



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ



ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ
ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ
ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΧΡ. ΝΤΟΥΣΚΑΣ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2009

Επίβλεψη

- Καθηγητής Δ. Μανωλάκος, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Ε.Μ.Π.
- Επικ. Καθηγήτρια Δ. Παπαδημητρίου Ε.Μ.Π.
- Δρ. Σ. Τσελεπής Διευθυντής τμήματος Φ/Β Συστημάτων και
Διεσπαρμένης Παραγωγής Κ.Α.Π.Ε.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

- Καθηγητής Δ. Μανωλάκος, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Ε.Μ.Π.
- Επικ.Καθηγητής Γ.Χ. Βοσνιάκος, Σχολή Μηχανολόγων
Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Καθηγητής Χ. Παναγόπουλος Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-
Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Επικ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κ. Παπαδημητρίου και τον και τον Καθηγητή κ. Μανωλάκο για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου δόθηκε μέσω αυτής να αποκτήσω πολλές γνώσεις στον τομέα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Ακόμα θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την συνεχή και πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Στ. Τσελεπή, διευθυντή του τμήματος Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του Κ.Α.Π.Ε για την παραχώρηση εγκαταστάσεων και μηχανημάτων στο Κ.Α.Π.Ε., καθώς και για την συνεχή υποστήριξη του κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στον Ευάγγελο Παπανικολάου, στο μηχανουργείο του οποίου και με την προσωπική του εργασία κατασκευάστηκε η διάταξη που περιγράφεται στην διπλωματική. Επίσης πολύτιμη ήταν και η συμβολή των τεχνικών και του προσωπικού του εργαστηρίου του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών της σχολής μου με τις διορθώσεις και τις προσθήκες που έκαναν στην διάταξη αυτή.

Σωτήρης Ντούσκας

Περιεχόμενα

1. Ευχαριστίες.....	2
2. Κατάλογος εικόνων.....	4
3. Περίληψη.....	6
4. Abstract.....	7
5. Εισαγωγή.....	8
6. Ιστορική αναδρομή.....	10
7. Ημιαγωγοί.....	12
8. Ετεροεπαφές p-n.....	19
9. Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης (I-V) ημιαγωγικών διόδων.....	26
10. Αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων.....	30
11. Επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά της ηλιακής κυψέλης.....	37
12. Συντελεστής Πλήρωσης (Fill Factor-FF).....	37
13. Δομή Πολλαπλών Ετεροεπαφών.....	39
14. Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων (thin film solar cells-TFSC).....	41
15. Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων άμορφου πυριτίου (a-Si).....	50
16. Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων Κάδμιου-Τελλούριου (Cadmium- telluride – CdTe).....	53
17. Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων χαλκοπυριτικού απορροφητή (CIS-CIGS).....	55
18. Κυκλωμάτωση των ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων.....	58
19. Ελάχιστο πάχος.....	59
20. Ισοδύναμο Κύκλωμα.....	61
21. Σύγκριτικά δεδομένα μεταξύ των νέων τεχνολογιών ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων.....	63
22. Μελλοντικές Προκλήσεις.....	65
23. Κατασκευή.....	71
24. Μετρήσεις – Αποτελέσματα.....	79
25. Συμπεράσματα.....	114
26. Βιβλιογραφία.....	115
27. Βιογραφικό.....	116

Κατάλογος εικόνων – πινάκων

1. Ενεργειακές Ζώνες Ημιαγωγών.....	13
2. Επαφή p-n.....	21
3. Επαφή p-n – Διαγράμματα.....	22
4. Ορθή πόλωση επαφής p-n	23
5. Ανάστροφη πόλωση επαφής p-n	25
6. Επαφή p-n σε ηλεκτρικό κύκλωμα	28
7. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης επαφής p-n	29
8. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης επαφής p-n	30
9. Επαφή p-n υπό ακτινοβολήση	31
10. Επαφή p-n με κλαδωτό ηλεκτρόδιο	32
11. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης διόδου	36
12. Δίοδος υπό ακτινοβολήση σε κύκλωμα	37
13. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης διόδου	39
14. Ηλεκτρικά μεγέθη ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων	46
15. Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων διάφορων εταιριών με ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	47
16. Μικροδομή τεχνολογίας CIGS	48
17. Μικροδομή τεχνολογίας CdTe.....	48
18. Παραγωγή-εκτύπωση λεπτού υμενίου (film).....	50
19. Κυκλωμάτωση λεπτών υμενίων	59
20. Απορροφητής – Διαχωρισμός ζευγών ηλεκτρονίων - οπών	60
21. Διαμόρφωση για μεγαλύτερη απορρόφηση φωτός	61
22. Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακής κυψέλης.....	62
23. Αγορά ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων και κόστος αυτών	63
24. Ηλεκτρικά μεγέθη και πάχος λεπτών υμενίων	69
25. Τρισδιάστατη όψη της διάταξης	72
26. Τρισδιάστατη όψη της διάταξης	72
27. Κατασκευαστικό σχέδιο.....	73
28. Κατασκευαστικό σχέδιο.....	74
29. Κατασκευαστικό σχέδιο.....	75
30. Πίνακας ιδιοτήτων plexiglass	76
31. Πίνακας ιδιοτήτων αλουμινίου	78
32. Δοκίμιο και σύμβαση ονοματολογίας	79
33. Δοκίμιο και ωμικές επαφές κυψελών	80
34. Ηλεκτρικές μετρήσεις δοκιμίου CIGS με χρήση της ιδιοκατασκευής	81
35. Ηλεκτρικές μετρήσεις δοκιμίου CIGS με χρήση της ιδιοκατασκευής	82
36. Τρισδιάστατο γράφημα βαθμών απόδοσης στην επιφάνεια του δοκιμίου	104
37. Τρισδιάστατο γράφημα βαθμών απόδοσης στην επιφάνεια του δοκιμίου	105
38. Ηλεκτρικές μετρήσεις κυψέλης πυριτίου με χρήση της ιδιοκατασκευής	110
39. Ηλεκτρικές μετρήσεις κυψέλης πυριτίου με χρήση της ιδιοκατασκευής.....	111
40. Ηλεκτρικές μετρήσεις κυψέλης πυριτίου με χρήση διάταξης του Κ.Α.Π.Ε.....	112

Περίληψη

Η τεχνολογία ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων αποτελεί μια πολύ σημαντική εξέλιξη στον τομέα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Καθώς όμως είναι σχετικά πρόσφατη παρουσιάζει ακόμα πολλές δυσκολίες και προβλήματα που θα πρέπει να επιλυθούν. Έτσι θα μπορεί να αποτελέσει μια άμεση και πρακτική λύση στον χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει θεωρείται ότι η τεχνολογία ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων αποτελεί το μέλλον της ηλιακής ενέργειας.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή μιας μηχανικής ρυθμιστικής διάταξης για μέτρηση των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) μιας ηλιακής κυψέλης τεχνολογίας CIGS. Η διάταξη αυτή θα πρέπει να πραγματοποιεί μετρήσεις με τρόπο ώστε να μην δημιουργεί προβλήματα στην λειτουργία των ηλιακών κυψελών. Αυτό είναι πολύ σημαντικό αφού οι μέχρι τώρα αντίστοιχες προσπάθειες (συγκολλήσεις, προϋπάρχουσες διατάξεις για την μέτρηση χαρακτηριστικών σε συμβατικές κυψέλες πυριτίου) δημιουργούσαν πολύ σημαντικά προβλήματα στην λειτουργία των κυψελών.

Έτσι η διάταξη αυτή αποτελείται από δυο ακροδέκτες. Ο ένας είναι κάθετος προς την κυψέλη. Ο άλλος ακροδέκτης είναι σχεδόν παράλληλος με αυτή (για την ακρίβεια με μια μικρή κλίση ως προς αυτή). Ο κάθετος ακροδέκτης μπορεί να κινείται και στις τρεις διαστάσεις. Δηλαδή μπορεί να σαρώνει όλη την επιφάνεια της κυψέλης. Ο παράλληλος ακροδέκτης, μπορεί να πραγματοποιεί μικρές μετατοπίσεις καθ' ύψος. Φωτογραφίες, τρισδιάστατες απεικονίσεις και τα κατασκευαστικά σχέδια της διάταξης βρίσκονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας. Πράγματι από την διαδικασία των μετρήσεων αποδείχθηκε ότι η κατασκευή έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί μετρήσεις άμεσα, με ευκολία και με ακρίβεια. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι δεν δημιουργεί προβλήματα στην λειτουργικότητα των ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων.

Με τον τρόπο αυτό μετρήθηκαν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε 21 κυψέλες. Όλες οι κυψέλες ήταν τοποθετημένες σε ένα δοκίμιο. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν ήταν η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V), ο βαθμός απόδοσης και άλλα ηλεκτρικά μεγέθη.

Τέλος μετρήθηκε και μια συμβατική κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου. Αυτές οι κυψέλες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Τελικά πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δυο τεχνολογιών.

Abstract

The technology of the thin film solar cells, is a very important development in the field of photovoltaics. Since it is relatively new, it still presents a number of difficulties and problems, which need to be solved. So it can become direct and practical solution in the area of renewable energy sources, since the advantages are many and highly significant. For this reason, it is thought that the technology of thin film solar cells constitutes the future of solar energy.

This thesis aims at the construction of a mechanical device for the measurement of the voltage – current characteristics curves (I-V), of a solar cell CIGS's technology. This mechanical adjusting module must carry out measurements in a way, that does not create problems, in the the function of the solar cells. This is very important since the attempts made so far (weldings, pre - existence arrangements for characteristics measurement in conventional sillicone cells) have caused important problems in cell's function.

So this construction consists of two pins, one vertical to the cell and the other almost parallel to this (specifically, this has a slight tilt to the cell). The vertical pin can move in three dimensions. So it can rake the whole surface of the cell. The parallel pin can make small displacements in height. Photographs, 3-D depictions as well as the constructive outline of the device, can be found at the corresponding chapter of this study. Indeed as it has been proved from the procedure of the measurements, this consrtruction has the ability, to measure directly, easily, practically and without provoking problems to the operation of the thin film solar cells.

