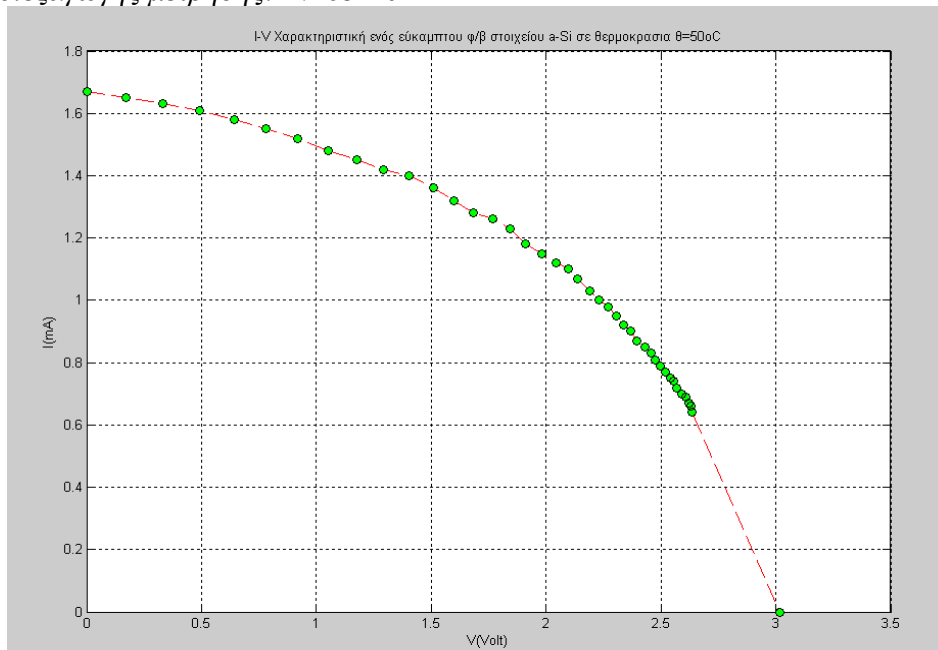
$$R_{series} = 690.9091 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 7950 \ \Omega$$

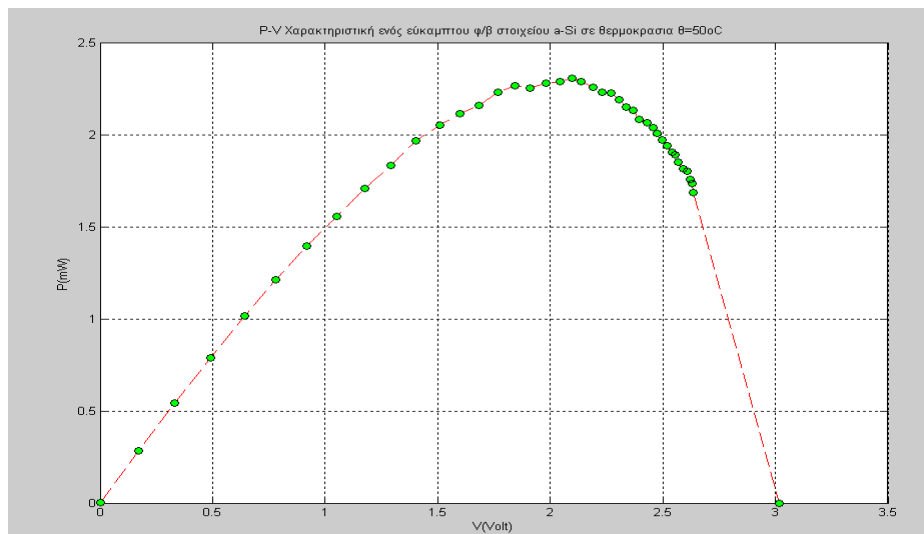
$$n = 0.82 \%$$

$$R_{Pmax} = 2000 \ \Omega$$

5.4.4.6. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός εύκαμπτου α/β στοιχείου $a-Si$ σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=50^\circ C$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011



Σχήμα 5.69. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.70. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 2.3045 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 1.10 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.095 \text{ V}$$

$$R_{series} = 593.75 \ \Omega$$

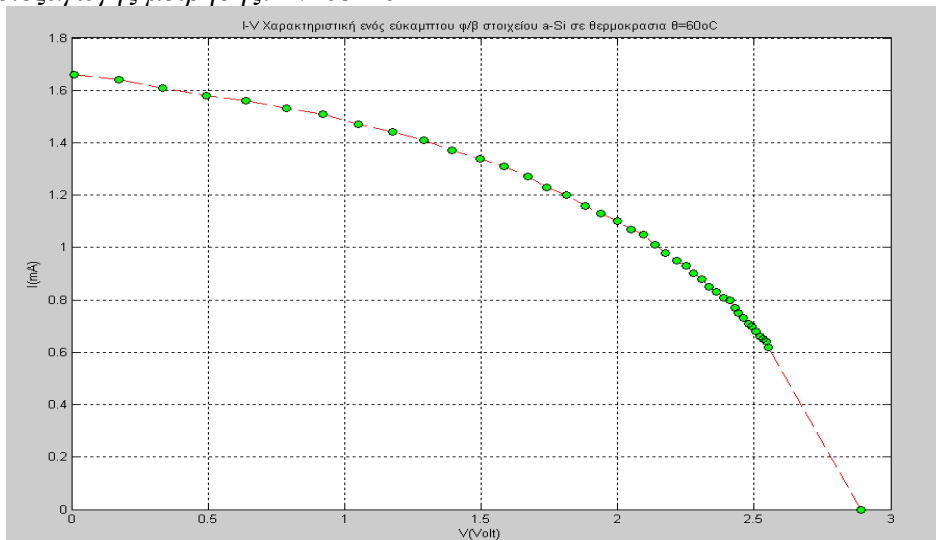
$$R_{shunt} = 8550 \ \Omega$$

$$n = 0.84\%$$

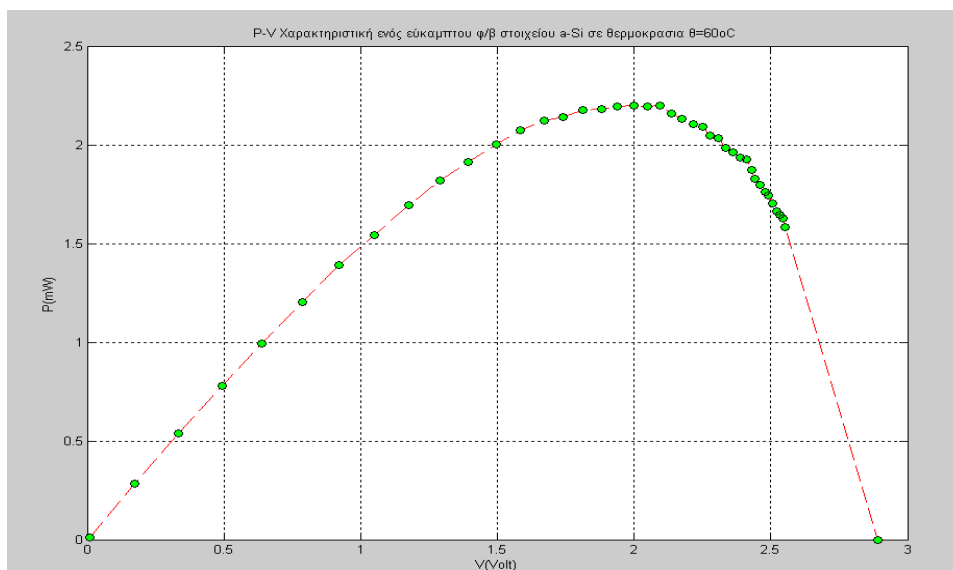
$$R_{Pmax} = 1900 \ \Omega$$

5.4.4.7. Καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός εύκαμπτου ϕ/β στοιχείου $a-Si$ σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7.3mW/cm^2$ σε θερμοκρασία $\theta=60^\circ C$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011



Σχήμα 5.71. Καμπύλη $I-V$.



Σχήμα 5.72. Καμπύλη $P-V$.

$$P_{max} = 2.20 \text{ mW}$$

$$I_{Pmax} = 1.10 \text{ mA}$$

$$V_{Pmax} = 2.0 \text{ V}$$

$$R_{series} = 545.1613 \ \Omega$$

$$R_{shunt} = 8250 \ \Omega$$

$$n = 0.79\%$$

$$R_{Pmax} = 1800 \ \Omega$$

5.5.Μελέτη των καμπυλών $I-V$, $P-V$ και συμπεράσματα

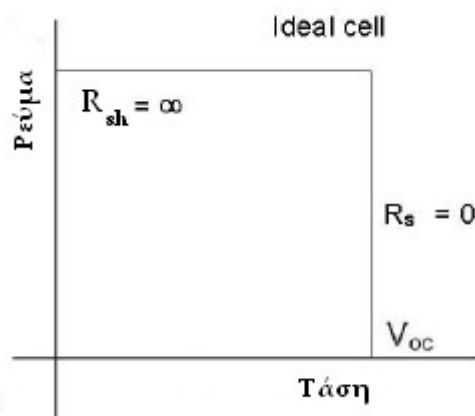
Στην προηγούμενη ενότητα, σχεδιάστηκαν οι καμπύλες $I-V$ και $P-V$ δύο φ/β στοιχείων διαφορετικής τεχνολογίας σε ποικίλες συνθήκες ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και συνδεσμολογίας. Υπολογίστηκαν οι τιμές της εκάστοτε μέγιστης ισχύος, το σημείο μέγιστης ισχύος, καθώς και οι εσωτερικές αντιστάσεις σειράς και παραλληλίας. Αξίζει να μελετηθούν περαιτέρω τα γραφικά αποτελέσματα καθώς και να σχεδιαστούν και να σχολιαστούν συνδυαστικά γραφήματα.

5.5.1. Το βήμα αύξησης της αντίστασης του φορτίου

Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι το βήμα με το οποίο αυξάνεται η αντίσταση του φορτίου, καθορίζει κατά μεγάλο ποσοστό την μορφή των καμπυλών και το πόσο ευανάγνωστες αυτές είναι όσον αφορά τα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν. Επί παραδείγματι, οι γραφικές παραστάσεις στις υποενότητες 5.4.1.1 και 5.4.1.5 έχουν ικανοποιητική μορφή και είναι ευανάγνωστες, ήτοι σημαίνει ότι το βήμα στο ποτενσιόμετρο καθώς και η τιμή της μέγιστης αντίστασης αυτού, επέτρεψαν την συλλογή δεδομένων για το σημείο μέγιστης ισχύος και για τις αντιστάσεις σειράς και παραλληλίας με μικρό σφάλμα. Αντιθέτως, γραφικές παραστάσεις όπως αυτές που σχεδιάστηκαν στις υποενότητες 5.4.1.4 και 5.4.3.6 δεν μπορούν να θεωρηθούν ως ιδανικές αφού και στις δύο περιπτώσεις, το βήμα του ποτενσιόμετρου είναι τέτοιο που δεν επιτρέπει γραφικά την ομαλή μετάβαση από το σημείο εκκίνησης έως το σημείο μέγιστης ισχύος, ούτε δίνει σαφή εικόνα της θέσης του σημείου μέγιστης ισχύος.

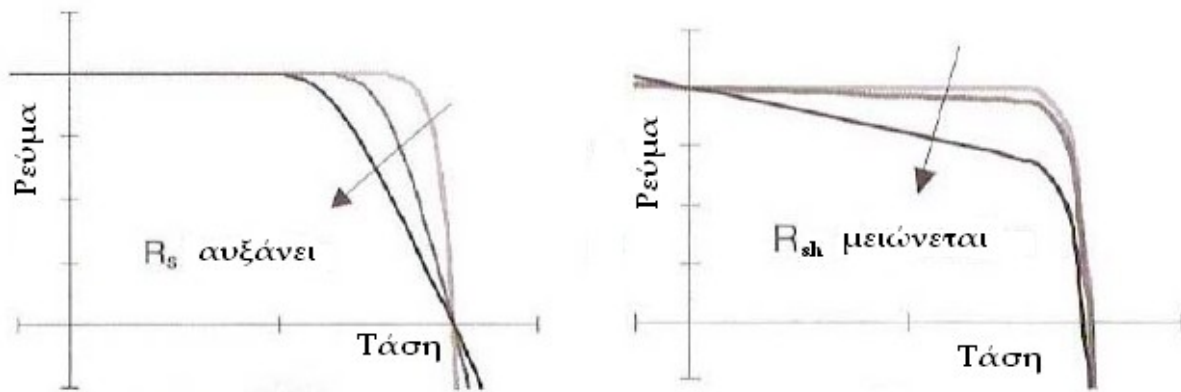
5.5.2. Παρασιτικές αντιστάσεις

Σε προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η καμπύλη $I-V$ ενός ιδανικού φ/β στοιχείου



Σχήμα 5.72.Χαρακτηριστική $I-V$ ιδανικού φ/β στοιχείου.

Οι απαιτούμενες συνθήκες όμως για μηδενική αντίσταση σειράς και άπειρη αντίσταση παραλληλίας δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν από κατασκευαστικής άποψης, συνεπώς οι καμπύλες $I-V$ παραμορφώνονται όπως παρακάτω

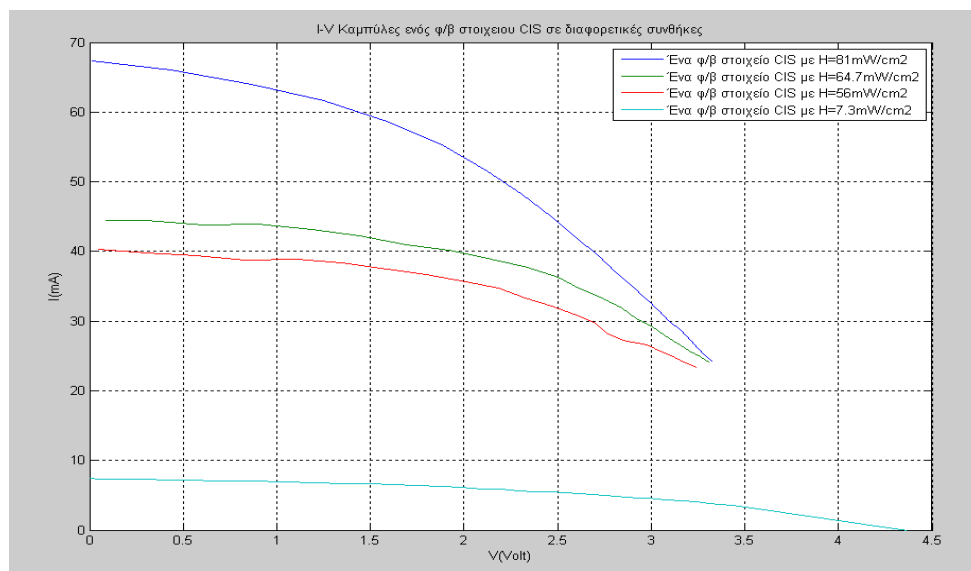


Σχήμα 5.73. Απόκλιση από την ιδανική καμπύλη $I-V$ λόγω παρασιτικών αντιστάσεων.