In this way have been measured the electrcal characteristics of 21 cells. These cells were placed in a module. The electrical characteristics measured were the current – voltage characteristic curve, the efficiency and others such as reffering in the corresponding chapter of the measurements.

Finally a conventional crystalline sillicone cell has been measured. This type of solar cells is widely used to applications of photovoltaics. Finally, a comparison between the two types of technologies took place.

Εισαγωγή

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της σημερινής εποχής είναι το ενεργειακό ζήτημα. Οι λόγοι που το καθιστούν τόσο σημαντικό είναι ο περιορισμός των διαθέσιμων ποσοτήτων των ορυκτών καυσίμων και των υδρογονανθράκων. Επίσης η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση, αλλά και οι επιπτώσεις που δημιουργεί η κατανάλωση αυτών των συμβατικών πηγών ενέργειας στο περιβάλλον και κατά συνέπεια στην ποιότητα ζωής και στην υγεία των ανθρώπων. Για τους λόγους αυτούς είναι επιτακτική η στροφή σε άλλες πηγές ενέργειας. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα φαίνεται να το δίνουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μια από τις πλέον διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας θεωρείται η ηλιακή ενέργεια. Μέσω της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας μετατρέπεται σε διαθέσιμη και εκμεταλλεύσιμη μορφή. Όμως θεωρείται δεδομένο ότι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει πολλά περιθώρια βελτίωσης σε θέματα αποδοτικότητας και οικονομικού κόστους. Στο πλαίσιο αυτό κινείται και η παρούσα διπλωματική εργασία. Στόχος της είναι η κατασκευή μιας μηχανικής διάταξης με τη βοήθεια της οποίας θα λαμβάνονται χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) σε ηλιακές κυψέλες. Για το λόγο αυτό με τη χρήση της διάταξης θα μετρηθεί μια πειραματική κυψέλη τεχνολογίας CIS. Ακόμα θα μετρηθεί και μια συμβατική κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου και θα γίνει σύγκριση μεταξύ τους. Οι μετρήσεις έγιναν με την βοήθεια ειδικής βαθμονομημένης διάταξης μετρήσης ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ηλιακών κυψελών που βρίσκεται στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας .

Ανακεφαλαιώνοντας σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή μιας μηχανικής ρυθμιστικής διάταξης και χρήση της σε σύστημα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού ηλιακών κυψελών με στόχο την μέτρηση των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) σε ηλιακές κυψέλες. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η εργασία χωρίζεται σε τρία κυρίως μέρη : το σχεδιαστικό, το κατασκευαστικό και τις μετρήσεις. Ύστερα από την ολοκλήρωση της κατασκευής, πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ηλιακών κυψελών. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν όπως αναφέρθηκε με τη βοήθεια ειδικού βαθμονομημένου συστήματος ηλεκτρικού χαρακτηρισμού ηλιακών κυψελών. Με βάση τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα επιχειρηθεί να γίνει και μια χαρτογράφηση του δοκιμίου. Η χαρτογράφηση αναφέρεται στον βαθμό απόδοσης που παρουσιάζουν οι διάφορες κυψέλες που αποτελούν το δοκίμιο.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι μελλοντικές προοπτικές που υπάρχουν σχετικά με αυτή την διάταξη είναι η κατασκευή της σε μικρότερη κλίμακα με παράλληλη ενσωμάτωση μικρομετρικών συστημάτων. Έτσι θα μπορεί να λειτουργήσει στον κρυογενικό θάλαμο που υπάρχει στις εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π. Δηλαδή θα είναι εφικτή η λήψη μετρήσεων και σε περιβάλλον ελεγχόμενο θερμοκρασιακά. Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατόν να λαμβάνονται ηλεκτρικές μετρήσεις και να εξετάζεται η λειτουργία των κυψελών σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Ιστορική Αναδρομή

[3]Ο ήλιος από την δημιουργία του πλανήτη αποτέλεσε τη βασική μορφή ενέργειας και ήταν ο καθοριστικός εκείνος παράγοντας για την δημιουργία της ζωής. Έχει υπολογιστεί ότι ο ήλιος μέσα σε μια ώρα στέλνει στη γη ενέργεια με τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας, όση απαιτείται για το σύνολο των ανθρώπινων και φυσικών δραστηριοτήτων σε διάστημα ενός έτους. Έτσι η ιστορία της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ξεκινά το 1839 όταν ο Alexandre-Edmund Becquerel παρατήρησε ροή ηλεκτρικού ρεύματος κατά την διάρκεια κάποιων χημικών αντιδράσεων υπό την επίδραση του φωτός. Κάποιες δεκαετίες αργότερα (1876) το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε με την στερεή ουσία σελήνιο (Selenium). Μεγαλύτερη κατανόηση αυτών των φαινομένων σημειώθηκε με την ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας στις αρχές του 19ου αιώνα, και με την κατανόηση της φύσης του φωτός. Ακολούθησε η δημιουργία των πρώτων συσκευών στερεής κατάστασης στα τέλη της δεκαετίας του 1940. Αυτό το γεγονός οδήγησε στην ανακοίνωση δημιουργίας της πρώτης ηλιακής κυψέλης πυριτίου με βαθμό απόδοσης 6%, η οποία αποτέλεσε και την πρώτη λειτουργική ηλιακή κυψέλη. Έτσι δεν αργησαν και οι πρώτες πρακτικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα την χρονιά 1958 με την εκτόξευση του δορυφόρου Vanguard 1, το οποίο ήταν το πρώτο όχημα που χρησιμοποιούσε ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από τον ήλιο. Στην συνέχεια ακολούθησε μεγάλη ανάπτυξη στις αρχές της δεκαετίας 1970 εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης της εποχής. Σήμερα η φωτοβολταϊκή τεχνολογία γνωρίζει πολύ σημαντική ανάπτυξη. Πλέον σαν πηγή ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται αξιόπιστη. Η λειτουργία και συντήρηση τέτοιων εγκαταστάσεων έχει πολύ χαμηλό κόστος. Η όλη λειτουργία αυτών των συστημάτων είναι αθόρυβη, δεν έχουν κινούμενα μέρη και το

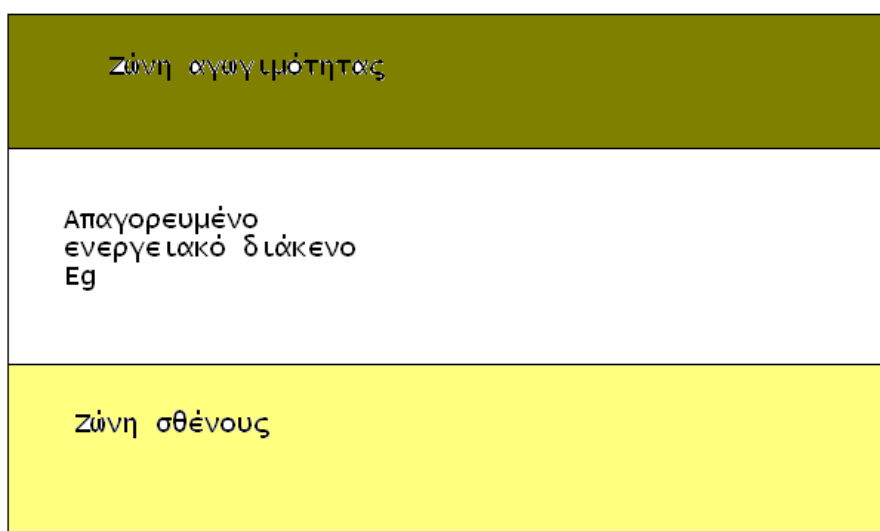
σημαντικότερο είναι ότι δεν παράγουν καθόλου ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα συστήματα αυτά είναι πολύ εύκολο να ρυθμιστούν. Εγκαθίστανται πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα να έχουμε παροχή ισχύος άμεσα στα σημεία που χρειάζεται, χωρίς την ανάγκη γραμμών μεταφοράς.

Ήδη υπάρχουν πάρα πολλές εφαρμογές σε διάφορες εγκαταστάσεις. Πολύ συχνά έχουμε ενέργεια σε μέρη όπου θα ήταν αδύνατη άλλου είδους παροχή ισχύος. Τα οφέλη, κοινωνικά οικονομικά και περιβαλλοντολογικά είναι προφανή στις διάφορες τοπικές κοινότητες.

Το κόστος είναι ανάλογο με άλλες μικρές πηγές ενέργειας όπως γεννήτριες diesel. Το μόνο μειονέκτημα είναι το μεγάλο κεφάλαιο που απαιτείται για μια τέτοια επένδυση. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί χρηματοδότησης ή φοροαπαλλαγών σε τέτοιες επενδύσεις. Όμως επειδή ακόμα η τεχνολογία συγκρινόμενη με τις συμβατικές πηγές ενέργειας υστερεί, θα πρέπει να εξελιχτεί ακόμα περισσότερο και να γίνει ακόμα πιο ανταγωνιστική.

Ημιαγωγοί

[1,2,4,8,9,10] Τα ηλεκτρόνια στα άτομα των κρυσταλλικών στερεών μπορούν να υπάρξουν μόνο σε σαφώς καθορισμένες ενεργειακές ζώνες. Όταν τα άτομα πλησιασουν αρκετά κοντά, όπως στα κρυσταλλικά πλέγματα, οι ενεργειακές αυτές ζώνες χάνονται. Έτσι δημιουργείται μια ανώτερη και μια κατώτερη ζώνη, οι οποίες ονομάζονται ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) και ζώνη σθένους (valence band) αντίστοιχα. Σχηματικά το φαινόμενο αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



1. Ενεργειακές Ζώνες Ημιαγωγών

Το σχήμα αυτό είναι απλοποιημένο. Στην πραγματικότητα οι διάφορες ζώνες δεν είναι ευθείες αλλά καμπύλες που προκύπτουν από την λύση της εξίσωσης Schrödinger. Χάριν ευκολίας όμως συμβολίζεται με αυτό τον τρόπο. Στο σχήμα, E_c είναι η ενέργεια στο χαμηλότερο σημείο της ζώνης αγωγιμότητας. Αντίστοιχα E_v είναι η ενέργεια στο υψηλότερο σημείο της ζώνης σθένους. Η διαφορά ενέργειας μεταξύ αυτών των δύο ονομάζεται ενεργειακό διάκενο ή ενεργειακό χάσμα (E_g).