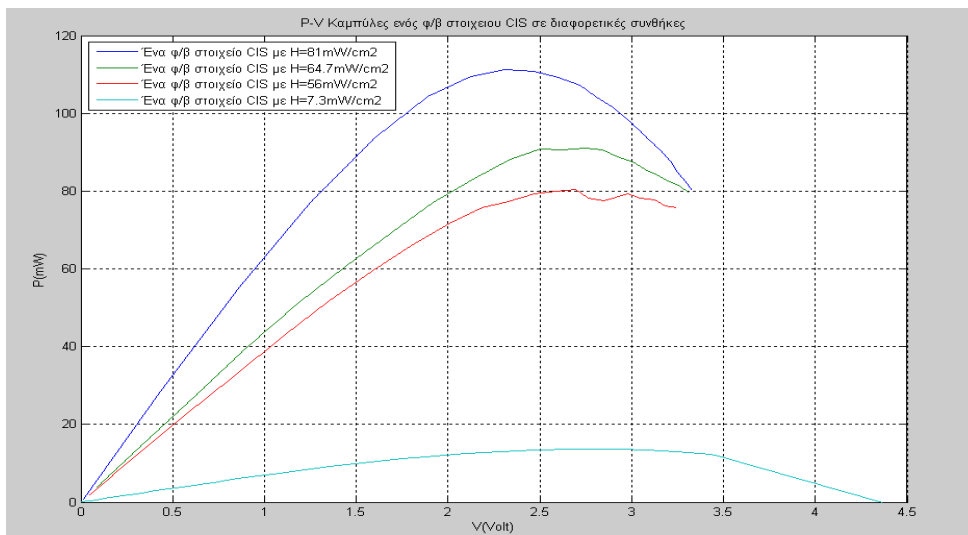
Η απόκλιση των καμπυλών $I-V$ των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, από την ιδανική, είναι εμφανής και οφείλεται σε παράγοντες που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5.5.3. Η επίδραση της έντασης ακτινοβολίας

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η αυξομείωση της έντασης της ακτινοβολίας έχει ανάλογη επίδραση στο ρεύμα βραχυκύκλωσης και στην τάση ανοιχτόκύκλωσης. Το φαινόμενο αυτό, παρατηρείται και στις παρακάτω συνδυαστικές καμπύλες $I-V$, $P-V$ φ/β στοιχείων CIS των οποίων τα δεδομένα συλλέχθηκαν σε διαφορετικές εντάσεις H .



Σχήμα 5.74. Χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ του ίδιου φ/β στοιχείου σε διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας.

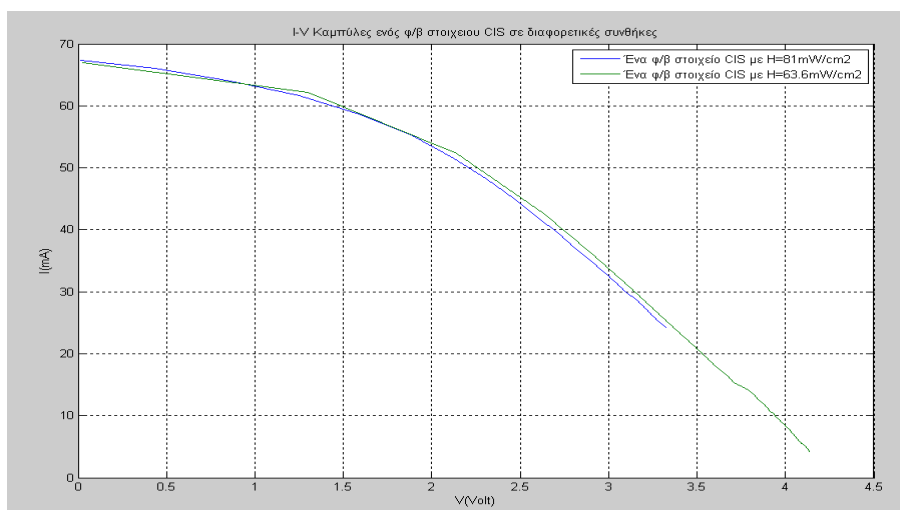


Σχήμα 5.75. Χαρακτηριστικές καμπύλες P-V του ίδιου φ/β στοιχείου σε διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας.

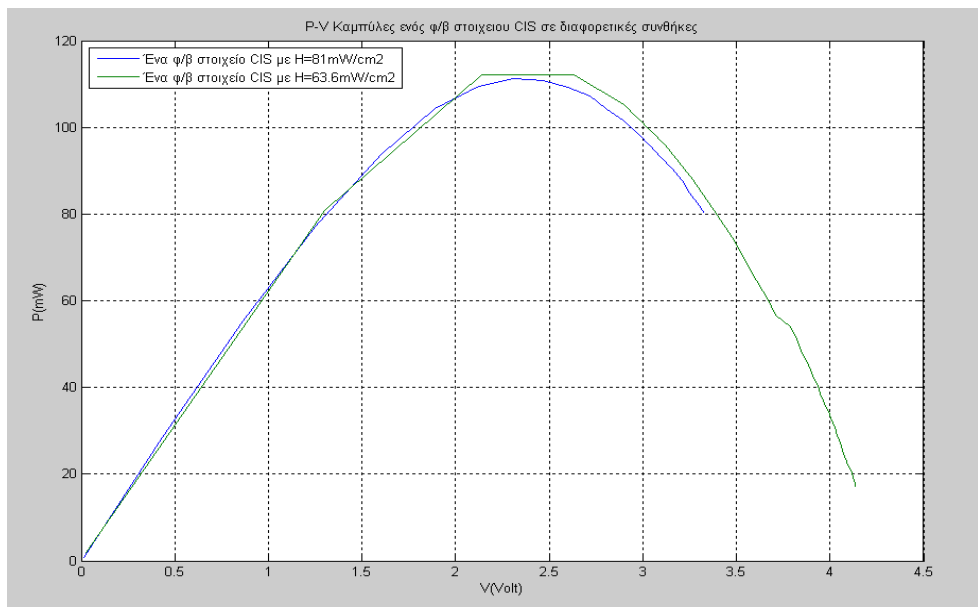
Είναι εμφανές ότι το ρεύμα και η τάση για το φ/β στοιχείο που ακτινοβολείται με μεγαλύτερη ένταση, είναι μεγαλύτερα από αυτά των στοιχείων που ακτινοβολούνται ασθενέστερα, συνεπώς υπάρχει και η αντίστοιχη διαφορά στην τιμή της μέγιστης ισχύος. Ακόμη, παρατηρείται η πολύ ασθενής απόδοση του στοιχείου που διεγείρεται από λαμπτήρα πυρακτώσεως και όχι από το φάσμα του ηλίου, κάτι το οποίο οφείλεται αφενός στην μικρή ένταση ακτινοβολίας του λαμπτήρα αλλά και από το φτωχό του, σε ενεργά φωτόνια, φάσμα.

5.5.4. Διάρκεια ακτινοβολίας

Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί η ιδιότητα των συγκεκριμένων φ/β στοιχείων CIS που χρησιμοποιήθηκαν, να φτάνουν την μέγιστη απόδοσή τους, ύστερα από 3 ώρες λειτουργίας. Σε αυτή την ιδιότητα θεωρείται ότι οφείλεται και η αρκετά παραπλήσια εικόνα των 2 καμπυλών I-V του ίδιου στοιχείου σε εντάσεις $H_1=81\text{mW/cm}^2$ και $H_2=63.6\text{mW/cm}^2$ όπου στην πρώτη περίπτωση η μέτρηση έγινε άμεσα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το στοιχείο λειτούργησε 4 ώρες προτού συλλεχθούν τα δεδομένα.



Σχήμα 5.76. Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του ίδιου φ/β στοιχείου σε διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας με διαφορετικό χρόνο προλειτουργίας.

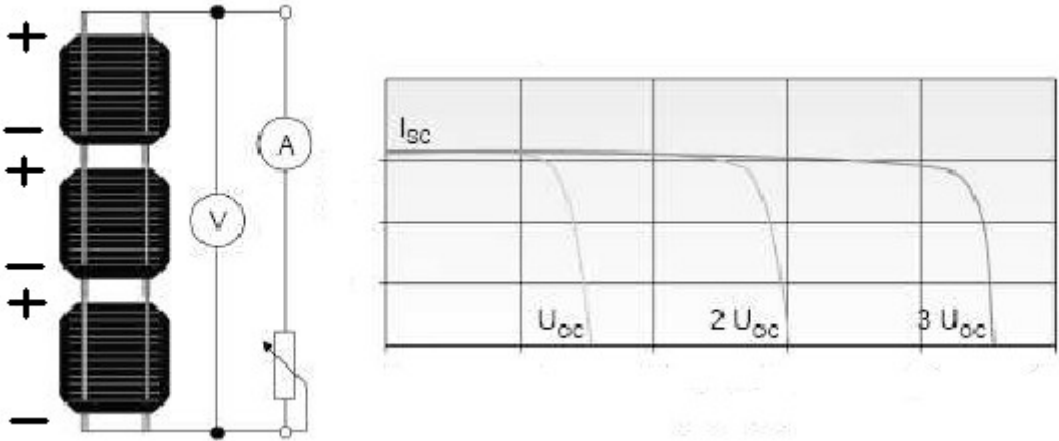


Σχήμα 5.77. Χαρακτηριστικές καμπύλες $P-V$ του ίδιου ϕ/β στοιχείου σε διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας με διαφορετικό χρόνο προλειτουργίας.

Η μέγιστη ισχύς για τις 2 περιπτώσεις είναι $P_{max81}=111.342mW$ με απόδοση $n_{81}=3.866\%$ και $P_{max63.6}=112.14mW$ με απόδοση $n_{63.6}=4.899\%$. Η διαφορά στην απόδοση έγκειται στο γεγονός ότι στη δεύτερη περίπτωση, η ίδια ισχύς προσφέρεται με μικρότερη ένταση ακτινοβολίας.

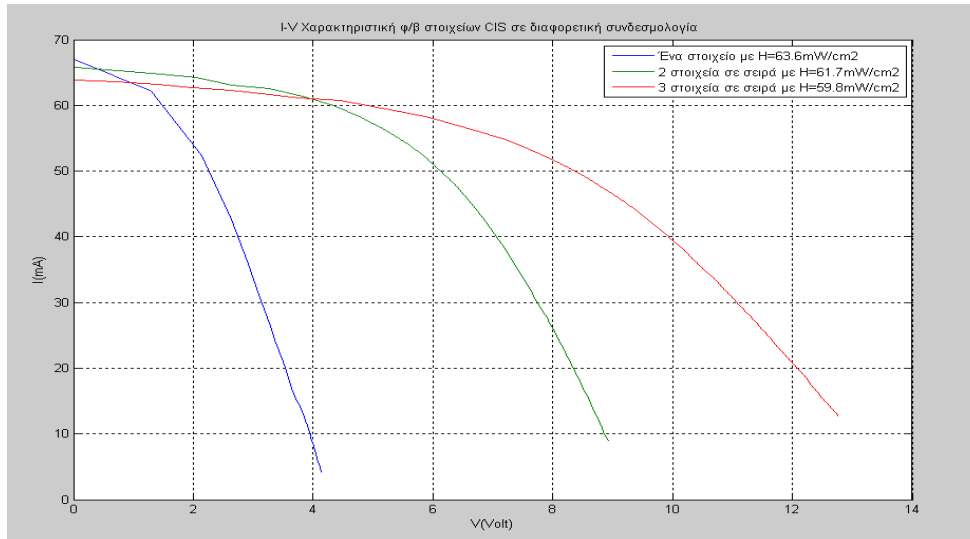
5.5.5. Σύνδεση σε σειρά

Η σύνδεση σε σειρά πολλών ϕ/β στοιχείων ίδιου τύπου, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παρεχόμενης τάσης εξόδου με αμετάβλητο το ρεύμα εξόδου.

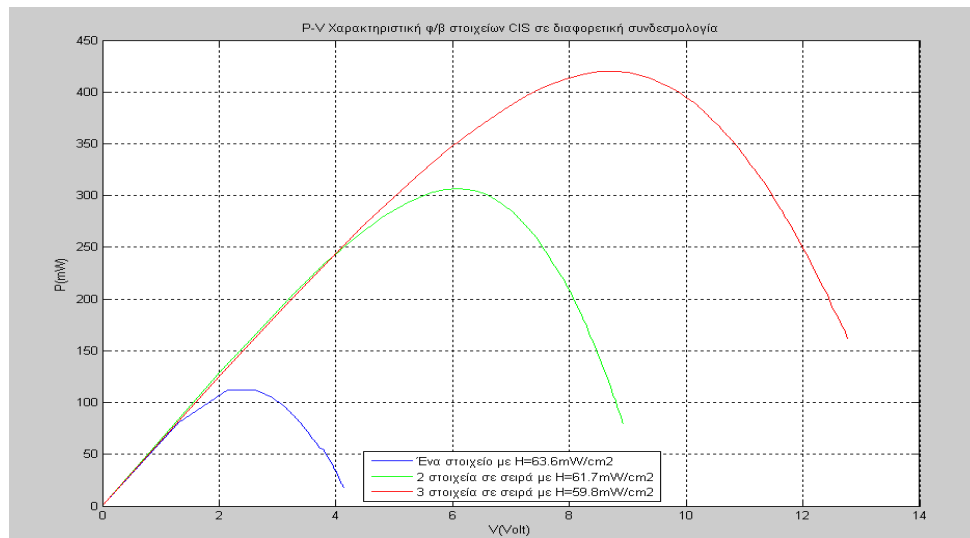


Σχήμα 5.78. Σύνδεση ϕ/β στοιχείων σε σειρά.

Αυτό φαίνεται κ στις παρακάτω καμπύλες όπου παρουσιάζονται στο ίδιο γράφημα οι καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός στοιχείου, δύο στοιχείων σε σειρά και τριών στοιχείων σε σειρά σε όσο το δυνατόν κοντινές συνθήκες ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.79. Χαρακτηριστικές $I-V$ ενός στοιχείου CIS, δύο σε σειρά και τριών σε σειρά.

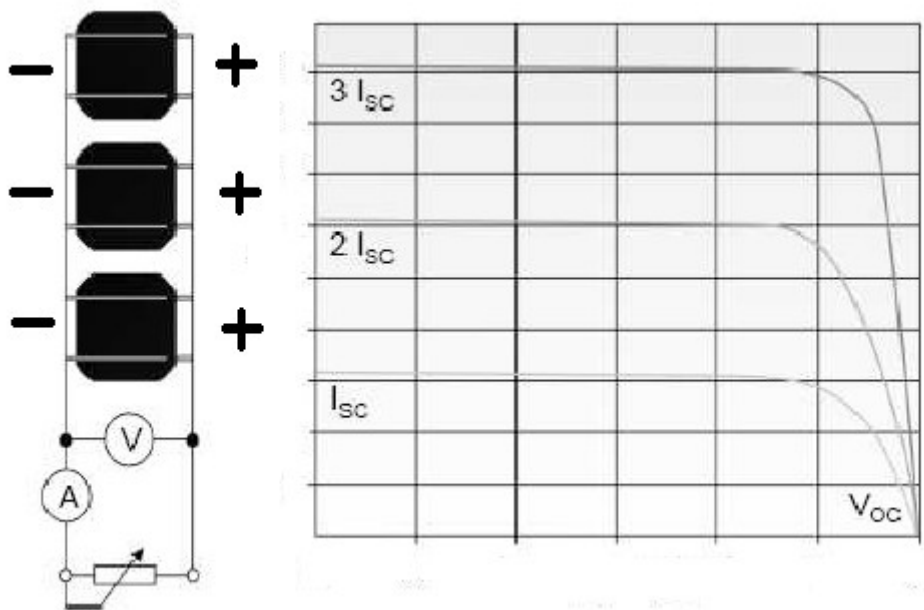


Σχήμα 5.80. Χαρακτηριστικές $P-V$ ενός στοιχείου CIS, δύο σε σειρά και τριών σε σειρά.

Στις καμπύλες $I-V$ φαίνεται ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι όμοιο και στις 3 περιπτώσεις συνδεσμολογίας, ενώ η τάση εξόδου διπλασιάζεται με την προσθήκη ενός ϕ/β στοιχείου στο κύκλωμα. Αναμενόμενη είναι και η αύξηση στην μέγιστη ισχύ εξόδου με $P_1=112.14mW$, $P_2=306.8397mW$ και $P_3=420.2108mW$ ενώ το σημείο λειτουργίας μεταφέρεται από το $Q_1=(52.4mA, 2.14V)$ στο $Q_2=(50.17mA, 6.116V)$ και τελικά στο $Q_3=(47.86mA, 8.78V)$

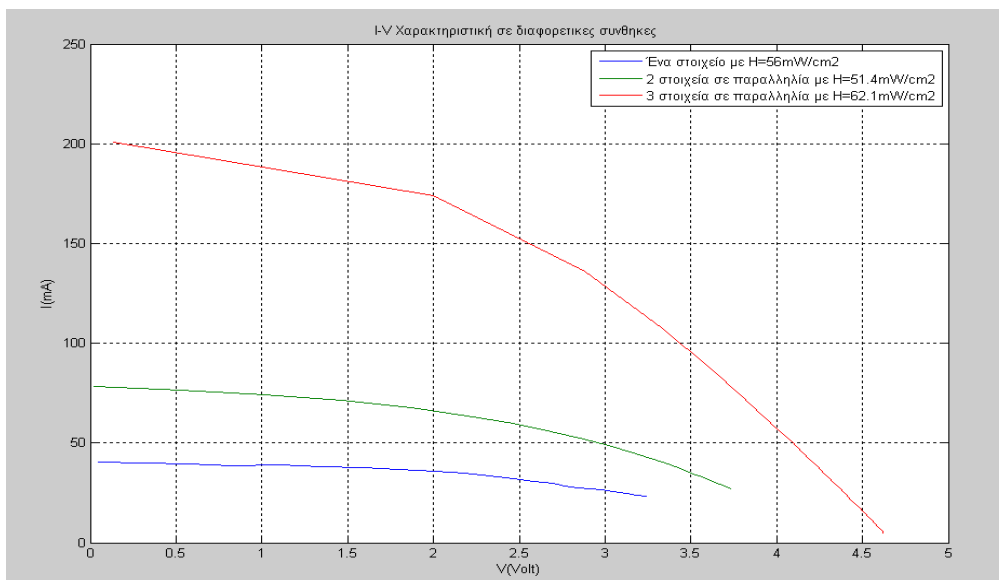
5.5.6. Σύνδεση σε παραλληλία

Παρόμοια αλλαγή παρατηρείται και στην εν παραλλήλω σύνδεση των φ/β στοιχείων, με το ρεύμα να αυξάνεται και την τάση να παραμένει στα ίδια επίπεδα.

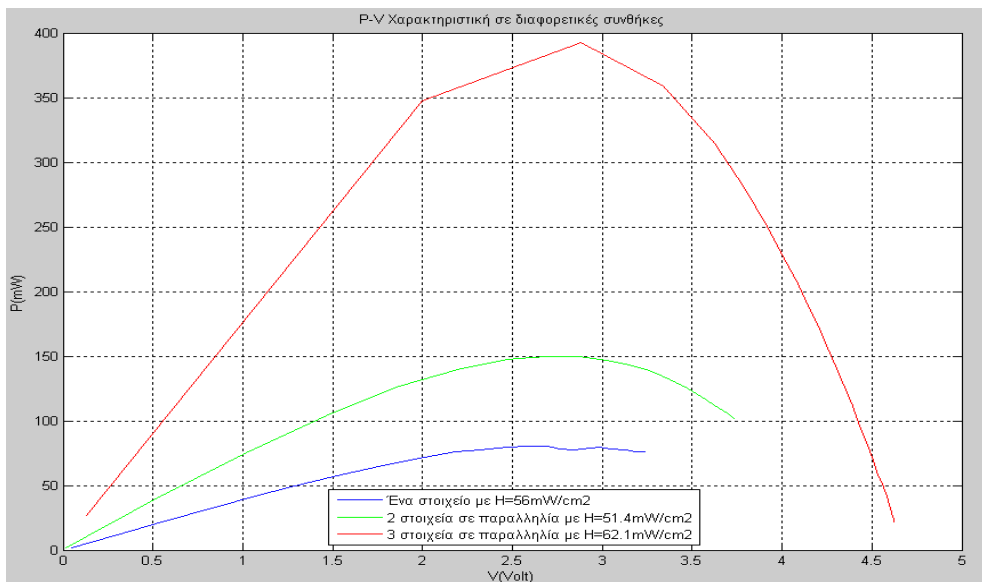


Σχήμα 5.81. Σύνδεση φ/β στοιχείων σε παραλληλία.

Στα παρακάτω γραφήματα έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες $I-V$, $P-V$ ενός στοιχείου, δύο στοιχείων σε παραλληλία και τριών στοιχείων σε παραλληλία σε παραπλήσιες συνθήκες έντασης ακτινοβολίας.



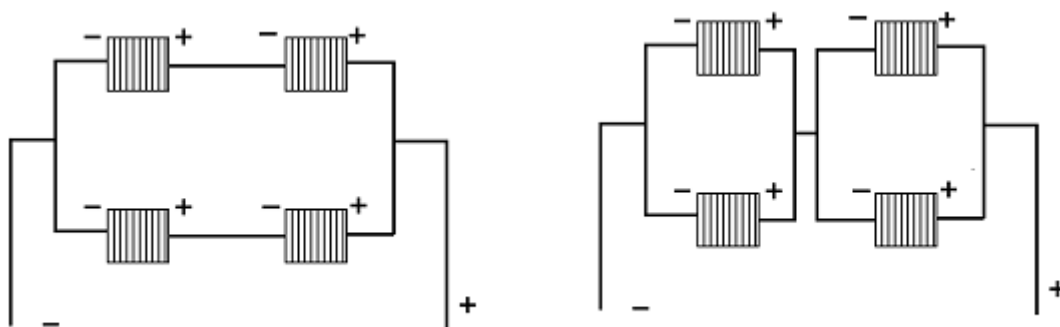
Σχήμα 5.82. Χαρακτηριστικές $I-V$ ενός φ/β στοιχείου CIS, δύο σε παραλληλία και τριών σε παραλληλία.



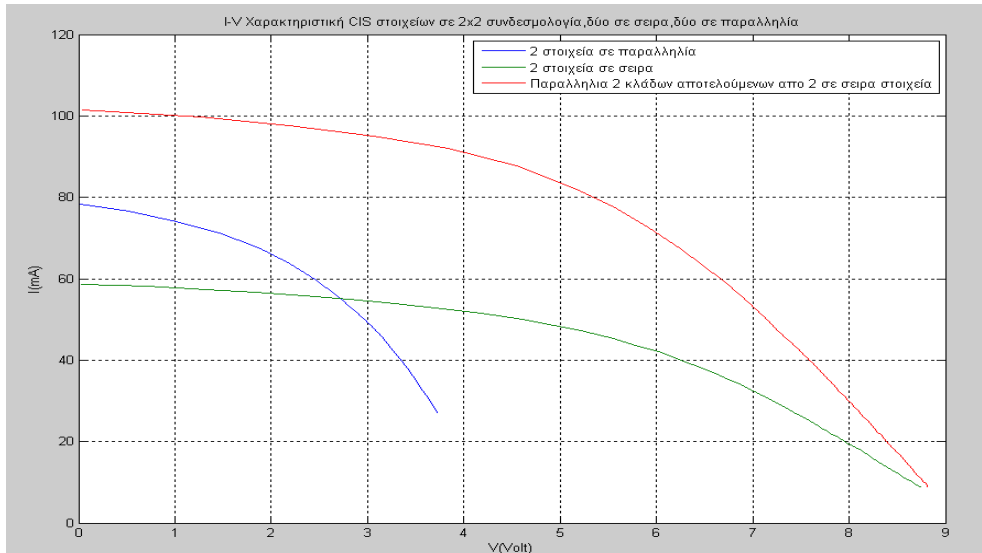
Σχήμα 5.83. Χαρακτηριστικές P-V ενός φ/β στοιχείου CIS, δύο σε παραλληλία και τριών σε παραλληλία.

Από τα παραπάνω γραφήματα, διαπιστώνεται αύξηση του ρεύματος με την προσθήκη ενός στοιχείου στο κύκλωμα, όσο η τάση παραμένει στα ίδια επίπεδα. Η μέγιστη ισχύς του κάθε κυκλώματος μετράται ίση με $P_1=80.4756mW$, $P_2=149.6639mW$ και $P_3=392.3922mW$ ενώ το σημείο λειτουργίας Q βρίσκεται αρχικά στις συντεταγμένες $Q_1=(29.85mA, 2.696V)$, ύστερα στη θέση $Q_2=(55.72mA, 2.686V)$ και τελικώς στο $Q_3=(136.2mA, 2.881V)$

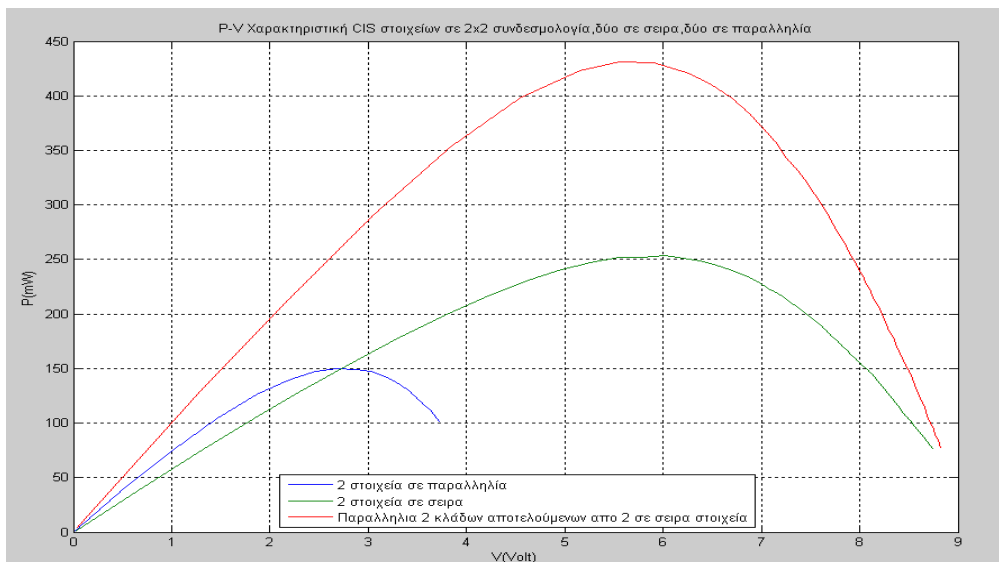
Από τα δύο παραπάνω συμπεράσματα, όσον αφορά την εν σειρά και εν παραλλήλω σύνδεση των φ/β στοιχείων είναι σαφές ότι ανάλογα με τις ανάγκες σε ρεύμα και τάση του φορτίου, καθορίζεται και η συνδεσμολογία η οποία θα χρησιμοποιηθεί. Συνδέοντας φ/β στοιχεία σε σειρά, αυξάνει η τάση εξόδου και εάν αυτοί οι εν σειρά κλάδοι συνδεθούν σε παραλληλία, αυξάνεται και το ολικό ρεύμα εξόδου του συστήματος. Στο παρακάτω γράφημα, παρουσιάζονται οι καμπύλες $I-V$, $P-V$ μίας εκ των δύο συνδεσμολογιών για ταυτόχρονη αύξηση τάσης και ρεύματος και συγκρίνονται με τις καμπύλες της εν σειρά σύνδεσης δύο στοιχείων, και της παράλληλης σύνδεσης δύο στοιχείων. Η πρώτη συνδεσμολογία, υλοποιείται με δύο όμοιους κλάδους συνδεδεμένους σε παραλληλία, ο καθένας εκ των οποίων αποτελείται από την εν σειρά σύνδεση δύο στοιχείων CIS. Η δεύτερη συνδεσμολογία υλοποιείται με δύο όμοιους κλάδους συνδεδεμένους σε σειρά, ο καθένας εκ των οποίων αποτελείται από την παράλληλη σύνδεση δύο στοιχείων CIS.