Σε θερμοκρασία δωματίου και σε κανονικές συνθήκες πίεσης οι τιμές για το ενεργειακό διάκενο είναι 0.66 eV για το Ge, 1.12 eV για το Si και 1.42 eV για το GaAs. Αυτές είναι χαρακτηριστικές τιμές για τα πιο πάνω υλικά όταν αυτά βρίσκονται σε πολύ καθαρή μορφή. Σε υλικά με υψηλό ποσοστό προσμίξεων (νόθευση) τα ενεργειακά διακείνα είναι μικρότερα. [1] Πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι στους περισσότερους ημιαγωγούς τα ενεργειακά διακείνα μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Σε έναν καθαρό ημιαγωγό περιέχεται αμελητέα ποσότητα ακαθαρσιών. Για την περίπτωση του πυριτίου θεωρείται ότι κάθε άτομο του πλέγματος μοιράζεται τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους με τέσσερα γειτονικά άτομα. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς. Αν στο πλέγμα αυτό αντικατασταθεί ένα άτομο πυριτίου με ένα, για παράδειγμα, άτομο φωσφόρου το οποίο έχει πέντε ηλεκτρόνια σθένους, τότε το επιπλέον ηλεκτρόνιο σθένους "δίνεται" στην ζώνη αγωγιμότητας. Σε αυτήν την περίπτωση ο ημιαγωγός παρουσιάζει αγωγιμότητα τύπου n. Αυτό οφείλεται στην παρουσία του επιπλέον ηλεκτρονίου που δίνει ένα πλεόνασμα αρνητικού φορτίου. Το άτομο του φωσφόρου τότε ονομάζεται δότης. Αντίστοιχα φαινόμενα σημειώνονται αν το άτομο του πυριτίου αντικατασταθεί από ένα άτομο βορίου. Το βόριο έχει τρία ηλεκτρόνια σθένους. Τότε ο ημιαγωγός μπορεί να δεχθεί ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο ώστε να σχηματίσει τους ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά του άτομα. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι υπάρχει ένα πλεόνασμα θετικού φορτίου, ή αλλιώς μια οπή (έννοια που χρησιμοποιείται σε αντιδιαστολή με το ηλεκτρόνιο εκφράζοντας το αντίστοιχο θετικό φορτίο). Έτσι το άτομο του βορίου ονομάζεται αποδέκτης.

Ο αριθμός των φορέων που βρίσκονται μέσα στις ζώνες εξαρτάται από τον αριθμό και το είδος των προσμίξεων και τη θερμοκρασία του κρυστάλλου. Μια άλλη πολύ σημαντική παράμετρος είναι η στάθμη Fermi (E_f). Αντιπροσωπεύει την ενεργειακή στάθμη της οποίας η πιθανότητα να

καταλαμβάνεται από ηλεκτρόνιο είναι $\frac{1}{2}$ (υπό την προϋπόθεση να υπάρχει μια κβαντική στάθμη σε αυτή την τιμή ενέργειας για να καταληφθεί από ηλεκτρόνιο). Αν δεν υπάρχει τέτοια στάθμη ο ορισμός παραμένει σε ισχύ καθορίζοντας μια υποθετική στάθμη Fermi. Κάνοντας χρήση της προσέγγισης Boltzmann στη συνάρτηση Fermi-Dirac αποδεικνύεται ότι η συνολική πυκνότητα των ηλεκτρονίων για τη ζώνη αγωγιμότητας είναι

$$n = N_c \exp\{-(E_c - E_f)/kT\}$$

όπου το N_c ονομάζεται ενεργός πυκνότητα των ενεργειακών σταθμών στη ζώνη αγωγιμότητας και προσδιορίζεται από την σχέση

$$N_c = 2 \left\{ 2\pi m^* kT/h^2 \right\}^{3/2}$$

Αντίστοιχες σχέσεις δίνονται για τις οπές στη ζώνη σθένους:

$$p = N_v \exp\{-(E_f - E_v)/kT\}$$

$$N_v = 2 \left\{ 2\pi m^* kT/h^2 \right\}^{3/2}$$

όπου N_v η ενεργός πυκνότητα των ενεργειακών σταθμών στη ζώνη σθένους. Στις παραπάνω εξισώσεις με m^* συμβολίζεται η ενεργός μάζα ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα.

Η εξίσωση που δίνει την τιμή που έχει η στάθμη Fermi είναι η:

$$E_f = E_g/2 + (kT/2) \ln(N_v/N_c)$$

Έτσι με βάση αυτή την εξίσωση βλέπουμε ότι σε θεωρητικά καθαρούς ημιαγωγούς ισχύει ότι $N_v = N_c$. Ακόμα η στάθμη Fermi βρίσκεται ακριβώς στο μέσο του ενεργειακού διακένου. Κάνοντας χρήση των εξισώσεων για την πυκνότητα ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και των οπών στη ζώνη σθένους λαμβάνουμε:

$$np = ni^2 = N_v N_c \exp\{-(E_c - E_v)/kT\}$$

Στην παραπάνω εξίσωση το μέγεθος ni έχει έντονη εξάρτηση από τη θερμοκρασία και το είδος του ημιαγωγού που προσδιορίζεται από την τιμή $E_c - E_v = E_g$.

Στους ημιαγωγούς με προσμίξεις όπου είναι $N_v \neq N_c$ η στάθμη Fermi εξαρτάται από τον τύπο του ημιαγωγού. Ο νόμος δράσης των μαζών ισχύει σε αυτή την περίπτωση. Το αποτέλεσμα είναι ανεξάρτητο από τη νόθευση που έχει υποστεί ο ημιαγωγός. Σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες οι περισσότεροι δότες και αποδέκτες ιονίζονται και η συνθήκη ουδετερότητας μπορεί να προσεγγισθεί από την σχέση:

$$n + N_A = p + N_D$$

Για το επίπεδο Fermi σε ημιαγωγούς τύπου n όπου είναι $N_D \gg N_A$ μπορούμε να συμπεράνουμε με βάση τις παραπάνω εξισώσεις (και κάνοντας την παραδοχή ότι $n \approx N_D$) ότι η στάθμη Fermi θα είναι μετατοπισμένη. Συγκεκριμένα θα βρίσκεται πιο κοντά στην ζώνη αγωγιμότητας. Αντίστοιχα για ημιαγωγούς τύπου p όπου $N_D \ll N_A$ (και $p \approx N_A$) η στάθμη Fermi θα βρίσκεται πιο κοντά στην ζώνη σθένους. Ημιαγωγοί για τους οποίους ισχύει $N_D \gg N_A$ εμφανίζουν αγωγιμότητα που κυριαρχείται από ολίσθηση ηλεκτρονίων. Σε αυτούς τους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια χαρακτηρίζονται σαν φορείς πλειονότητας. Ωστόσο θα υπάρχουν πάντα και μερικές οπές. Αυτές θα προέρχονται πιθανότατα από ενδογενείς διεργασίες στο υλικό και χαρακτηρίζονται σαν φορείς μειονότητας. Η συγκέντρωση των φορέων μειονότητας προσδιορίζεται αξιοποιώντας τον νόμο δράσης των μαζών:

$$np = ni^2 .$$

Όταν ο ημιαγωγός δεν βρίσκεται σε συνθήκες ισορροπίας, δηλαδή όταν προσδίδεται σε αυτόν ενέργεια είτε με τη μορφή ακτινοβολίας σε διάφορα μήκη κύματος είτε από επιβαλλόμενο πεδίο, έχουμε μεταφορά των φορέων. Αυτή συντελείται με δυο τρόπους. Με την ολίσθηση των φορέων και με την διαδικασία διάχυσης όταν το δυναμικό εφαρμόζεται σε μια εγγέουσα επαφή όπως είναι η ημιαγωγίμη δίοδος.

Η ολίσθηση των φορέων κυριαρχείται από τους μηχανισμούς σκέδασης, οι οποίοι περιορίζουν τη ροή των φορέων. Κατά την απουσία ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου η ταχύτητα των ηλεκτρονίων είναι υψηλή. Συγκεκριμένα προσδιορίζεται από το νόμο της ισοκατανομής μεταξύ της θερμικής ενέργειας του πλέγματος και της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων. Αιτίες σκέδασης στους κρυστάλλους αποτελούν οι ταλαντώσεις του πλέγματος, ακαθαρσίες και προσμίξεις, κρυσταλλικές ατέλειες κάθε είδους και οι επιφάνειες των υλικών. Η επιβολή ηλεκτρικού πεδίου προξενεί αύξηση της ταχύτητας ολίσθησης. Προξενεί όμως και αύξηση της συχνότητας των συγκρούσεων μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των κέντρων σκέδασης. Το γεγονός αυτό περιορίζει την μέγιστη τιμή της ταχύτητας ολίσθησης.

[10] Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου σε έναν ημιαγωγό προκαλεί κάμψη των ενεργειακών ζωνών. Η συνολική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου E ισούται με $\Delta E + KE$. Όμως υπάρχει μια επιπλέον συνεισφορά στη ΔE η οποία για ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι σταθερή. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο E_x συνεπάγεται λόγω της σχέσης $dV/dx = -E_x$, την ύπαρξη ενός γραμμικά φθίνοντος δυναμικού $V(x) = -Ax - B$. Δηλαδή, η ΔE , που είναι ίση με $eV(x)$ του ηλεκτρονίου είναι πλέον ίση με $-eAx - eB$. Άρα το μέγεθος αυτό μειώνεται γραμμικά κατά μήκος του ημιαγωγού. Κατά συνέπεια όλα τα ενεργειακά επίπεδα και επομένως όλες οι ενεργειακές ζώνες μετατοπίζονται. Η μετατόπιση οφείλεται στην επίδραση του εξωτερικού πεδίου.

Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου E_x το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στη ζώνη αγωγιμότητας, αρχίζει να μετακινείται. Επομένως αρχίζει να αποκτά ενέργεια από το πεδίο. Όταν το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με μια θερμική ταλάντωση ενός ατόμου του πλέγματος, χάνει ένα μέρος της ενέργειάς του. Έτσι μεταβαίνει εκ νέου στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας. Στη συνέχεια το ηλεκτρόνιο επιταχύνεται και πάλι υπό την επίδραση του πεδίου, με αποτέλεσμα μια νέα σύγκρουση με άτομα του πλέγματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ολίσθηση (drift) του ηλεκτρονίου και οφείλεται στην επιβολή του πεδίου. Η ταχύτητα ολίσθησης του ηλεκτρονίου v_{de} ισούται με $\mu_e E_x$ (όπου μ_e είναι η κινητικότητα ολίσθησης του ηλεκτρονίου). Αντίστοιχα φαινόμενα παρατηρούνται και για τις οπές που βρίσκονται στη ζώνη σθένους. Η διαφορά είναι ότι αυτές κινούνται κατά την φορά του πεδίου.

Η αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού (ο οποίος διαρέεται από ρεύμα ηλεκτρονίων) ορίζεται από την σχέση:

$$J = q n V_d$$

όπου J παριστάνει την πυκνότητα ρεύματος (A/mm^2). Όμως ισχύουν:

$$V_d = \mu E \text{ και } \sigma_n = q n \mu. \text{ Άρα}$$

$$J = q \mu_e E = \sigma_n E$$

Όταν στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού συνυπάρχουν ηλεκτρόνια και οπές τότε είναι

$$J = q [\mu_e n + \mu_p p] E = [\sigma_n + \sigma_p] E = \sigma E$$

Στη βιομηχανία ημιαγωγών πολύ σημαντικό είναι το μέγεθος της ειδικής αντίστασης ρ ($=1/\sigma$). Το μέγεθος αυτό περιγράφει συγκεντρωτικά τις

χαρακτηριστικές ιδιότητες της κινητικότητας και της συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγώγιμου υλικού.

Στη συνέχεια θεωρούμε έναν ημιαγωγό στον οποίο προσπίπτουν φωτόνια ενέργειας $h\nu > E_g$. Τα φωτόνια αυτά μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Ταυτόχρονα αφήνουν μια οπή στη ζώνη σθένους. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί επιπλέον συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων Δn και οπών Δp . Αυτό αποτελεί κλασσικό παράδειγμα έγχυσης φορέων στο ημιαγώγιμο υλικό. Η διαδικασία αυτή συνυπάρχει και αντισταθμίζεται από την διαδικασία της επανασύνδεσης των φορέων που συντελείται στο υλικό. Η επανασύνδεση των φορέων γίνεται με δυο τρόπους. Απευθείας από την ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους ή συντελείται με την βοήθεια των ενεργειακών σταθμών που βρίσκονται στο μέσο του ενεργειακού διακένου ανάλογα με το υλικό του ημιαγωγού. Ο νόμος δράσης των μαζών δεν ισχύει, όταν υπάρχει έγχυση φορέων. Το ίδιο ισχύει και για την έννοια της στάθμης Fermi. Αυτό συμβαίνει γιατί όλα αυτά τα μεγέθη έχουν ορισθεί για την κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

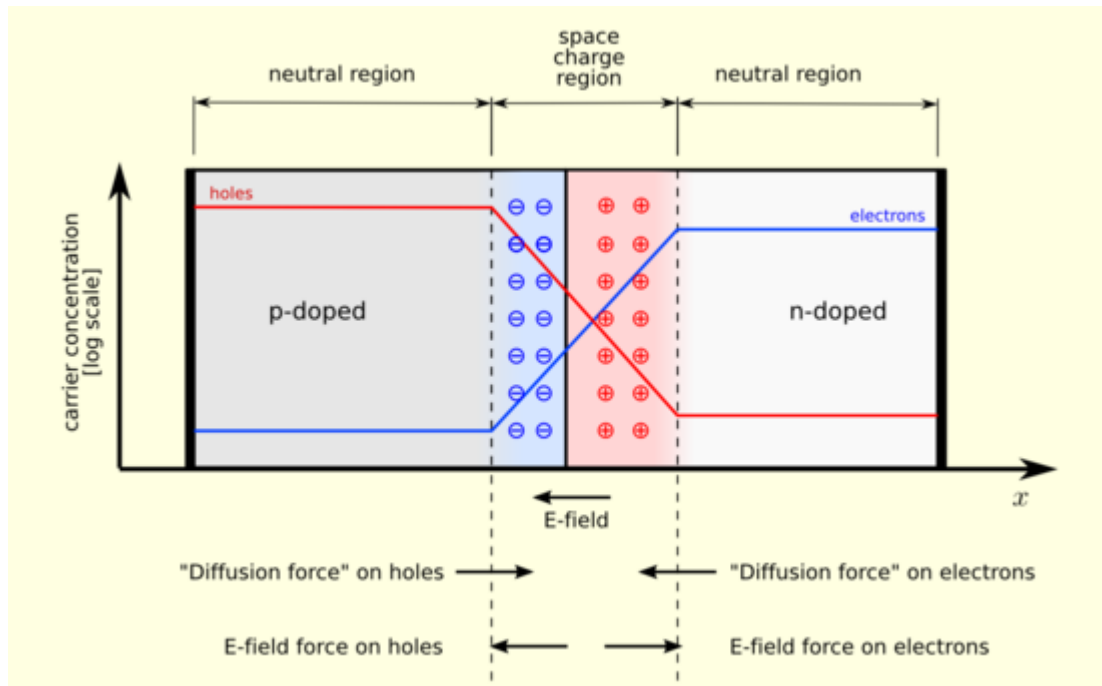
Στην πράξη, τα ημιαγώγιμα υλικά συνήθως λειτουργούν υπό την ταυτόχρονη ύπαρξη και των δυο φαινομένων. Δηλαδή και με την ύπαρξη ενός επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου (το οποίο είναι υπεύθυνο για το ρεύμα ολίσθησης) και με τοπική έγχυση φορέων (η οποία επιφέρει το ρεύμα διάχυσης). Κατά συνέπεια το συνολικό ρεύμα σε αυτή την περίπτωση δίνεται από το αλγεβρικό άθροισμα των συνιστωσών για το ρεύμα ολίσθησης και το ρεύμα διάχυσης.

Ετεροεπαφές p-n

[1,4,9,10] Μια ετεροεπαφή p-n σχηματίζεται από έναν ημιαγωγό αγωγιμότητας p και έναν ημιαγωγό αγωγιμότητας n σε πλήρη επαφή. Ο όρος ετεροεπαφή αναφέρεται στο σημείο όπου τα δυο είδη ημιαγωγών βρίσκονται σε επαφή. Συνήθως κατασκευάζονται από έναν απλό κρύσταλλο με διαφορετικά είδη προσμίξεων στις διάφορες περιοχές του. Οι ετεροεπαφές p-n παρουσιάζουν ιδιότητες που είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσες στην σύγχρονη ηλεκτρονική. Οι ημιαγωγοί αγωγιμότητας p έχουν ως φορείς πλειονότητας οπές. Οι ημιαγωγοί αγωγιμότητας n έχουν ως φορείς πλειονότητας ηλεκτρόνια. Η επαφή που σχηματίζουν μεταξύ τους δεν άγει το ρεύμα. Αυτό το μονωτικό επίπεδο ονομάζεται ζώνη απογύμνωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι φορείς ηλεκτρικού φορτίου στις νοθευμένες p και n περιοχές έλκονται. Στη συνέχεια αλληλοεξουδετερώνονται με βάση τη διαδικασία που ονομάζεται επανασύνδεση. Χρησιμοποιώντας αυτό το μονωτικό επίπεδο, οι ετεροεπαφές p-n συχνά χρησιμοποιούνται σαν δίοδοι. Δηλαδή σαν κυκλωματικά στοιχεία που επιτρέπουν την ροή ηλεκτρικού ρεύματος μόνο προς τη μια κατεύθυνση και όχι προς την αντίστροφη. Αυτή η ιδιότητα εξηγείται με βάση τους όρους ορθή και ανάστροφη πόλωση. Ο όρος πόλωση να αναφέρεται στην εφαρμογή της ηλεκτρικής τάσης στην επαφή p-n.