Σχήμα 5.84. Συνδέσεις 2x2.



Σχήμα 5.85. Χαρακτηριστικές $I-V$. Σύγκριση σύνδεσης 2×2 σε σχέση με 2 στοιχεία σε σειρά και 2 στοιχεία σε παράλληλα.

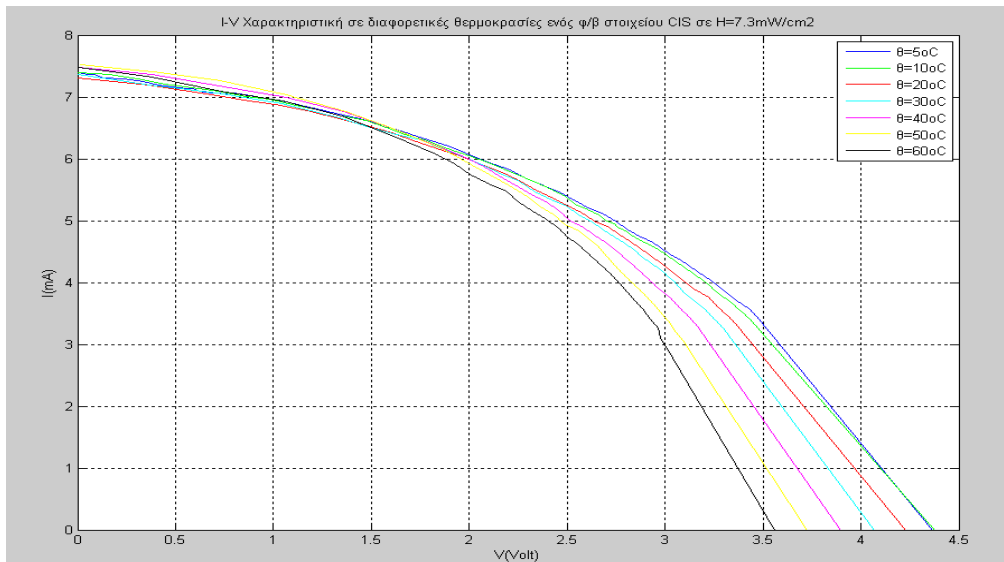


Σχήμα 5.86. Χαρακτηριστικές $P-V$. Σύγκριση σύνδεσης 2×2 σε σχέση με 2 στοιχεία σε σειρά και 2 στοιχεία σε παράλληλα.

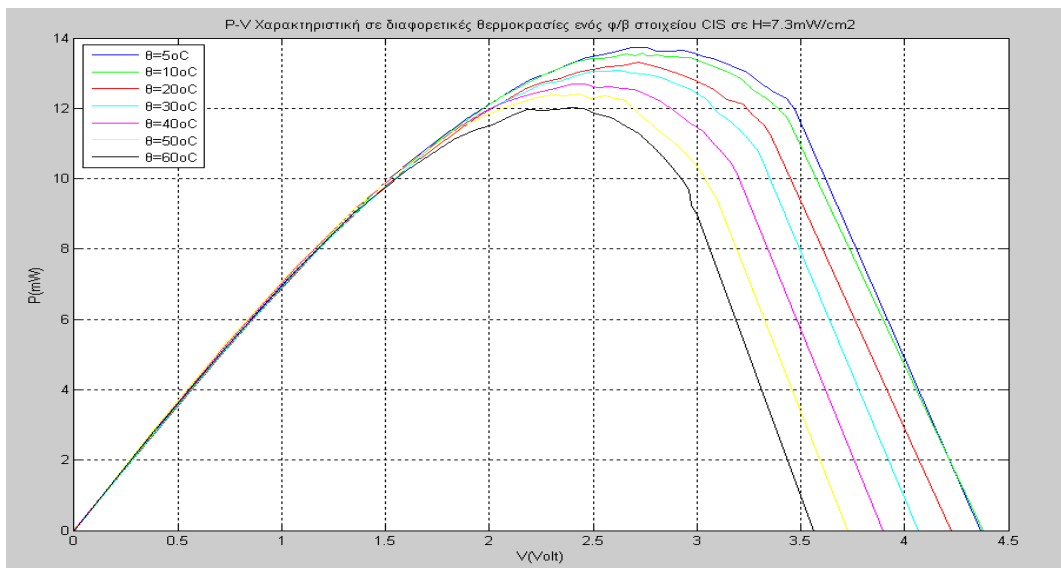
Από τα γραφήματα είναι φανερή η εκμετάλλευση της 2×2 συνδεσμολογίας στην αύξηση του ρεύματος και της τάσης ταυτόχρονα, άρα στην αύξηση της συνολικής ισχύος με βάση πάντα τις ανάγκες του εκάστοτε φορτίου.

5.5.7. Η θερμοκρασία

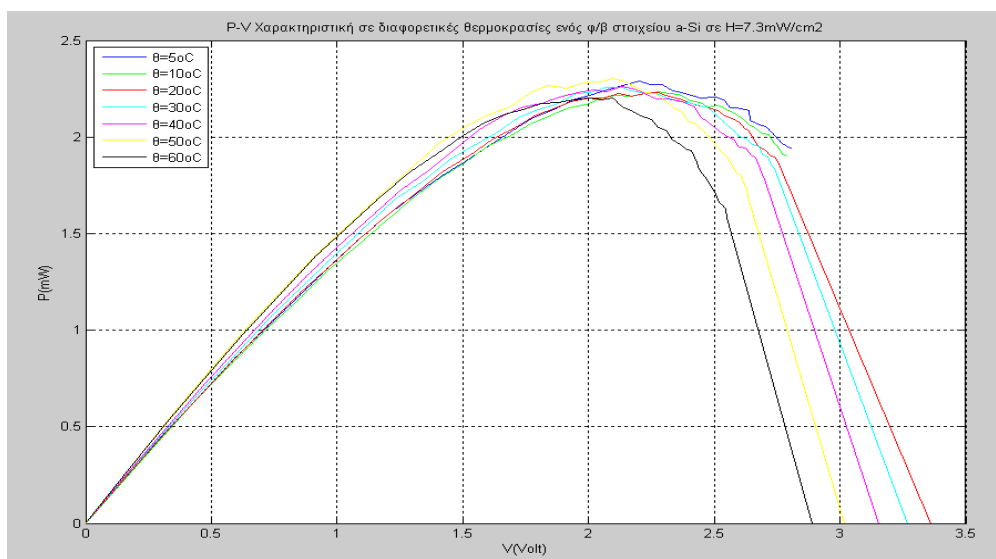
Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, συγκεντρώθηκαν δεδομένα για τη χάραξη των καμπυλών $I-V$, $P-V$ ενός στοιχείου CIS και ενός στοιχείου $a-Si$ σε διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συγκεντρωτικές καμπύλες για τα δύο στοιχεία.



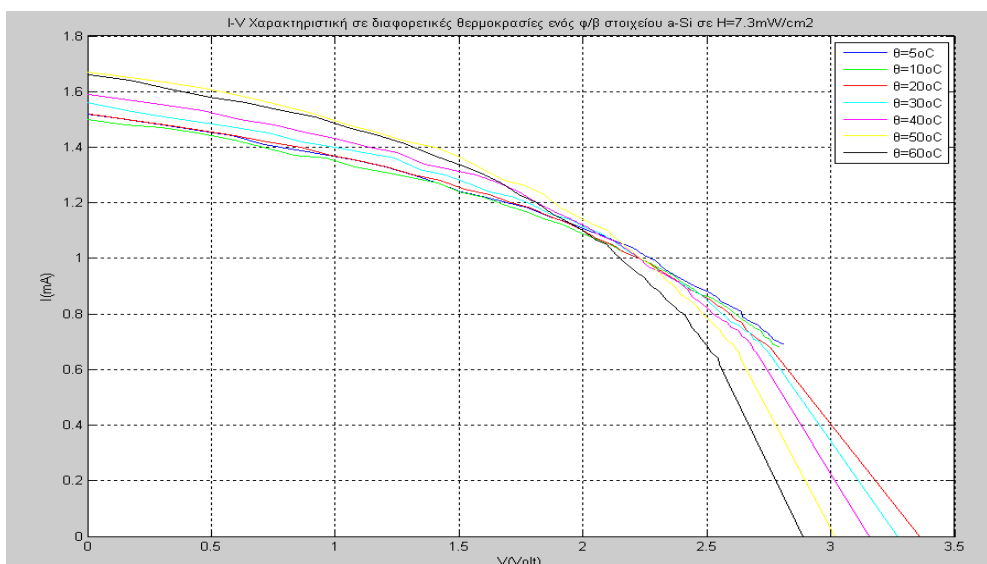
Σχήμα 5.87. Χαρακτηριστικές I-V φ/β στοιχείου CIS σε θερμοκρασίες από 5⁰C έως 60⁰C.



Σχήμα 5.88. Χαρακτηριστικές P-V φ/β στοιχείου CIS σε θερμοκρασίες από 5⁰C έως 60⁰C.



Σχήμα 5.89. Χαρακτηριστικές I-V φ/β στοιχείου a-Si σε θερμοκρασίες από 5⁰C έως 60⁰C.



Σχήμα 5.90. Χαρακτηριστικές P-V φ/β στοιχείου a-Si σε θερμοκρασίες από 5°C έως 60°C.

Στις καμπύλες του στοιχείου CIS είναι ξεκάθαρη η μείωση της ισχύος, με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε θερμοκρασία $\theta_1=5^\circ C$ η μέγιστη ισχύς διαμορφώνεται στα $P_{max1}=13.7255mW$ και σταδιακά, με την αύξηση της θερμοκρασίας στους $\theta_7=60^\circ C$ η μέγιστη ισχύς μειώνεται στα $P_{max7}=12.0229mW$. Παράλληλα παρατηρείται και βαθμιαία μείωση του συντελεστή απόδοσης από $\eta_1=5.223\%$ σε $\eta_7=4.575\%$ που υποδεικνύει την ανάγκη χαμηλής θερμοκρασίας των φ/β στοιχείων.

Η σταδιακή μείωση της μέγιστης ισχύος και της απόδοσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας, δεν παρατηρήθηκε ωστόσο στα φ/β στοιχεία a-Si. Στις καμπύλες P-V των στοιχείων αυτών παρατηρείται μείωση της Pmax και του συντελεστή απόδοσης στις τρεις αρχικές θερμοκρασίες, ενώ για τις θερμοκρασίες $\theta_4=30^\circ C$, $\theta_5=40^\circ C$ και $\theta_6=50^\circ C$ οι τιμές των μεταβλητών αυτών αυξάνονται. Η ανωμαλία αυτή μπορεί να βασιστεί στην πολυ μικρή ακτινοβολία του λαμπτήρα πυρακτώσεως καθώς και στο φτωχό φάσμα του.

5.5.8. Η αντίσταση φορτίου R_{Pmax}

Παρατηρώντας την αντίσταση του φορτίου για την οποία εμφανίζεται η μέγιστη ισχύς, είναι ξεκάθαρο ότι μεταβάλλεται όταν

- αλλάζει η συνδεσμολογία των φ/β στοιχείων
- αυξομειώνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
- τα στοιχεία θερμαίνονται ή ψύχονται σε μεταβλητή θερμοκρασία

Πιο συγκεκριμένα, για ένα φ/β στοιχείο CIS σε ένταση ακτινοβολίας $H=56mW/cm^2$ η R_{Pmax} προκύπτει ίση με 65Ω . Σε συνδεσμολογία 2 στοιχείων CIS σε σειρά η αντίσταση αυτή είναι 120Ω και 140Ω για ένταση ακτινοβολίας $H=61.07mW/cm^2$ και $H=54.77mW/cm^2$ αντίστοιχα. Σε συνδεσμολογία 3 στοιχείων CIS σε σειρά η R_{Pmax} είναι 180Ω και 210Ω για ένταση ακτινοβολίας $H=59.74mW/cm^2$ και $H=52.9mW/cm^2$ αντίστοιχα. Στην παράλληλη σύνδεση των στοιχείων δεν παρατηρείται αυτή η αύξηση της βέλτιστης αντίστασης φορτίου. Για 2 στοιχεία CIS σε παράλληλη, η R_{Pmax} είναι 35Ω για ένταση ακτινοβολίας $H=51.4mW/cm^2$. Η βέλτιστη αντίσταση φορτίου για 3 στοιχεία σε παράλληλη προκύπτει ίση με 20Ω για ένταση ακτινοβολίας $H=62.05mW/cm^2$. Συνεπώς, για μέγιστη απολαβή ισχύος σε φωτοβολταϊκό σύστημα ενδείκνυται η χρήση ενός υποσυστήματος MPPT (Maximum Power Point Tracker) για συνεχή παρακολούθηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1. Καταγεγραμμένες Μετρήσεις πειραμάτων

Οι καταγεγραμμένες μετρήσεις R-I-V-P παρουσιάζονται παρακάτω για κάθε περίπτωση συνδεσμολογίας και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

5.4.1.1.				5.4.1.2.			
Μετρήσεις ενός φ/βστοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας $H=80\text{mW/cm}^2$ Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 08-02-2011				Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας $H=64,7\text{mW/cm}^2$ Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 09-02-2011			
<i>Αντίσταση R(Ω)</i>	<i>Ρεύμα I (mA)</i>	<i>Τάση V (V)</i>	<i>Ισχύς P (mW)</i>	<i>Αντίσταση R(Ω)</i>	<i>Ρεύμα I (mA)</i>	<i>Τάση V (V)</i>	<i>Ισχύς P (mW)</i>
0	67.3000	0.0130	0.8749	0	44.5000	0.0870	3.8715
5	66.0000	0.4320	28.5120	5	44.5000	0.3020	13.4390
10	64.0000	0.8650	55.3600	10	43.8000	0.6080	26.6304
15	61.6000	1.2500	77.0000	15	43.9000	0.9000	39.5100
20	58.6000	1.6000	93.7600	20	43.1000	1.1900	51.2890
25	55.2000	1.8900	104.3280	25	42.2000	1.4400	60.7680
30	51.6000	2.1200	109.3920	30	40.9500	1.6900	69.2055
35	48.2000	2.3100	111.3420	35	40.2000	1.9200	77.1840
40	44.9000	2.4700	110.9030	40	38.9000	2.1430	83.3627
45	42.0000	2.6000	109.2000	45	37.7000	2.3370	88.1049
50	39.4000	2.7200	107.1680	50	36.3000	2.5050	90.9315
55	37.1000	2.8100	104.2510	55	34.6000	2.6210	90.6866
60	35.0000	2.9000	101.5000	60	33.1500	2.7460	91.0299
65	33.2000	2.9700	98.6040	65	31.8600	2.8440	90.6098
70	31.5000	3.0400	95.7600	70	30.3800	2.9210	88.7400
75	30.0000	3.1000	93.0000	75	29.1300	3.0070	87.5939
80	28.6000	3.1600	90.3760	80	27.8600	3.0720	85.5859
85	27.3000	3.2100	87.6330	85	26.8000	3.1380	84.0984
90	26.1000	3.2500	84.8250	90	25.7400	3.2030	82.4452
95	25.1000	3.2900	82.5790	95	24.9000	3.2640	81.2736
100	24.1000	3.3300	80.2530	100	23.9800	3.3120	79.4218

5.4.1.3.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση
ακτινοβολίας $H=56\text{mW/cm}^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 09-02-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	40.3500	0.0480	
5	39.8500	0.3040	1.9368
10	39.4000	0.5710	12.1144
15	38.8100	0.8290	22.4974
20	38.9000	1.1060	32.1735
25	38.3000	1.3470	43.0234
30	37.5000	1.5890	51.5901
35	36.6700	1.8000	59.5875
40	35.6900	2.0090	66.0060
45	34.6900	2.1850	71.7012
50	33.2800	2.3250	75.7976
55	32.1400	2.4680	77.3760
60	30.9300	2.5870	79.3215
65	29.8500	2.6960	80.0159
70	28.3200	2.7610	80.4756
75	27.2700	2.8460	78.1915
80	26.6200	2.9800	77.6104
85	25.6500	3.0470	79.3276
90	24.8300	3.1270	78.1556
95	23.9600	3.1800	77.6434
100	23.3800	3.2440	76.1928
			75.8447

5.4.1.4.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση
ακτινοβολίας $H=63,58\text{mW/cm}^2$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	66,9	0,028	1.8732
20	62,20	1,300	80.8600
40	52,34	2,140	112.1360
60	42,60	2,630	112.0380
80	36,29	2,900	105.2410
100	30,72	3,120	95.8464
120	26,90	6,268	87.9092
140	23,90	3,380	80.7820
160	21,46	3,475	74.5735
180	19,60	3,546	69.5016
200	17,89	3,610	64.5829
220	16,45	3,667	60.3221
240	15,30	3,710	56.7630
260	14,23	3,750	53.9317
280	13,36	3,790	51.0486
300	12,59	3,821	48.4211
320	11,95	3,846	46.2943
340	11,29	3,874	43.9971
360	10,73	3,897	42.0187
380	10,26	3,916	40.3731
400	9,75	3,935	38.5125
420	9,34	3,950	37.0424
440	8,94	3,966	35.5633
460	8,62	3,978	34.4197
480	8,25	3,993	33.0495
500	7,91	4,006	31.7745
520	7,66	4,017	30.8392
540	7,38	4,026	29.7783
560	7,15	4,035	28.8860
580	6,93	4,040	28.0596
600	6,68	4,049	27.0874
620	6,50	4,055	26.4030
640	6,28	4,062	25.5408
660	6,10	4,067	24.8392
680	5,93	4,072	24.1766
700	5,77	4,077	23.5589
720	5,61	4,083	22.9393
740	5,48	4,089	22.4187
760	5,33	4,091	21.8530

	780	5,20	4,100	21.3512
	800	5,09	4,106	20.9250
	820	4,97	4,111	20.4516
	840	4,85	4,115	19.9771
	860	4,75	4,119	19.5748
	880	4,65	4,121	19.1720
	900	4,54	4,123	18.7366
	920	4,45	4,127	18.3741
	940	4,35	4,129	17.9872
	960	4,27	4,135	17.6564
	980	4,19	4,137	17.3340
	1000	4,10	4,140	16.9740

5.4.1.5.

Μετρήσεις ενός μερικώς σκιασμένου φ/β
στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας
 $H=57,66\text{mW/cm}^2$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	45.3700	0.0180	0.8167
10	43.7300	0.5350	23.3956
20	42.6800	0.9150	39.0522
30	41.8200	1.3190	55.1606
40	40.9800	1.6610	68.0678
50	40.0000	2.0630	82.5200
60	38.9200	2.4110	93.8361
70	37.7300	2.7090	102.2106
80	36.3300	2.9490	107.1372
90	34.4400	3.1820	109.5881
100	32.8300	3.3390	109.6194
110	31.1600	3.4770	108.3433
120	29.3600	3.6030	105.7841
130	27.8300	3.6950	102.8318
140	26.4600	3.7670	99.6748
150	25.1000	3.8320	96.1832
160	23.8500	3.8880	92.7288
170	22.7600	3.9330	89.5151
180	21.7600	3.9730	86.4525
190	20.7600	4.0110	83.2684
200	19.7900	4.0490	80.1297
210	19.0500	4.0790	77.7049
220	18.3300	4.1040	75.2263
230	17.7000	4.1270	73.0479
240	17.0400	4.1510	70.7330
250	16.4300	4.1740	68.5788
300	14.0100	4.2550	59.6125
350	12.2600	4.3110	52.8529
400	10.8000	4.3580	47.0664
450	9.7000	4.3920	42.6024
500	8.7100	4.4220	38.5156
550	8.0100	4.4420	35.5804
600	7.3600	4.4630	32.8477
650	6.8200	4.4790	30.5468
700	6.3300	4.4950	28.4534
750	5.9300	4.5060	26.7206
800	5.5800	4.5170	25.2049
850	5.2600	4.5260	23.8068
900	4.9800	4.5360	22.5893
950	4.7200	4.5430	21.4430

5.4.1.6.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση
ακτινοβολίας $H=34,81\text{mW/cm}^2$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	36.1000	0.0140	0.5054
5	35.9600	0.2440	8.7742
10	35.8000	0.4560	16.3248
15	35.6300	0.6210	22.1262
20	35.4600	0.8000	28.3680
25	35.2800	0.9960	35.1389
30	35.1100	1.1480	40.3063
35	35.0100	1.3070	45.7581
40	34.7700	1.4960	52.0159
45	34.6000	1.6280	56.3288
50	34.3700	1.8010	61.9004
55	34.0600	1.9660	66.9620
60	33.6800	2.1120	71.1322
65	33.3400	2.2470	74.9150
70	32.9600	2.3810	78.4778
75	32.4000	2.5320	82.0368
80	31.9200	2.6540	84.7157
85	31.3300	2.7660	86.6588
90	30.7300	2.8640	88.0107
95	30.0700	2.9580	88.9471
100	29.3800	3.0420	89.3740
105	28.6600	3.1220	89.4765
110	28.0900	3.1760	89.2138
115	27.4100	3.2370	88.7262
120	26.7200	3.2960	88.0691
125	26.0100	3.3530	87.2115
130	25.4600	3.3940	86.4112
135	24.8700	3.4370	85.4782
140	24.2400	3.4870	84.5249
145	23.6600	3.5200	83.2832
150	23.0600	3.5580	82.0475
155	22.5700	3.5890	81.0037
160	22.1300	3.6180	80.0663
165	21.6400	3.6480	78.9427
170	21.1800	3.6760	77.8577
175	20.7300	3.7000	76.7010
180	20.2200	3.7270	75.3599
185	19.8100	3.7500	74.2875
190	19.4000	3.7730	73.1962
195	19.0200	3.7930	72.1429
200	18.6400	3.8140	71.0930
250	15.5600	3.9660	61.7110
300	13.3700	4.0700	54.4159

1000	4.5000	4.5490	20.4705	350	11.7000	4.1460	48.5082
				400	10.4200	4.2000	43.7640
				450	9.3200	4.2510	39.6193
				500	8.4600	4.2900	36.2934
				550	7.7600	4.3180	33.5077
				600	7.1500	4.3440	31.0596
				650	6.6400	4.3660	28.9902
				700	6.1700	4.3850	27.0554
				750	5.8000	4.4000	25.5200
				800	5.4500	4.4100	24.0345
				850	5.1500	4.4290	22.8094
				900	4.8900	4.4400	21.7116
				950	4.6700	4.4500	20.7815
				1000	4.4100	4.4600	19.6686

5.4.2.1.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=5^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(V)$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	7.3900	0.0050	0.0369
5	7.3700	0.0470	0.3464
10	7.3600	0.0860	0.6330
15	7.3100	0.1300	0.9503
20	7.3100	0.1620	1.1842
25	7.3000	0.1960	1.4308
30	7.2900	0.2300	1.6767
35	7.2800	0.2660	1.9365
40	7.2700	0.3020	2.1955
45	7.2500	0.3360	2.4360
50	7.2200	0.3750	2.7075
55	7.1900	0.4120	2.9623
60	7.1800	0.4420	3.1736
65	7.1600	0.4830	3.4583
70	7.1500	0.5160	3.6894
75	7.1300	0.5490	3.9144
80	7.1300	0.5890	4.1996
85	7.0900	0.6200	4.3958
90	7.0800	0.6510	4.6091
95	7.0700	0.6850	4.8430
100	7.0600	0.7200	5.0832
105	7.0500	0.7490	5.2805
110	7.0700	0.7920	5.5994
115	7.0500	0.8290	5.8444
120	7.0400	0.8530	6.0051
200	6.9300	1.0460	7.2488
225	6.7100	1.3570	9.1055
250	6.6100	1.4940	9.8753
275	6.4800	1.6200	10.4976
300	6.3500	1.7470	11.0935
325	6.2200	1.8760	11.6687
350	6.0900	1.9800	12.0582
375	5.9400	2.1000	12.4740
400	5.8400	2.1960	12.8246
425	5.6900	2.2860	13.0073
450	5.5600	2.3840	13.2550
475	5.4500	2.4680	13.4506
500	5.3200	2.5400	13.5128
525	5.2000	2.6180	13.6136
550	5.1100	2.6860	13.7255
575	4.9800	2.7550	13.7199
600	4.8500	2.8110	13.6333
625	4.7500	2.8690	13.6278
650	4.6500	2.9350	13.6478
675	4.5500	2.9830	13.5726

5.4.2.2.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=10^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(V)$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	7.4000	0.0030	0.0222
20	7.3600	0.1620	1.1923
40	7.3000	0.3070	2.2411
60	7.2100	0.4480	3.2301
80	7.1500	0.5820	4.1613
100	7.0900	0.7180	5.0906
120	7.0100	0.8580	6.0146
140	6.9700	0.9810	6.8376
160	6.8600	1.1120	7.6283
180	6.7900	1.2290	8.3449
200	6.7000	1.3450	9.0115
220	6.6200	1.4700	9.7314
240	6.5100	1.5730	10.2402
260	6.4000	1.6730	10.7072
280	6.3100	1.7700	11.1687
300	6.2000	1.8630	11.5506
320	6.0900	1.9600	11.9364
340	6.0000	2.0500	12.3000
360	5.8900	2.1330	12.5634
380	5.8000	2.2060	12.7948
400	5.6900	2.2840	12.9960
420	5.5900	2.3570	13.1756
440	5.5000	2.4270	13.3485
460	5.3900	2.4890	13.4157
480	5.2700	2.5440	13.4069
500	5.1800	2.6020	13.4784
520	5.0900	2.6620	13.5496
540	5.0000	2.7000	13.5000
550	4.9500	2.7400	13.5630
560	4.8900	2.7580	13.4866
570	4.8500	2.7850	13.5072
580	4.8100	2.8100	13.5161
590	4.7700	2.8270	13.4848
600	4.7200	2.8510	13.4567
650	4.5300	2.9660	13.4360
700	4.3300	3.0580	13.2411
750	4.1500	3.1430	13.0435
800	4.0000	3.2130	12.8520
850	3.8200	3.2750	12.5105
900	3.6800	3.3380	12.2838
950	3.5400	3.3900	12.0006
1000	3.4100	3.4360	11.7168

700	4.4500	3.0280	13.4746
725	4.3600	3.0770	13.4157
750	4.1800	3.1630	13.2213
800	4.0200	3.2390	13.0208
850	3.8500	3.3070	12.7319
900	3.7100	3.3660	12.4879
950	3.5800	3.4300	12.2794
1000	3.4500	3.4700	11.9715

5.4.2.3.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(V)$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	7.3100	0.0050	0.0365
50	7.2000	0.3630	2.6136
100	7.0200	0.7130	5.0053
125	6.9400	0.8780	6.0933
150	6.8600	1.0380	7.1207
175	6.7700	1.1900	8.0563
200	6.6500	1.3350	8.8778
225	6.5400	1.4790	9.6727
250	6.4200	1.6030	10.2913
275	6.2800	1.7300	10.8644
300	6.1500	1.8490	11.3714
325	6.0300	1.9620	11.8309
350	5.9000	2.0700	12.2130
375	5.7800	2.1700	12.5426
400	5.6400	2.2600	12.7464
425	5.4900	2.3400	12.8466
450	5.3700	2.4260	13.0276
475	5.2500	2.4970	13.1092
500	5.1300	2.5710	13.1892
525	5.0000	2.6400	13.2000
550	4.9000	2.7160	13.3084
575	4.7800	2.7670	13.2263
600	4.6700	2.8200	13.1694
650	4.4500	2.9170	12.9806
700	4.2600	2.9990	12.7757
750	4.0700	3.0780	12.5275
800	3.9000	3.1450	12.2655
850	3.7600	3.2210	12.1110
900	3.6100	3.2690	11.8011
950	3.4700	3.3220	11.5273
1000	3.3300	3.3580	11.1821