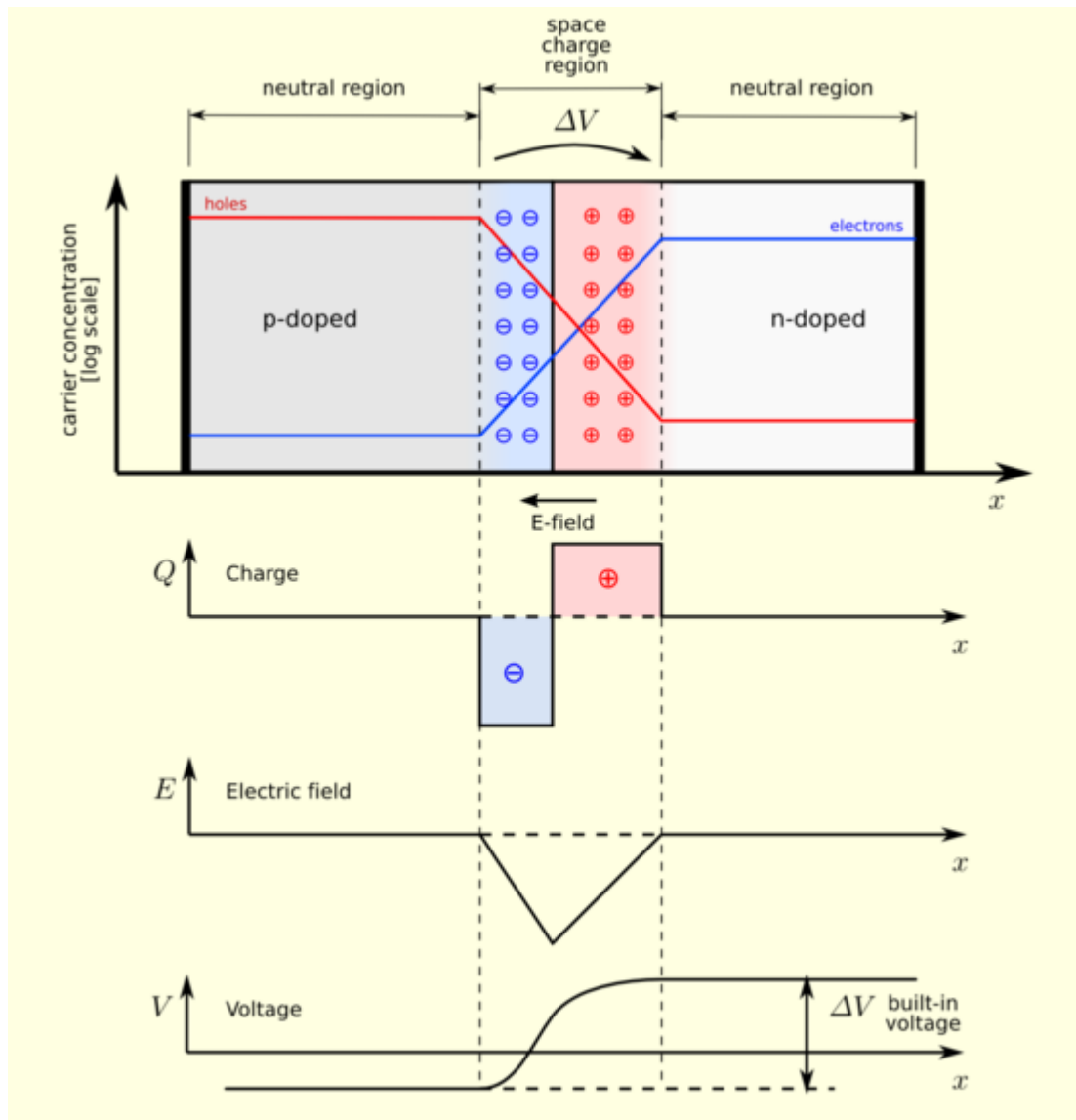
Μια ετεροεπαφή p-n χωρίς εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση, βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Μια διαφορά δυναμικού να σχηματίζεται κατά μήκος της επαφής. Αυτή η διαφορά δυναμικού ονομάζεται φράγμα δυναμικού (built-in potential). Σε μια επαφή p-n σε ισορροπία τα ηλεκτρόνια κοντά στην ένωση τείνουν να διαχυθούν στην p περιοχή. Καθώς αυτά διαχέονται αφήνουν πίσω τους θετικά φορτισμένα ιόντα (δότες) στην n

περιοχή. Αντίστοιχα συμβαίνει και με τις οπές οι οποίες διαχέονται στην n περιοχή αφήνοντας πίσω τους αρνητικά φορτισμένα ιόντα. Έτσι η περιοχή κοντά στην ένωση p-n χάνει την ουδετερότητα του φορτίου της. Έτσι σχηματίζεται η περιοχή φορτίου χώρου ή περιοχή απογύμνωσης.



2. Επαφή p-n

Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή φορτίου χώρου εμποδίζει την διαδικασία διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών. Έτσι παρατηρούνται δυο ταυτόχρονα φαινόμενα. Η διαδικασία διάχυσης που τείνει να αυξήσει την περιοχή φορτίου, και το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται στην περιοχή και τείνει να συγκρατήσει την διάχυση των φορέων. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται σχηματικά τα φαινόμενα αυτά. Ακόμα φαίνεται και η συγκέντρωση των φορέων στην κατάσταση ισορροπίας.

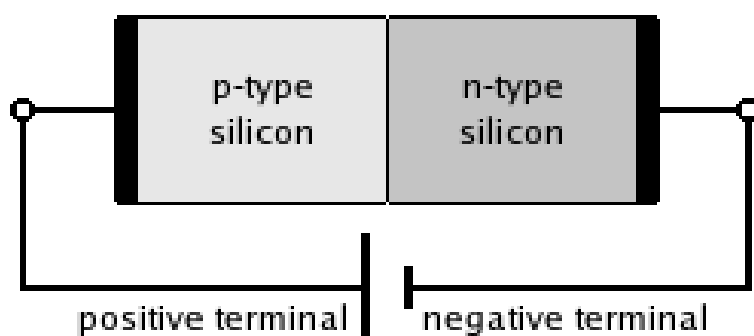


3. Επαφή p-n - Διαγράμματα

Η περιοχή φορτίου χώρου είναι μια ζώνη με καθαρό φορτίο που παρέχεται από τα ιόντα που δεν έχουν καλυφθεί από την διάχυση των φορέων πλειονότητας. Στην κατάσταση ισορροπίας η πυκνότητα του φορτίου περιγράφεται από μια βηματική συνάρτηση. Στην πραγματικότητα η περιοχή αυτή είναι εντελώς απογυμνωμένη από φορείς πλειονότητας (αφήνοντας μια πυκνότητα φορτίου ίση με το καθαρό επίπεδο νόθευσης). Το άκρο μεταξύ της περιοχής φορτίου χώρου και της ουδέτερης περιοχής είναι αρκετά αιχμηρό (όπως φαίνεται και στο σχήμα). Η περιοχή φορτίου χώρου έχει το ίδιο φορτίο στις δυο πλευρές της ένωσης p-n. Εκτείνεται

όμως περισσότερο στην λιγότερο νοθευμένη πλευρά (όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα διαγράμματα στην n πλευρά). Στην συνέχεια εξετάζονται οι δυο τρόποι σύνδεσης μιας επαφής p-n.

Συγκεκριμένα στην ορθή πόλωση η p περιοχή συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη της πηγής. Αντίστοιχα η n περιοχή συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη (όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα)

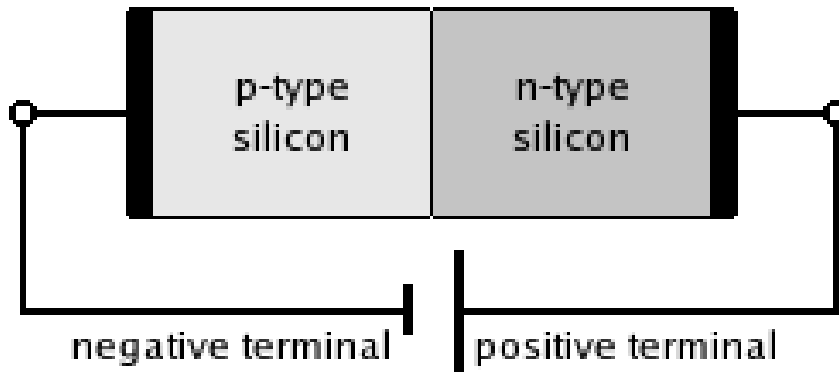


4. Ορθή πόλωση επαφής p-n

Όταν μια πηγή συνδέεται με αυτόν τον τρόπο οι οπές της p περιοχής και τα ηλεκτρόνια της n περιοχής ωθούνται προς την επαφή. Αυτό μειώνει το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης. Το θετικό φορτίο που εφαρμόζεται στην p περιοχή απωθεί τις οπές. Το αρνητικό φορτίο που εφαρμόζεται στην n περιοχή απωθεί τα ηλεκτρόνια. Καθώς οπές και ηλεκτρόνια ωθούνται προς την περιοχή της επαφής, η μεταξύ τους απόσταση μειώνεται. Αποτέλεσμα είναι να μειώνεται και το φράγμα δυναμικού. Αυξάνοντας την τάση, η ζώνη απογύμνωσης γίνεται όλο και πιο λεπτή. Έτσι το ηλεκτρικό πεδίο δεν μπορεί να εξουδετερώσει την κίνηση των φορέων κατά μήκος της ένωσης p-n. Κατά συνέπεια μειώνεται και η αντίσταση. Τα ηλεκτρόνια που διασχίζουν την επαφή p-n προς την p περιοχή (και αντίστοιχα οι οπές προς την n περιοχή) διαχέονται κοντά στην ουδέτερη περιοχή. Εκεί η τιμή της διάχυσης μειονότητας καθορίζει και την τιμή του ρεύματος που θα ρέει από την δίοδο. Μόνο οι φορείς μειονότητας μπορούν να ρέουν έναν ημιαγωγό

σε μακροσκοπικά μήκη. Έτσι τα ηλεκτρονίων σε ορθή πόλωση ωθούνται από την n περιοχή και φτάνουν στην p αφού το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης είναι πλέον πολύ μικρό. Όταν φτάσουν στην p περιοχή αρχίζουν να επανασυνδέονται με τις οπές που βρίσκονται ως φορείς πλειονότητας σε αυτή την περιοχή. Το μέσο μήκος που διασχίζουν τα ηλεκτρόνια στην p περιοχή μέχρι την επανασύνδεση τους ονομάζεται μήκος διάχυσης. Το μήκος διάχυσης είναι της τάξης μικρομέτρων. Τα ηλεκτρόνια διεισδύουν μόνο σε μια μικρή απόσταση στην p περιοχή. Το ρεύμα όμως συνεχίζει να ρέει χωρίς διακοπή αφού οι οπές που είναι φορείς πλειονότητας ρέουν προς τη αντίθετη κατεύθυνση. Το συνολικό ρεύμα (το άθροισμα του ρεύματος οπών και του ρεύματος ηλεκτρονίων) είναι σταθερό στο χώρο αυτό. Προκύπτει σύμφωνα με τον νόμο ρευμάτων του Kirchhoff. Η ροή ηλεκτρονίων από την n στην p περιοχή είναι ανάλογη με την ροή οπών από την p στην n περιοχή. Δηλαδή μακροσκοπικά η ροή ρεύματος μέσα από την δίοδο αποτελείται από την ροή ηλεκτρονίων από την n περιοχή προς την επαφή και την ροή οπών από την p περιοχή προς την επαφή. Τα δυο αυτά είδη φορέων συνεχώς επανασυνδέονται κοντά στην περιοχή της ένωσης. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές ρέουν προς αντίθετες κατευθύνσεις. Έχουν επίσης διαφορετικά φορτία. Έτσι το συνολικό ρεύμα έχει την ίδια κατεύθυνση και στις δυο πλευρές τις διόδου.