5.4.2.4.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=30^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(V)$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	7.3700	0.0030	0.0221
50	7.1900	0.3670	2.6387
100	7.0600	0.7140	5.0408
150	6.9000	1.0430	7.1967
200	6.6600	1.3370	8.9044
225	6.5200	1.4780	9.6366
250	6.4100	1.6120	10.3329
275	6.3100	1.7500	11.0425
300	6.1700	1.8530	11.4330
325	6.0300	1.9710	11.8851
350	5.8900	2.0700	12.1923
375	5.7300	2.1730	12.4513
400	5.6300	2.2540	12.6900
425	5.4700	2.3370	12.7834
450	5.3400	2.4190	12.9175
475	5.2300	2.4970	13.0593
500	5.1000	2.5600	13.0560
525	4.9800	2.6250	13.0725
550	4.8500	2.6820	13.0077
575	4.7400	2.7390	12.9829
600	4.6300	2.7940	12.9362
625	4.5200	2.8430	12.8504
650	4.4100	2.8870	12.7317
700	4.2200	2.9730	12.5461
750	4.0200	3.0460	12.2449
800	3.8400	3.0960	11.8886
850	3.6900	3.1560	11.6456
900	3.5600	3.2040	11.4062
950	3.4000	3.2560	11.0704
1000	3.2700	3.2950	10.7746

5.4.2.5.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=40^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(V)$	Ισχύς $P(\text{mW})$
--------------------------	-------------------------	----------------	-------------------------

5.4.2.6.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=50^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(V)$	Ισχύς $P(\text{mW})$
--------------------------	-------------------------	----------------	-------------------------

0	7.4800	0.0050	0.0374	0	7.5200	0.0130	0.0978
50	7.3600	0.3800	2.7968	50	7.4100	0.3850	2.8529
100	7.1800	0.7250	5.2055	100	7.2600	0.7310	5.3071
150	6.9900	1.0640	7.4374	150	7.0400	1.0660	7.5046
200	6.7600	1.3570	9.1733	200	6.7700	1.3680	9.2614
250	6.4600	1.6330	10.5492	250	6.4800	1.6210	10.5041
300	6.1800	1.8580	11.4824	300	6.1700	1.8590	11.4700
325	6.0400	1.9700	11.8988	350	5.8300	2.0510	11.9573
350	5.8800	2.0710	12.1775	375	5.6800	2.1390	12.1495
375	5.7200	2.1540	12.3209	400	5.5400	2.2220	12.3099
400	5.5800	2.2350	12.4713	425	5.3800	2.3020	12.3848
425	5.4200	2.3180	12.5636	450	5.2200	2.3650	12.3453
450	5.2900	2.3990	12.6907	475	5.1100	2.4300	12.4173
475	5.1700	2.4570	12.7027	500	4.9400	2.4880	12.2907
500	5.0000	2.5180	12.5900	525	4.8300	2.5580	12.3551
525	4.8900	2.5810	12.6211	550	4.7100	2.6080	12.2837
550	4.7600	2.6380	12.5569	575	4.6000	2.6580	12.2268
575	4.6500	2.6940	12.5271	600	4.4700	2.6920	12.0332
600	4.5400	2.7400	12.4396	650	4.2200	2.7600	11.6472
650	4.3100	2.8280	12.1887	700	4.0100	2.8250	11.3283
700	4.1000	2.9000	11.8900	750	3.8200	2.8890	11.0360
750	3.9100	2.9650	11.5932	800	3.6500	2.9420	10.7383
800	3.7500	3.0270	11.3513	850	3.4800	2.9900	10.4052
850	3.5900	3.0720	11.0285	900	3.3400	3.0280	10.1135
900	3.4400	3.1220	10.7397	950	3.2000	3.0580	9.7856
950	3.3000	3.1650	10.4445	1000	3.0700	3.0900	9.4863
1000	3.1700	3.1920	10.1186				

5.4.2.7.

Μετρήσεις ενός φ/β στοιχείου CIS σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως
 $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=60^\circ\text{C}$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 16-03-2011

<i>Αντίσταση R(Ω)</i>	<i>Ρεύμα I (mA)</i>	<i>Τάση V (V)</i>	<i>Ισχύς P (mW)</i>
0	7.4800	0.0030	0.0224
50	7.3200	0.3820	2.7962
100	7.0900	0.7300	5.1757
150	6.9300	1.0520	7.2904
200	6.7000	1.3470	9.0249
250	6.3800	1.6030	10.2271
300	6.0800	1.8280	11.1142
325	5.9200	1.9230	11.3842
350	5.7300	2.0120	11.5288
375	5.6000	2.1040	11.7824
400	5.4800	2.1860	11.9793
425	5.3000	2.2550	11.9515
450	5.1500	2.3250	11.9738
475	5.0200	2.3950	12.0229
500	4.8800	2.4580	11.9950
525	4.7400	2.5030	11.8642
550	4.6100	2.5560	11.7832
575	4.5000	2.6000	11.7000
600	4.3800	2.6390	11.5588
650	4.1500	2.7200	11.2880
700	3.9400	2.7800	10.9532
750	3.7500	2.8350	10.6313
800	3.5800	2.8830	10.3211
850	3.4100	2.9260	9.9777
900	3.2700	2.9620	9.6857
950	3.1100	2.9740	9.2491
1000	2.9900	3.0000	8.9700

5.4.3.1.

Μετρήσεις δύο φ/β στοιχείων CIS συνδεδεμένα
σε σειρά σε ένταση ακτινοβολίας
 $H=61,07\text{mW/cm}^2$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	65,77	0,027	1.7758
10	65,26	0,750	48.9450
20	64,80	1,460	94.6080
30	64,24	2,052	131.8205
40	63,06	2,639	166.4021
50	62,55	3,278	205.0389
60	61,44	3,820	234.7008
70	59,92	4,345	260.3524
80	58,12	43,802	279.0922
90	56,17	5,219	293.1512
100	53,98	5,604	302.5039
110	52,17	5,861	305.7684
120	50,17	6,116	306.8397
130	48,03	6,356	305.2787
140	45,93	6,562	301.3927
150	43,90	6,740	295.8860
160	42,24	6,880	290.6112
170	40,43	7,030	284.2229
180	38,85	7,150	277.7775
190	37,46	7,250	271.5850
200	36,22	7,340	265.8548
210	34,80	7,440	258.9120
220	33,53	7,520	252.1456
230	32,50	7,590	246.6750
240	31,37	7,660	240.2942
250	30,36	7,720	234.3792
260	29,44	7,780	229.0432
270	28,57	7,840	223.9888
280	27,70	7,900	218.8300
290	26,89	7,950	213.7755
300	26,17	8,000	209.3600
310	25,56	8,030	205.2468
320	24,89	8,060	200.6134
330	24,25	8,100	196.4250
340	23,68	8,130	192.5184
350	23,07	8,170	188.4819
360	22,52	8,210	184.8892
370	22,00	8,230	181.0600
380	21,52	8,260	177.7552

5.4.3.2.

Μετρήσεις δύο φ/β στοιχείων CIS
συνδεδεμένων σε σειρά σε ένταση ακτινοβολίας
 $H=54,77\text{mW/cm}^2$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	58.7000	0.0240	1.4088
10	58.0900	0.7100	41.2439
20	57.4000	1.3220	75.8828
30	56.6200	1.8350	103.8977
40	55.8100	2.3400	130.5954
50	54.8600	2.8030	153.7726
60	53.7900	3.2920	177.0767
70	52.6000	3.7800	198.8280
80	51.5000	4.1770	215.1155
90	50.0400	4.6000	230.1840
100	48.6300	4.9370	240.0863
110	47.0200	5.2550	247.0901
120	45.3500	5.5500	251.6925
130	43.6000	5.7790	251.9644
140	42.0300	6.0230	253.1467
150	40.4900	6.2090	251.4024
160	39.0000	6.3750	248.6250
170	37.6500	6.5150	245.2897
180	36.2600	6.6500	241.1290
190	35.0800	6.7700	237.4916
200	33.8900	6.8800	233.1632
210	32.7300	6.9800	228.4554
220	31.5900	7.0700	223.3413
230	30.5800	7.1600	218.9528
240	29.7200	7.2300	214.8756
250	28.7400	7.3000	209.8020
260	27.9600	7.3700	206.0652
270	27.1500	7.4300	201.7245
280	26.4400	7.4900	198.0356
290	25.6500	7.5500	193.6575
300	24.9800	7.6000	189.8480
310	24.3500	7.6400	186.0340
320	23.7000	7.6900	182.2530
330	23.1400	7.7300	178.8722
340	22.5800	7.7700	175.4466
350	22.0200	7.8100	171.9762
360	21.5300	7.8400	168.7952
370	21.0600	7.8800	165.9528
380	20.6100	7.9100	163.0251
390	20.1000	7.9500	159.7950
400	19.7100	7.9800	157.2858
450	17.8500	8.1200	144.9420
500	16.2500	8.2300	133.7375
550	14.9900	8.3100	124.5669
600	13.8200	8.3900	115.9498
650	12.8700	8.4500	108.7515
700	12.0200	8.5100	102.2902
750	11.2900	8.5600	96.6424
800	10.6500	8.6100	91.6965
850	10.0800	8.6500	87.1920
900	9.5300	8.6900	82.8157
950	9.0800	8.7200	79.1776
1000	8.6500	8.7500	75.6875

390	21,01	8,290	<i>174.1729</i>
400	20,50	8,320	<i>170.5600</i>
410	20,08	8,340	<i>167.4672</i>
420	19,67	8,360	<i>164.4412</i>
430	19,27	8,380	<i>161.4826</i>
440	18,88	8,400	<i>158.5920</i>
450	18,50	8,430	<i>155.9550</i>
500	16,87	8,510	<i>143.5637</i>
550	15,48	8,590	<i>132.9732</i>
600	14,26	8,650	<i>123.3490</i>
650	13,26	8,700	<i>115.3620</i>
700	12,30	8,750	<i>107.6250</i>
750	11,60	8,790	<i>101.9640</i>
800	10,92	8,820	<i>96.3144</i>
850	10,31	8,850	<i>91.2435</i>
900	9,76	8,880	<i>86.6688</i>
950	9,28	8,910	<i>82.6848</i>
1000	8,83	8,930	<i>78.8519</i>

5.4.3.3.

Μετρήσεις τριών φ/β στοιχείων CIS
συνδεδεμένων σε σειρά σε ένταση ακτινοβολίας
 $H=59,74\text{mW/cm}^2$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	63.9000	0.0260	1.6614
10	63.5700	0.7130	45.3254
20	63.2000	1.4090	89.0488
30	62.7000	1.9760	123.8952
40	62.3300	2.6170	163.1176
50	61.6300	3.2700	201.5301
60	61.2000	3.7620	230.2344
70	60.7000	4.4500	270.1150
80	59.9300	4.9170	294.6758
90	59.1000	5.4370	321.3267
100	58.1100	5.9370	344.9991
110	57.0600	6.3900	364.6134
120	55.7000	6.8800	383.2160
130	54.6300	7.2600	396.6138
140	53.4300	7.5900	405.5337
150	51.9900	7.9400	412.8006
160	50.5500	8.2600	417.5430
170	49.2600	8.5200	419.6952
180	47.8600	8.7800	420.2108
190	46.4800	9.0100	418.7848
200	45.0800	9.2300	416.0884
210	44.0600	9.3900	413.7234
220	42.7300	9.5700	408.9261
230	41.6000	9.7300	404.7680
240	40.4500	9.8800	399.6460
250	39.4100	10.0100	394.4941
260	38.3600	10.1400	388.9704
270	37.4500	10.2500	383.8625
280	36.4700	10.3600	377.8292
290	35.5200	10.4700	371.8944
300	34.7800	10.5600	367.2768

5.4.3.4.

Μετρήσεις τριών φ/β στοιχείων CIS
συνδεδεμένων σε σειρά σε ένταση ακτινοβολίας
 $H=52,9\text{mW/cm}^2$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	55.6100	0.0500	2.7805
10	55.2700	0.6480	35.8150
20	55.0500	1.2000	66.0600
30	54.7400	1.7200	94.1528
40	54.5000	2.2750	123.9875
50	54.1600	2.8100	152.1896
60	53.8100	3.3600	180.8016
70	53.4500	3.8600	206.3170
80	52.9500	4.3700	231.3915
90	52.4000	4.8600	254.6640
100	51.8900	5.3450	277.3520
110	51.2200	5.7810	296.1028
120	50.5400	6.2130	314.0050
130	49.7600	6.5970	328.2667
140	48.9100	6.9700	340.9027
150	47.9400	7.3400	351.8796
160	47.0100	7.6600	360.0966
170	46.0300	7.9800	367.3194
180	44.9700	8.2600	371.4522
190	43.9500	8.5100	374.0145
200	42.7400	8.7900	375.6846
210	41.8500	8.9800	375.8130
220	40.9300	9.1700	375.3281
230	39.9100	9.3500	373.1585
240	39.0400	9.5100	371.2704
250	38.0300	9.6700	367.7501
260	37.2000	9.8200	365.3040
270	36.2800	9.9500	360.9860
280	35.4800	10.0700	357.2836
290	34.6500	10.2000	353.4300
300	33.9000	10.3000	349.1700
310	33.1300	10.4100	344.8833

310	33.9400	10.6500	361.4610	320	32.4000	10.5100	340.5240
320	33.1600	10.7400	356.1384	330	31.7600	10.6000	336.6560
330	32.4000	10.8200	350.5680	340	31.1000	10.6900	332.4590
340	31.7300	10.8900	345.5397	350	30.4700	10.7700	328.1619
350	31.0000	10.9700	340.0700	360	29.7900	10.8500	323.2215
360	30.4100	11.0300	335.4223	370	29.2500	10.9200	319.4100
370	29.7200	11.1000	329.8920	380	28.6400	11.0000	315.0400
380	29.1600	11.1700	325.7172	390	28.0800	11.0600	310.5648
390	28.5200	11.2300	320.2796	400	27.4700	11.1300	305.7411
400	28.0000	11.2900	316.1200	450	25.1000	11.4200	286.6420
410	27.4000	11.3500	310.9900	500	23.0100	11.6500	268.0665
420	26.8200	11.4100	306.0162	550	21.3000	11.8300	251.9790
430	26.3000	11.4600	301.3980	600	19.7800	11.9900	237.1622
440	25.8100	11.5000	296.8150	650	18.4500	12.1200	223.6140
450	25.3900	11.5500	293.2545	700	17.2400	12.2500	211.1900
460	24.9100	11.5900	288.7069	750	16.2600	12.3500	200.8110
470	24.5200	11.6400	285.4128	800	15.3900	12.4300	191.2977
480	24.0300	11.6800	280.6704	850	14.5700	12.5100	182.2707
490	23.6600	11.7200	277.2952	900	13.8200	12.5900	173.9938
500	23.2700	11.7600	273.6552	950	13.1800	12.6600	166.8588
550	21.5400	11.9300	256.9722	1000	12.5700	12.7100	159.7647
600	19.9500	12.0800	240.9960				
650	18.5200	12.2200	226.3144				
700	17.4000	12.3200	214.3680				
750	16.3800	12.4200	203.4396				
800	15.4100	12.5000	192.6250				
850	14.6500	12.5800	184.2970				
900	13.9000	12.6500	175.8350				
950	13.2500	12.7200	168.5400				
1000	12.6300	12.7700	161.2851				

5.4.3.5.

Μετρήσεις δύο φ/β στοιχείων CIS
συνδεδεμένων σε παραλληλία σε ένταση
ακτινοβολίας $H=51,4\text{mW/cm}^2$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(V)$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	78.4000	0.0190	1.4896
5	76.5600	0.5250	40.1940
10	74.0800	1.0170	75.3394
15	71.2200	1.4630	104.1949
20	67.6700	1.8710	126.6106
25	63.7700	2.1920	139.7838
30	59.6400	2.4680	147.1915
35	55.7200	2.6860	149.6639
40	51.9900	2.8720	149.3153
45	48.6900	3.0210	147.0925
50	45.6500	3.1450	143.5692
55	42.9500	3.2460	139.4157
60	40.3600	3.3350	134.6006
65	38.0800	3.4090	129.8147
70	36.0100	3.4720	125.0267
75	34.1600	3.5270	120.4823
80	32.4100	3.5780	115.9630
85	30.8300	3.6260	111.7896
90	29.4800	3.6670	108.1032
95	28.1800	3.7040	104.3787
100	27.0000	3.7390	100.9530

5.4.3.6.

Μετρήσεις τριών φ/β στοιχείων CIS
συνδεδεμένα σε παραλληλία σε ένταση
ακτινοβολίας $H=62,05\text{mW/cm}^2$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(V)$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	200,90	0,133	26.7197
10	173,90	2,000	347.8000
20	136,20	2,881	392.3922
30	107,60	3,337	359.0612
40	86,80	3,624	314.5632
50	74,08	3,789	280.6891
60	63,98	3,916	250.5457
70	56,10	4,015	225.2415
80	50,38	4,088	205.9534
90	55,60	4,148	189.1488
100	40,72	4,206	171.2683
110	37,90	4,240	160.6960
120	35,12	4,275	150.1380
130	32,54	4,304	140.0522
140	30,42	4,330	131.7186
150	28,47	4,355	123.9869
160	26,92	4,373	117.7212
170	25,40	4,391	111.5314

	180	24,12	4,405	106.2486
	190	22,84	4,420	100.9528
	200	21,70	4,432	96.1744
	250	17,66	4,480	79.1168
	300	14,81	4,512	66.8227
	350	12,83	4,536	58.1969
	400	11,22	4,556	51.1183
	450	10,04	4,570	45.8828
	500	9,08	4,581	41.5955
	550	8,26	4,588	37.8969
	600	7,58	4,596	34.8377
	650	6,99	4,602	32.1680
	700	6,51	4,607	29.9916
	750	6,06	4,612	27.9487
	800	5,71	4,616	26.3574
	850	5,38	4,620	24.8556
	900	5,08	4,622	23.4798
	950	4,80	4,624	22.1952
	1000	4,57	4,625	21.1363

5.4.3.7.

Μετρήσεις φ/β συστήματος 4 στοιχείων CIS (2 παράλληλοι κλάδοι αποτελούμενοι από δύο στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά) σε ένταση ακτινοβολίας $H=48,3\text{mW/cm}^2$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	101.4000	0.0420	4.2588
10	99.7400	1.2690	126.5701
20	97.6000	2.1860	213.3536
30	95.1100	3.0600	291.0366
40	91.9300	3.8420	353.1951
50	87.6500	4.5460	398.4569
60	82.1900	5.1500	423.2785
70	77.6300	5.5520	431.0018
80	72.8300	5.9070	430.2068
90	67.2300	6.2600	420.8598
100	63.1900	6.4940	410.3559
110	59.5500	6.6900	398.3895
120	55.7300	6.8800	383.4224
130	52.5500	7.0300	369.4265
140	49.7000	7.1600	355.8520
150	47.1700	7.2600	342.4542
160	44.9500	7.3700	331.2815
170	42.7900	7.4700	319.6413
180	41.0600	7.5400	309.5924
190	39.3200	7.6200	299.6184
200	37.6000	7.6900	289.1440
210	36.0700	7.7500	279.5425
220	34.8000	7.8000	271.4400
230	33.3600	7.8600	262.2096
240	32.3500	7.9000	255.5650
250	31.1800	7.9500	247.8810
260	30.1900	7.9900	241.2181

5.4.3.8.

Μετρήσεις φ/β συστήματος 4 στοιχείων CIS (2 εν σειρά κλάδοι αποτελούμενοι από δύο στοιχεία συνδεδεμένα σε παραλληλία) σε ένταση ακτινοβολίας $H=38,45\text{mW/cm}^2$
 Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 12-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I (mA)$	Τάση $V (V)$	Ισχύς $P (mW)$
0	79.5300	0.3300	26.2449
10	78.0600	0.8570	66.8974
20	76.5800	1.6320	124.9786
30	74.9500	2.3000	172.3850
40	72.8000	3.0200	219.8560
50	70.4400	3.6360	256.1198
60	68.1500	4.1800	284.8670
70	65.3900	4.6700	305.3713
80	62.5100	5.0900	318.1759
90	59.4400	5.4600	324.5424
100	56.0500	5.8060	325.4263
110	53.5400	6.0240	322.5250
120	50.9400	6.2370	317.7128
130	48.4000	6.4250	310.9700
140	46.1700	6.5800	303.7986
150	44.0200	6.7300	296.2546
160	42.0900	6.8500	288.3165
170	40.2700	6.9700	280.6819
180	38.6900	7.0700	273.5383
190	37.0700	7.1600	265.4212
200	35.4800	7.2600	257.5848
210	34.2400	7.3300	250.9792
220	32.9500	7.4000	243.8300
230	31.9600	7.4600	238.4216
240	30.7900	7.5200	231.5408
250	29.7600	7.5800	225.5808

270	29.2700	8.0300	235.0381	260	28.8500	7.6300	220.1255
280	28.4500	8.0600	229.3070	270	28.0500	7.6700	215.1435
290	27.4900	8.1000	222.6690	280	27.2500	7.7100	210.0975
300	26.7100	8.1300	217.1523	290	26.4200	7.7600	205.0192
310	25.8700	8.1600	211.0992	300	25.5800	7.8000	199.5240
320	25.2300	8.1900	206.6337	310	24.9200	7.8300	195.1236
330	24.5700	8.2200	201.9654	320	24.2800	7.8700	191.0836
340	23.9600	8.2400	197.4304	330	23.6300	7.9000	186.6770
350	23.3200	8.2600	192.6232	340	23.0900	7.9300	183.1037
360	22.7000	8.2800	187.9560	350	22.5000	7.9700	179.3250
370	22.2000	8.3000	184.2600	360	21.9800	8.0000	175.8400
380	21.7000	8.3300	180.7610	370	21.4600	8.0200	172.1092
390	21.1700	8.3500	176.7695	380	20.9100	8.0500	168.3255
400	20.6300	8.3700	172.6731	390	20.4900	8.0700	165.3543
450	18.5900	8.4500	157.0855	400	19.9700	8.1000	161.7570
500	16.8500	8.5200	143.5620	450	17.9900	8.1900	147.3381
550	15.4500	8.5700	132.4065	500	16.4000	8.2700	135.6280
600	14.2000	8.6200	122.4040	550	15.0000	8.3400	125.1000
650	13.1900	8.6600	114.2254	600	13.8500	8.4000	116.3400
700	12.2600	8.6900	106.5394	650	12.8600	8.4600	108.7956
750	11.5000	8.7200	100.2800	700	12.0200	8.5100	102.2902
800	10.8200	8.7500	94.6750	750	11.2600	8.5500	96.2730
850	10.2200	8.7700	89.6294	800	10.6200	8.5800	91.1196
900	9.6700	8.8000	85.0960	850	10.0300	8.6200	86.4586
950	9.1800	8.8100	80.8758	900	9.4900	8.6400	81.9936
1000	8.7300	8.8200	76.9986	950	9.0200	8.6700	78.2034
				1000	8.6000	8.6900	74.7340

5.4.4.1.

Μετρήσεις ενός εύκαμπτου φ/β στοιχείου α-Si σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως
 $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=5^\circ\text{C}$
Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011

<i>Αντίσταση R(Ω)</i>	<i>Ρεύμα I (mA)</i>	<i>Τάση V (V)</i>	<i>Ισχύς P (mW)</i>
0	1.5200	0.0010	0.0015
100	1.5000	0.1560	0.2340
200	1.4800	0.3030	0.4484
300	1.4600	0.4430	0.6468
400	1.4400	0.5860	0.8438
500	1.4100	0.7160	1.0096
600	1.3900	0.8430	1.1718
700	1.3700	0.9720	1.3316
800	1.3500	1.0920	1.4742
900	1.3300	1.2050	1.6027
1000	1.3000	1.3150	1.7095
1100	1.2700	1.4120	1.7932
1200	1.2400	1.5100	1.8724
1300	1.2200	1.6060	1.9593
1400	1.2000	1.6930	2.0316
1500	1.1800	1.7800	2.1004
1600	1.1500	1.8640	2.1436
1700	1.1300	1.9390	2.1911
1800	1.1000	2.0180	2.2198
1900	1.0800	2.0830	2.2496
2000	1.0600	2.1370	2.2652
2100	1.0400	2.2000	2.2880
2200	1.0100	2.2480	2.2705
2300	0.9900	2.2930	2.2701
2400	0.9600	2.3330	2.2397
2500	0.9400	2.3700	2.2278
2600	0.9200	2.4100	2.2172
2700	0.9000	2.4460	2.2014
2800	0.8800	2.5070	2.2062
2900	0.8600	2.5420	2.1861
3000	0.8400	2.5630	2.1529
3100	0.8300	2.5900	2.1497

3200	0.8100	2.6380	2.1368
3300	0.7900	2.6430	2.0880
3400	0.7700	2.6790	2.0628
3500	0.7600	2.7040	2.0550
3600	0.7400	2.7300	2.0202
3700	0.7300	2.7440	2.0031
3800	0.7100	2.7690	1.9660
3900	0.7000	2.7890	1.9523
4000	0.6900	2.8120	1.9403

5.4.4.2.

Μετρήσεις ενός εύκαμπτου φ/β στοιχείου a-Si σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=10^\circ\text{C}$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(\text{V})$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	1.5000	0.0030	0.0045
100	1.4800	0.1550	0.2294
200	1.4700	0.3010	0.4425
300	1.4500	0.4430	0.6423
400	1.4300	0.5750	0.8222
500	1.4000	0.7100	0.9940
600	1.3700	0.8360	1.1453
700	1.3600	0.9630	1.3097
800	1.3300	1.0780	1.4337
900	1.3100	1.1970	1.5681
1000	1.2900	1.3080	1.6873
1100	1.2700	1.4110	1.7920
1200	1.2400	1.5000	1.8600
1300	1.2200	1.5990	1.9508
1400	1.1900	1.6890	2.0099
1500	1.1700	1.7680	2.0686
1600	1.1400	1.8530	2.1124
1700	1.1200	1.9220	2.1526
1800	1.0900	1.9900	2.1691
1900	1.0700	2.0570	2.2010
2000	1.0500	2.1090	2.2145
2100	1.0200	2.1670	2.2103
2200	1.0000	2.2270	2.2270
2300	0.9800	2.2780	2.2324
2400	0.9600	2.3200	2.2272
2500	0.9400	2.3620	2.2203
2600	0.9100	2.4040	2.1876
2700	0.8900	2.4460	2.1769
2800	0.8700	2.4760	2.1541
2900	0.8600	2.5170	2.1646
3000	0.8400	2.5520	2.1437
3100	0.8200	2.5850	2.1197
3200	0.8000	2.6160	2.0928
3300	0.7800	2.6420	2.0608
3400	0.7700	2.6600	2.0482
3500	0.7500	2.6920	2.0190
3600	0.7400	2.7170	2.0106
3700	0.7200	2.7350	1.9692
3800	0.7100	2.7530	1.9546
3900	0.6900	2.7690	1.9106
4000	0.6800	2.7940	1.8999

5.4.4.3.