Στην ανάστροφη πόλωση η p περιοχή συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής και η n περιοχή με τον θετικό ακροδέκτη.



5. Ανάστροφη πόλωση επαφής p-n

Όταν η p περιοχή είναι συνδεδεμένη με τον αρνητικό ακροδέκτη, οι οπές απωθούνται μακριά από την επαφή. Αυξάνεται έτσι το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης. Ομοίως η n περιοχή είναι συνδεδεμένη με τον θετικό ακροδέκτη. Άρα τα ηλεκτρόνια απωθούνται μακριά από την περιοχή της ένωσης. Για το λόγο αυτό η περιοχή απογύμνωσης μεγαλώνει. Μάλιστα είναι ανάλογη με την εφαρμοζόμενη τάση ανάστροφης πόλωσης. Το γεγονός αυτό αυξάνει το φράγμα δυναμικού. Η αντίσταση στη ροή φορέων φορτίου είναι πλέον μεγαλύτερη. Έτσι ελαχιστοποιείται η ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ετεροεπαφής p-n.

Αναφέρθηκε ότι το πλάτος της ζώνης απογύμνωσης αυξάνεται ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τάση ανάστροφης πόλωσης. Αυτό συνεχίζει μέχρι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου να ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Τότε η περιοχή απογύμνωσης της επαφής p-n καταρρέει. Τότε παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό συμβαίνει είτε λόγω του φαινομένου Zener είτε λόγω του φαινομένου της χιονοστιβάδας. Και τα δυο αυτά φαινόμενα δεν είναι καταστροφικά, αρκεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος να μην φτάσει σε τόσο υψηλά επίπεδα ώστε να προκαλέσει υπερθέρμανση και λιώσιμο της επαφής.

Το φαινόμενο Zener θεωρείται ότι είναι μια μορφή διάσπασης. Παρατηρείται όταν η ανάστροφη πόλωση είναι πολύ ισχυρή. Τότε η ανώτατη στάθμη της ζώνης σθένους στην περιοχή p μπορεί να βρεθεί ενεργειακά υψηλότερα από την κατώτερη στάθμη της ζώνης αγωγιμότητας στην περιοχή n. Έτσι, όταν η ζώνη απογύμνωσης είναι αρκετά λεπτή, τα ηλεκτρόνια μπορούν να την διασπάσουν. Περνούν από την ζώνη σθένους της περιοχής p στην ζώνη αγωγιμότητας της περιοχής n.

Το φαινόμενο της χιονοστοιβάδας παρατηρείται, όταν το ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή γίνεται πολύ ισχυρό. Τότε μπορούν οι φορείς να αποκτούν μεταξύ διαδοχικών μη ελαστικών συγκρούσεων τόση ενέργεια όση χρειάζεται για την παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίων οπών.

Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης (I-V) ημιαγωγικών διόδων

[1,4,9,10] Η απόκριση I-V μιας διόδου ετεροεπαφής p-n χαρακτηρίζεται από τη διαδικασία μεταφοράς των φορέων μειονότητας. Δηλαδή την διάχυση των εγχεόμενων ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου p και την διάχυση των οπών στην περιοχή τύπου n. Αυτή η διαδικασία ελέγχει και περιορίζει την όλη ροή ρεύματος μέσα από την περιοχή της επαφής p-n. Η εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων που περιγράφουν τις συνιστώσες ρεύματος στην πολωμένη επαφή p-n στηρίζεται στις εξισώσεις συνέχειας και διάχυσης. Στην ορθή πόλωση οι οπές (ή τα ηλεκτρόνια) εγχέονται στην περιοχή τύπου n (ή τύπου p). Επανασυνδέονται με τους υπάρχοντες φορείς πλειονότητας, καθώς απομακρύνονται από την περιοχή της επαφής. Αυτό οδηγεί σε μόνιμη κατάσταση. Η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται από μεταβολή της συγκέντρωσης των φορέων. Συνεπώς εμφανίζεται και ρεύμα διάχυσης. Στην ανάστροφη πόλωση οι τιμές των συγκεντρώσεων που προξενούν τις συνιστώσες ρεύματος διάχυσης είναι κατά πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερες. Έτσι τα μετρούμενα ρεύματα στην ανάστροφη πόλωση αναμένονται να είναι και αυτά κατά πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερα από ότι είναι στην περίπτωση μιας ορθά πολωμένης διόδου. Η εξίσωση μεταξύ της πυκνότητας ρεύματος και της επιβαλλόμενης τάσης είναι:

$$J = J_s \{ \exp [q V_{APP}(f)/nkT] - 1 \} \text{ όπου:}$$

$V_{APP}(f)$ είναι η επιβαλλόμενη τάση και

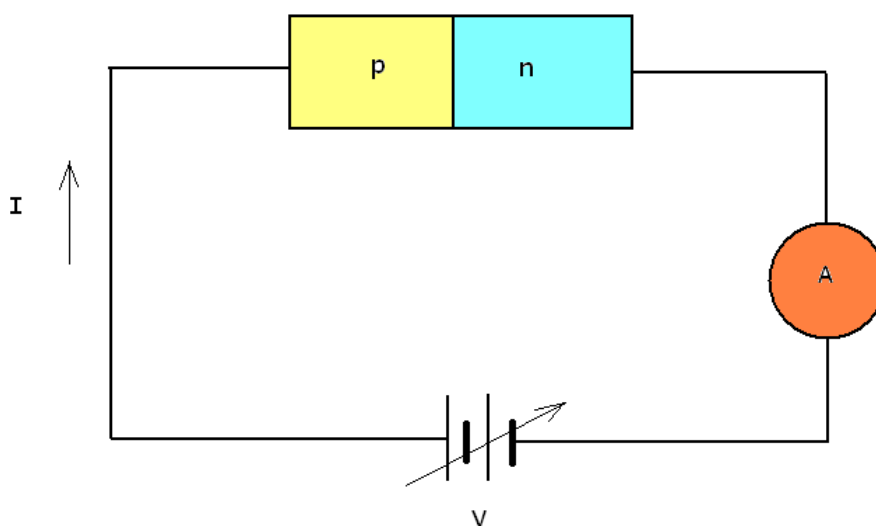
$$J_s = q n_i^2 \left\{ \frac{D_n}{(N_A L_n)} + \frac{D_p}{(N_D L_p)} \right\}$$

Η πιο πάνω σχέση δίνει την πυκνότητα ρεύματος σε ορθά πολωμένη ιδανική δίοδο επαφής p-n. Η πυκνότητα ρεύματος J_s ονομάζεται ρεύμα κόρου κατά

την ανάστροφη πόλωση. Παρέχει την τιμή της πυκνότητας ρεύματος που διαρρέει την ιδανική επαφή p-n κατά την ανάστροφη πόλωση. Δηλαδή το J_s δεν εξαρτάται από την επιβαλλόμενη τάση. Εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους των υλικών που αποτελούν την δίοδο. Έτσι συνήθως στις κατασκευές θέλουμε το J_s να είναι όσο το δυνατό πιο μικρό. Επομένως τα υλικά πρέπει να έχουν μεγάλο ενεργειακό διάκενο, έντονη νόθευση και μεγάλους χρόνους ζωής των φορέων μειονότητας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης (I-V) των πραγματικών διόδων είναι ο συντελεστής ποιότητας n , η επανασύνδεση και η δημιουργία νέων φορέων στην περιοχή W και η διάσπαση της επαφής p-n στην περιοχή ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων. Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν τα φαινόμενα χιονοστοιβάδας και η διάσπαση τύπου Zener – φαινόμενο σήραγγας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια επαφή p-n σαν μέρος εξωτερικού κυκλώματος σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:

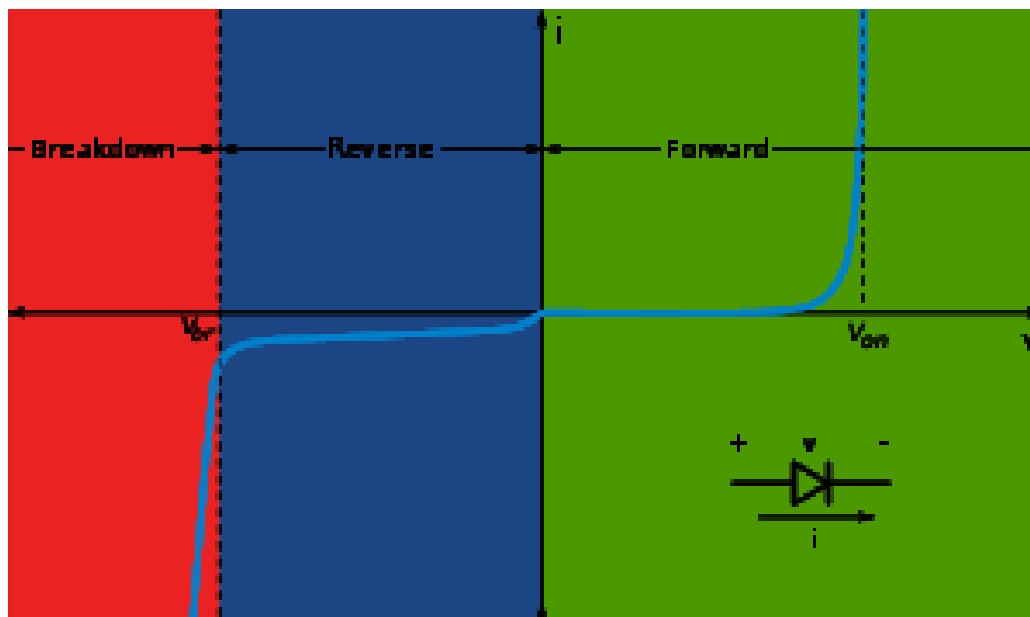


6. Επαφή p-n σε ηλεκτρικό κύκλωμα

Η διάταξη αυτή άγει πολύ ευκολότερα ρεύμα στην κατεύθυνση απο το p προς το n από ότι στην αντίθετη κατεύθυνση. Η σχέση που συνδέει ρεύμα και τάση είναι η:

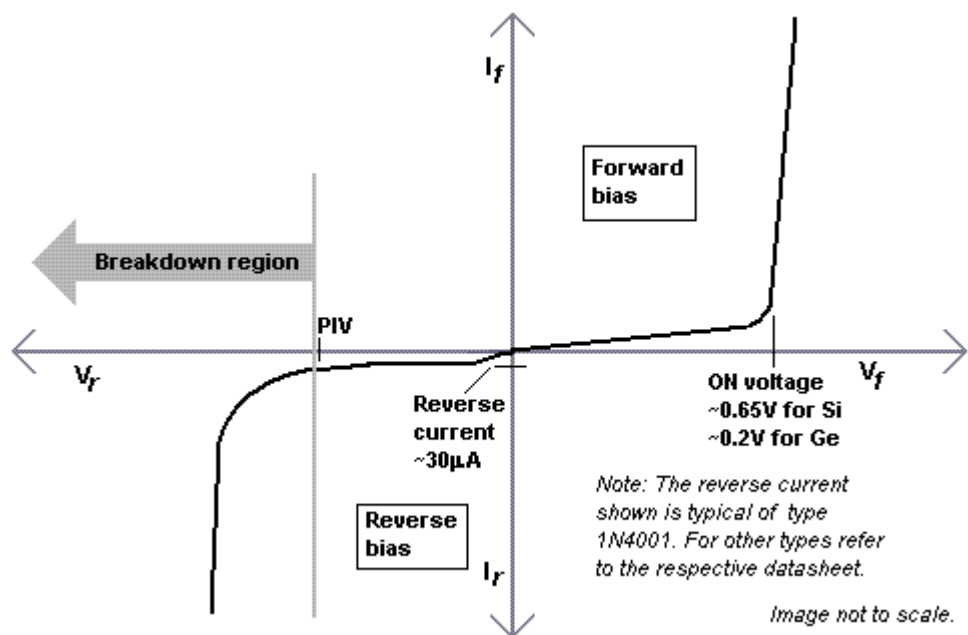
$$I = I_s (e^{eV/kT} - 1)$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση τα υλικά αυτά δεν ακολουθούν τον νόμο του Ohm. Οι όροι της παραπάνω εξίσωσης είναι I_s το ρεύμα κόρου, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, T η θερμοκρασία και V η εφαρμοζόμενη τάση. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι της μορφής:



7. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης επαφής p-n

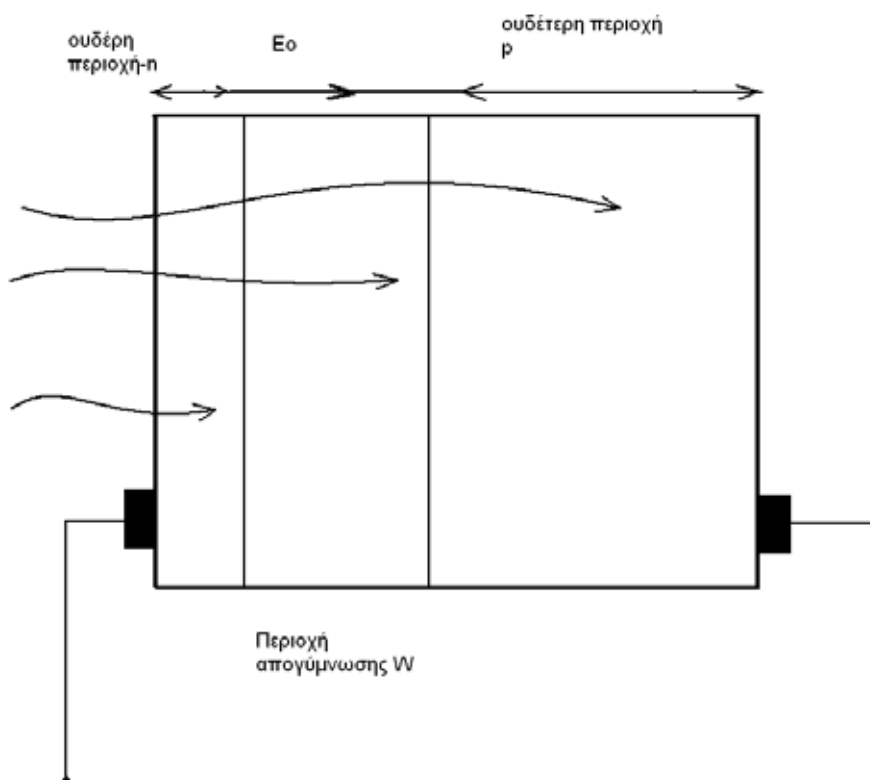
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης μιας επαφής p-n έχει εκθετική μορφή που περνάει από την αρχή των αξόνων. Για αρνητικές τιμές τάσης, δηλαδή για ανάστροφη πόλωση τα ρεύματα που μετρώνται είναι πολύ μικρά. Στην περίπτωση της ορθής πόλωσης δηλαδή για θετικές τιμές τάσης το ρεύμα παίρνει πολύ μεγάλες τιμές.



8. . Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης επαφής p-n

Αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

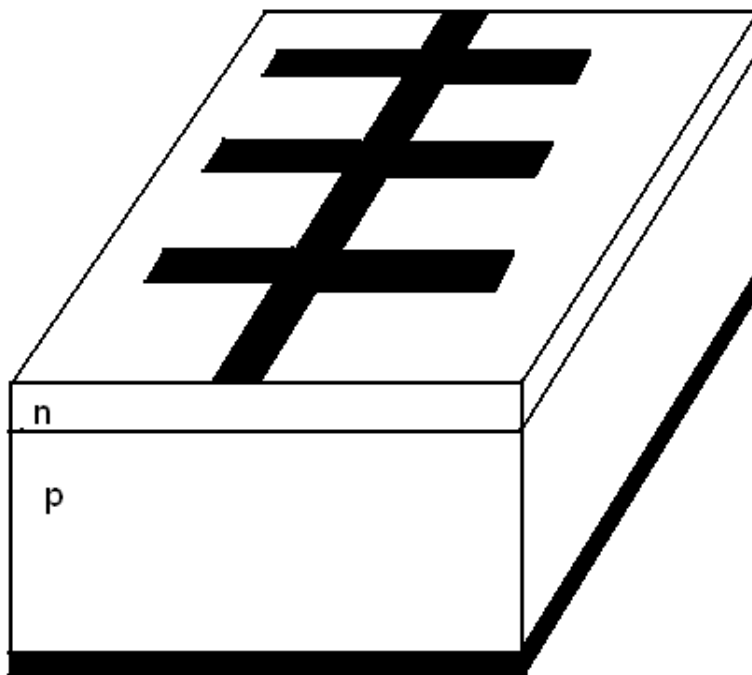
[1,2,3,8,9,10] Θεωρούμε μια ετεροεπαφή p-n με πολύ λεπτή και έντονα νοθευμένη περιοχή n. Ακόμα υποθέτουμε ότι η ακτινοβολήση γίνεται από την μεριά της λεπτής n-περιοχής.



9. Επαφή p-n υπό ακτινοβολήση

Έτσι η περιοχή απογύμνωσης (W) ή αλλιώς περιοχή απογύμνωσης φορτίου χώρου εκτείνεται κατά κύριο λόγο στην p-περιοχή. Στην περιοχή απογύμνωσης υπάρχει ένα ηλεκτρικό φορτίο E_0 . Τα ηλεκτρόδια στην πλευρά της ακτινοβολήσης (δηλαδή στην n-περιοχή) πρέπει να επιτρέπουν την ακτινοβολία να φτάνει στην διάταξη. Παράλληλα πρέπει να έχουν χαμηλή εν σειρά αντίσταση. Για τον λόγο αυτό τα ηλεκτρόδια που

τοποθετούνται στην n-περιοχή, δημιουργούν μια διάταξη κλαδωτών ηλεκτροδίων στην επιφάνεια.



10. Επαφή p-n με κλαδωτό ηλεκτρόδιο

Αφού η n-περιοχή είναι πολύ λεπτή τα πιο πολλά φωτόνια διέρχονται μέσα από αυτή. Στη συνέχεια απορροφώνται μέσα στην περιοχή απογύμνωσης της ουδέτερης p-περιοχής. Επομένως στις περιοχές αυτές δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών (ZHO). Εξαιτίας όμως της ύπαρξης του πεδίου E_0 τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται λόγω της φωτοδημιουργίας διαχωρίζονται αμέσως. Τα ηλεκτρόνια κινούνται στην ουδέτερη n-περιοχή δημιουργώντας ένα πλεόνασμα αρνητικού φορτίου κατά $-e$. Οι οπές κινούνται προς την ουδέτερη p-περιοχή καθιστώντας την θετικά φορτισμένη. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια τάση ανοικτού κυκλώματος στους ακροδέκτες της διάταξης. Δηλαδή η p-περιοχή είναι