Μετρήσεις ενός εύκαμπτου φ/β στοιχείου a-Si σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(\text{V})$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	1.5200	0.0100	0.0152
100	1.5000	0.1620	0.2430
200	1.4800	0.3120	0.4618
300	1.4600	0.4550	0.6643
400	1.4400	0.5920	0.8525
500	1.4200	0.7280	1.0338
600	1.4000	0.8600	1.2040
700	1.3700	0.9790	1.3412
800	1.3500	1.0960	1.4796
900	1.3300	1.2090	1.6080
1000	1.3000	1.3200	1.7160
1100	1.2800	1.4230	1.8214
1200	1.2500	1.5230	1.9037
1300	1.2300	1.6190	1.9914
1400	1.2000	1.7090	2.0508
1500	1.1800	1.7900	2.1122
1600	1.1500	1.8700	2.1505
1700	1.1300	1.9320	2.1832
1800	1.1000	2.0000	2.2000
1900	1.0700	2.0600	2.2042
2000	1.0500	2.1190	2.2250
2100	1.0200	2.1700	2.2134
2200	1.0000	2.2240	2.2240
2300	0.9800	2.2760	2.2305
2400	0.9600	2.3070	2.2147
2500	0.9300	2.3610	2.1957
2600	0.9100	2.3960	2.1804
2700	0.8900	2.4320	2.1645
2800	0.8700	2.4740	2.1524
2900	0.8500	2.5140	2.1369
3000	0.8300	2.5410	2.1090
3100	0.8200	2.5620	2.1008
3200	0.8000	2.5970	2.0776
3300	0.7800	2.6190	2.0428
3400	0.7700	2.6390	2.0320
3500	0.7400	2.6630	1.9706
3600	0.7300	2.6770	1.9542
3700	0.7100	2.7080	1.9227
3800	0.7000	2.7230	1.9061
3900	0.6900	2.7430	1.8927
4000	0.6800	2.7550	1.8734

5.4.4.4.

Μετρήσεις ενός εύκαμπτου φ/β στοιχείου a-Si σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=30^\circ\text{C}$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(\text{V})$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	1.5600	0.0020	0.0031
100	1.5300	0.1580	0.2417
200	1.5100	0.3100	0.4681
300	1.4900	0.4580	0.6824
400	1.4700	0.6000	0.8820
500	1.4500	0.7310	1.0599
600	1.4200	0.8630	1.2255
700	1.4000	0.9970	1.3958
800	1.3800	1.1150	1.5387
900	1.3600	1.2370	1.6823
1000	1.3200	1.3400	1.7688
1100	1.3000	1.4440	1.8772
1200	1.2700	1.5340	1.9482
1300	1.2400	1.6270	2.0175
1400	1.2200	1.7240	2.1033
1500	1.1900	1.8000	2.1420
1600	1.1600	1.8700	2.1692
1700	1.1400	1.9500	2.2230
1800	1.1100	2.0100	2.2311
1900	1.0900	2.0700	2.2563
2000	1.0600	2.1300	2.2578
2100	1.0300	2.1720	2.2372
2200	1.0000	2.2260	2.2260
2300	0.9800	2.2700	2.2246
2400	0.9500	2.3170	2.2012
2500	0.9300	2.3500	2.1855
2600	0.9100	2.3940	2.1785
2700	0.8900	2.4350	2.1671
2800	0.8700	2.4740	2.1524
2900	0.8500	2.5000	2.1250
3000	0.8300	2.5230	2.0941
3100	0.8100	2.5500	2.0655
3200	0.7900	2.5760	2.0350
3300	0.7700	2.6000	2.0020
3400	0.7600	2.6260	1.9958
3500	0.7400	2.6520	1.9625
3600	0.7300	2.6760	1.9535
3700	0.7100	2.6890	1.9092
3800	0.7000	2.7130	1.8991
3900	0.6800	2.7270	1.8544
4000	0.6700	2.7400	1.8358

5.4.4.5.

Μετρήσεις ενός εύκαμπτου φ/β στοιχείου a-Si σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=40^\circ\text{C}$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011

Αντίσταση $R(\Omega)$	Ρεύμα $I(\text{mA})$	Τάση $V(\text{V})$	Ισχύς $P(\text{mW})$
0	1.5900	0.0020	0.0032
100	1.5700	0.1610	0.2528
200	1.5500	0.3190	0.4945
300	1.5300	0.4630	0.7084
400	1.5000	0.6160	0.9240
500	1.4800	0.7520	1.1130
600	1.4500	0.8860	1.2847
700	1.4300	1.0100	1.4443
800	1.4000	1.1350	1.5890
900	1.3800	1.2520	1.7278
1000	1.3400	1.3600	1.8224
1100	1.3200	1.4650	1.9338
1200	1.3000	1.5680	2.0384
1300	1.2700	1.6600	2.1082
1400	1.2400	1.7400	2.1576
1500	1.2000	1.8130	2.1756
1600	1.1700	1.8840	2.2043
1700	1.1400	1.9550	2.2287
1800	1.1100	2.0200	2.2422
1900	1.0800	2.0700	2.2356
2000	1.0600	2.1320	2.2599
2100	1.0300	2.1820	2.2475
2200	1.0000	2.2240	2.2240
2300	0.9700	2.2660	2.1980
2400	0.9500	2.3130	2.1974
2500	0.9300	2.3540	2.1892
2600	0.9100	2.3900	2.1749
2700	0.8900	2.4220	2.1556
2800	0.8600	2.4450	2.1027
2900	0.8400	2.4730	2.0773
3000	0.8200	2.5000	2.0500
3100	0.8000	2.5280	2.0224
3200	0.7800	2.5600	1.9968
3300	0.7700	2.5800	1.9866
3400	0.7500	2.6000	1.9500
3500	0.7400	2.6260	1.9432
3600	0.7200	2.6460	1.9051
3700	0.7100	2.6630	1.8907
3800	0.6900	2.6800	1.8492
3900	0.6700	2.6900	1.8023
4000	0.6600	2.7000	1.7820

5.4.4.6.

Μετρήσεις ενός εύκαμπτου φ/β στοιχείου a-Si σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=50^\circ\text{C}$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011

Αντίσταση	Ρεύμα	Τάση	Ισχύς
-----------	-------	------	-------

5.4.4.7.

Μετρήσεις ενός εύκαμπτου φ/β στοιχείου a-Si σε ένταση ακτινοβολίας λαμπτήρα πυρακτώσεως $H=7,3\text{mW/cm}^2$ σε θερμοκρασία $\theta=60^\circ\text{C}$

Ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης: 17-03-2011

Αντίσταση	Ρεύμα	Τάση	Ισχύς
-----------	-------	------	-------

<i>R(Ω)</i>	<i>I (mA)</i>	<i>V (V)</i>	<i>P (mW)</i>	<i>R(Ω)</i>	<i>I (mA)</i>	<i>V (V)</i>	<i>P (mW)</i>
0	1.6700	0.0020	0.0033	0	1.6600	0.0080	0.0133
100	1.6500	0.1730	0.2854	100	1.6400	0.1730	0.2837
200	1.6300	0.3330	0.5428	200	1.6100	0.3330	0.5361
300	1.6100	0.4900	0.7889	300	1.5800	0.4920	0.7774
400	1.5800	0.6430	1.0159	400	1.5600	0.6370	0.9937
500	1.5500	0.7810	1.2106	500	1.5300	0.7860	1.2026
600	1.5200	0.9180	1.3954	600	1.5100	0.9200	1.3892
700	1.4800	1.0500	1.5540	700	1.4700	1.0500	1.5435
800	1.4500	1.1770	1.7067	800	1.4400	1.1750	1.6920
900	1.4200	1.2900	1.8318	900	1.4100	1.2900	1.8189
1000	1.4000	1.4040	1.9656	1000	1.3700	1.3950	1.9112
1100	1.3600	1.5090	2.0522	1100	1.3400	1.4950	2.0033
1200	1.3200	1.6000	2.1120	1200	1.3100	1.5830	2.0737
1300	1.2800	1.6850	2.1568	1300	1.2700	1.6700	2.1209
1400	1.2600	1.7700	2.2302	1400	1.2300	1.7400	2.1402
1500	1.2300	1.8420	2.2657	1500	1.2000	1.8120	2.1744
1600	1.1800	1.9090	2.2526	1600	1.1600	1.8800	2.1808
1700	1.1500	1.9820	2.2793	1700	1.1300	1.9400	2.1922
1800	1.1200	2.0420	2.2870	1800	1.1000	2.0000	2.2000
1900	1.1000	2.0950	2.3045	1900	1.0700	2.0500	2.1935
2000	1.0700	2.1390	2.2887	2000	1.0500	2.0950	2.1998
2100	1.0300	2.1900	2.2557	2100	1.0100	2.1350	2.1563
2200	1.0000	2.2300	2.2300	2200	0.9800	2.1750	2.1315
2300	0.9800	2.2700	2.2246	2300	0.9500	2.2170	2.1062
2400	0.9500	2.3050	2.1898	2400	0.9300	2.2500	2.0925
2500	0.9200	2.3370	2.1500	2500	0.9000	2.2760	2.0484
2600	0.9000	2.3700	2.1330	2600	0.8800	2.3100	2.0328
2700	0.8700	2.3950	2.0837	2700	0.8500	2.3350	1.9848
2800	0.8500	2.4300	2.0655	2800	0.8300	2.3630	1.9613
2900	0.8300	2.4550	2.0376	2900	0.8100	2.3900	1.9359
3000	0.8100	2.4760	2.0056	3000	0.8000	2.4100	1.9280
3100	0.7900	2.4950	1.9711	3100	0.7700	2.4300	1.8711
3200	0.7700	2.5200	1.9404	3200	0.7500	2.4400	1.8300
3300	0.7500	2.5400	1.9050	3300	0.7300	2.4600	1.7958
3400	0.7400	2.5550	1.8907	3400	0.7100	2.4800	1.7608
3500	0.7200	2.5700	1.8504	3500	0.7000	2.4900	1.7430
3600	0.7000	2.5900	1.8130	3600	0.6800	2.5060	1.7041
3700	0.6900	2.6080	1.7995	3700	0.6600	2.5200	1.6632
3800	0.6700	2.6200	1.7554	3800	0.6500	2.5320	1.6458
3900	0.6600	2.6300	1.7358	3900	0.6400	2.5460	1.6294
4000	0.6400	2.6360	1.6870	4000	0.6200	2.5520	1.5822

Βιβλιογραφία

- [1] Κ.Θ. Δέρβος “Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [2] Κ. Καγκαράκης “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”
- [3] S.O.Kasap “Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων” Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2^η έκδοση, Αθήνα 2004
- [4] Ελένη Κατσιά “Εναπόθεση λεπτών υμενίων υδρογονωμένου πυρίτιου για φωτοβολταϊκή εφαρμογή σε αντιδραστήρες πλάσματος: επίδραση της πίεσης, της χημικής σύστασης και της εξωτερικής πόλωσης στον ρυθμό εναπόθεσης και στην μετάβαση από άμορφο σε νανοκρυσταλλικό”, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2006
- [5] Ahmad D. Hammad “Χημική εναπόθεση μικροκρυσταλλικού πυρίτιου σε αντιδραστήρες πλάσματος: μηχανισμοί θέρμανσης ηλεκτρονίων και εναλλακτικές τεχνικές αύξησης ρυθμού εναπόθεσης”, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2004
- [6] Ξ. Ανδρουλάκης, Ν. Ηλιάκης “Ο Ήλιος”
- [7] MIT OpenCourseWare “Fundamentals of Photovoltaics” 2008
- [8] DGS “Planning and Installing Photovoltaic Systems: A guide for installers, architects and engineers” Earthscan, 2^η έκδοση, 2008
- [9] Antonio Luque, Steven Hegedus “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, John Wiley & Sons Inc , 2003
- [10] S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt, R. Corkish “Applied Photovoltaics” Earthscan, 2^η έκδοση, 2007
- [11] Peter Würfel “Physics of Solar Cells: from principles to new concepts” , Wiley-VCH, 2005
- [12] Mary D. Archer, Robert Hill “Clean Electricity from Photovoltaics”, Imperial College Press, 2001
- [13] Sorin Grama “A Survey of Thin Film Photovoltaic Industry & Technologies”, 2007
- [14] Jef Poortmans, Vladimir Arkhipov “Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications”, John Wiley & Sons, 2006
- [15] Marwan M. Mahmoud “Investigations on characteristic parameters and power degradation of amorphous silicon solar modules based on long-term outdoor testing”, 2001
- [16] K. L. Chopra¹, P. D. Paulson, V. Dutta “Thin-Film Solar Cells: An Overview”, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2004; 12:69–92
- [17] J. Merten, J. M. Asensi, C. Voz, A. V. Shah, R. Platz, J. Andreu “Improved Equivalent Circuit and Analytical Model for Amorphous Silicon Solar Cells and Modules”, , IEEE transactions on electron devices, Vol. 45, No. 2, February 1998

- [18] J. Carabe, J.J. Gandia “*Thin Film Silicon Solar Cells*”, *Opto-electronics Review* 12(1), 1–6 (2004)
- [19] Joseph J.Loferski “*An Introduction to the Physics of Solar Cells*”
- [20] M.C.M. van de Sanden “*Amorphous silicon solar cells*”, Eindhoven University of Technology
- [21] N. Wyrsh, S. Dunand, C. Ballif “*Bifacial a-Si:H solar cells: Origin of the asymmetry between front and back illumination*”, *Proceedings of NUMOS*, 2007
- [22] Kazuo Morigaki “*Physics of amoprhous semiconductors*”, 1999
- [23] Wilfried G.J.H.M. van Sark “*Methods of Deposition of Hydrogenated Amorphous Silicon for Device Applications*”, Debye Institute, Utrecht University
- [24] A. Kolodziej “*Staebler-Wronski effect in amorphous silicon and its alloys*”, *Opto-electronics Review* 12(1), 21–32 (2004)
- [25] A. V. Shah, H. Schade, M. Vanecek, J. Meier, E. Vallat-Sauvain, N. Wyrsh, U. Kroll, C. Droz, J. Bailat “*Thin-film Silicon Solar Cell Technology*”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2004; 12:113–142 (DOI: 10.1002/pip.533)
- [26] David Toub “*A Review of Photovoltaic Cells*”
- [27] Jacob Moeller “*Photovoltaic Cells*”, 2003
- [28] Peter Thomas Landsberg “*Theoretical limits of photovoltaic solar energy conversion*”

Ιστογραφία

- [1] <http://www.wikipedia.org/> , “*The free encyclopedia*”
- [2] <http://www.covertec.gr/history> , “*Ιστορική Εξέλιξη Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*”
- [3] <http://www.arvisolar.gr/Contents.aspx?CatId=14&lang=gr> , “*Ιστορία των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*”
- [4] <http://www.pveducation.org/> , “*A collection of resources for the photovoltaic educator.*”
- [5] http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php , “*Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών στοιχείων*”