θετικά φορτισμένη σε σχέση με την n-περιοχή. Συνδέοντας ένα εξωτερικό φορτίο τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια μπορούν καταναλώνοντας έργο να κινηθούν. Μέσω του εξωτερικού κυκλώματος μπορούν να φτάσουν στην p-περιοχή. Έκει επανασυνδέονται με τις επιπλέον οπές που βρίσκονται σε αυτήν την περιοχή.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα τα φωτόνια με μεγάλο μήκος κύματος διεισδύουν σε μεγαλύτερο βάθος. Φτάνουν στην p-περιοχή, όπου και διαχέονται αφού σε αυτή την περιοχή δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Το ηλεκτρόνιο κάθε ζεύγους που δημιουργείται έχει ένα μέσο χρόνο επανασύνδεσης τ_e . Ακόμα διαχέεται σε μια μέση απόσταση L_e . Επομένως τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από L_e μπορούν σχετικά εύκολα να διαχυθούν μέχρι εκεί. Στη συνέχεια υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου μεταφέρονται στην n-περιοχή. Κατά συνέπεια μόνο τα ηλεκτρόνια των ζευγών ηλεκτρονίων – οπών που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από L_e συμμετέχουν στη δημιουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Από την διαδικασία αυτή το ηλεκτρόνιο που κινείται προς την n-περιοχή υπό την επίδραση του πεδίου, προσθέτει εκεί ένα επιπλέον αρνητικό φορτίο. Αντίστοιχα η οπή που παραμένει στην p-περιοχή προσθέτει ένα θετικό φορτίο σε αυτή την περιοχή. Τα ζεύγη που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από το μήκος διάχυσης L_e από την περιοχή απόγύμνωσης χάνονται λόγω επανασύνδεσης. Αντίστοιχα ισχύουν και για την n-περιοχή, για φωτόνια μικρού μήκους κύματος. Δηλαδή οι οπές που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από το μήκος L_h από την περιοχή απογύμνωσης κινούνται με τον ίδιο τρόπο προς την p-περιοχή. Επομένως μπορούμε συνοπτικά να πούμε ότι η διέγερση ζευγών ηλεκτρονίων - οπών που συνεισφέρει στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο γίνεται μέσα σε μια ζώνη πλάτους L_h+W+L_e . Βραχυκυκλώνουμε τους ακροδέκτες της διάταξης, που φαίνεται στο 1ο σχήμα. Τότε, τα επιπλέον ηλεκτρόνια της n-περιοχής, μέσω του εξωτερικού κυκλώματος θα κινηθούν, για να εξουδετερώσουν τις

επιπλέον οπές στην p- περιοχή. Το ρεύμα που οφείλεται σε αυτήν την ροή διεγερμένων φορέων, ονομάζεται φωτόρευμα.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια ιδανική φωτοβολταΐκή διάταξη ετεροεπαφής p-n. Σε αυτήν είναι συνδεδεμένο ένα φορτίο R. Βραχυκυκλώνοντας το φορτίο, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα το οποίο δημιουργείται από το φως που προσπίπτει (φωτόρευμα I_{ph}). Το ρεύμα αυτό εξαρτάται από το πλήθος των ζευγών ηλεκτρονίων οπών που δημιουργούνται εντός της περιοχής απογύμνωσης. Ακόμα εξαρτάται και από τα μήκη διάχυσης γύρω από αυτήν. Όπως είναι προφανές, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του φωτός τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο ρυθμός φωτοδημιουργίας και κατά συνέπεια και το φωτόρευμα I_{ph} . Η σχέση που συνδέει την ένταση του φωτός I και το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι

$$I_{sc} = -I_{ph} = -K I$$

όπου K είναι μια σταθερά που εξαρτάται από την εκάστοτε διάταξη. Το φωτόρευμα εξαρτάται μόνο από το εσωτερικό πεδίο. Άρα θα έχουμε ροή φωτόρευματος, ακόμα και όταν η τάση στα άκρα της διάταξης είναι μηδενική. Μόνη προϋπόθεση είναι να εξασφαλίζεται η ύπαρξη του εσωτερικού πεδίου E_0 .

Στην περίπτωση που η αντίσταση R δεν βραχυκυκλώνεται, τότε θα εφαρμόζεται στην δίοδο μια θετική τάση V, ως αποτέλεσμα του ρεύματος που την διαρέει. Η τάση αυτή μειώνει το εσωτερικό δυναμικό της επαφής p-n προκαλώντας την εγχυση φορέων μειονότητας και την διάχυση τους, όπως ακριβώς θα συνέβαινε και σε μια κανονική δίοδο. Έτσι εκτός από το I_{ph} στο κύκλωμα πλέον υπάρχει και το ορθό ρεύμα της διόδου I_d . Το ρεύμα αυτό οφείλεται στην κανονική λειτουργία της επαφής p-n και δίνεται από την χαρακτηριστική της επαφής.

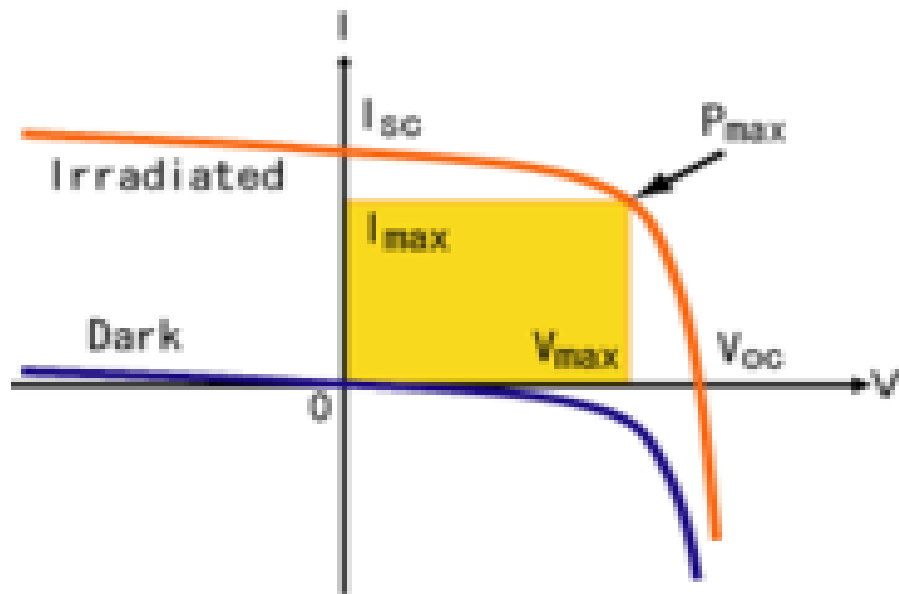
$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

I_o το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού και η ο συντελεστής ποιότητας που κυμαίνεται από 1 μέχρι 2.

Επομένως το συνολικό ρεύμα που διαρρέει την ηλιακή κύψέλη είναι

$$I = -I_{ph} + I_d = -I_{ph} + I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

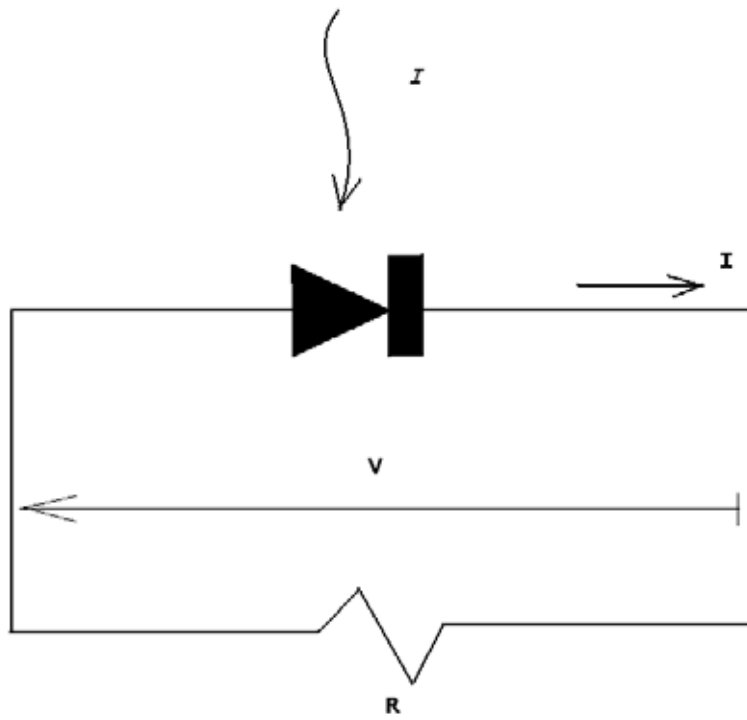
Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται δυο χαρακτηριστικές καμπύλες. Όπως βλέπουμε οι διάφορες χαρακτηριστικές προκύπτουν από την μετακίνηση της καμπύλης που αντιστοιχεί στο σκοτάδι. Η μετακίνηση αυτή οφείλεται στο φωτόρρευμα και το οποίο εξαρτάται με τη σειρά του από την ένταση του φωτός. Παρατηρώντας το διάγραμμα, βλέπουμε ότι η τάση ανοιχτοκυκλώματος V_{oc} αντιστοιχεί στο σημείο όπου η καμπύλη I-V τέμνει τον άξονα V ($I=0$). Αν και γενικά η τάση αυτή εξαρτάται και από την ένταση του φωτός, συνήθως η τιμή της βρίσκεται μεταξύ 0,4 και 0,6 V.



11. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης διόδου

Όταν η ηλιακή κυψέλη συνδεθεί με φορτίο, τότε το φορτίο έχει την ίδια τάση με την κυψέλη και διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα.

Όμως όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα, το ρεύμα I που διαρρέει το φορτίο (εδώ συμβολίζεται με μια αντίσταση R) ρέει πλέον προς την αντίθετη φορά σε σχέση με την σύμβαση ότι το ρεύμα ρέει από σημεία υψηλού σε σημεία χαμηλότερου δυναμικού



12. Δίοδος υπό ακτινοβολία σε κύκλωμα

Επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά της ηλιακής κυψέλης

Όπως έχει γίνει κατανοητό, οι ηλιακές κυψέλες αποδίδουν ως ηλεκτρική ενέργεια μόνο ένα μικρό μέρος της απορροφούμενης ενέργειας. Το υπόλοιπο εμφανίζεται ως θερμότητα. Για αυτό το λόγο η κυψέλη έχει αρκετά υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα για ηλιακή ακτινοβολία της τάξης του 1kW/m^2 η θερμοκρασιακή διαφορά της ηλιακής κυψέλης με το περιβάλλον είναι γύρω στους $10\text{ }^\circ\text{C}$. Αυτή η θέρμανση της κυψέλης, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ενεργειακού διακένου E_g . Το ρεύμα των απορροφούμενων φωτονίων αυξάνεται, με αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση στο ρεύμα βραχυκυκλώματος. Ακόμα λόγω της θερμότητας αυτής έχουμε αρνητική επίδραση στη τάση ανοιχτοκυκλώματος.

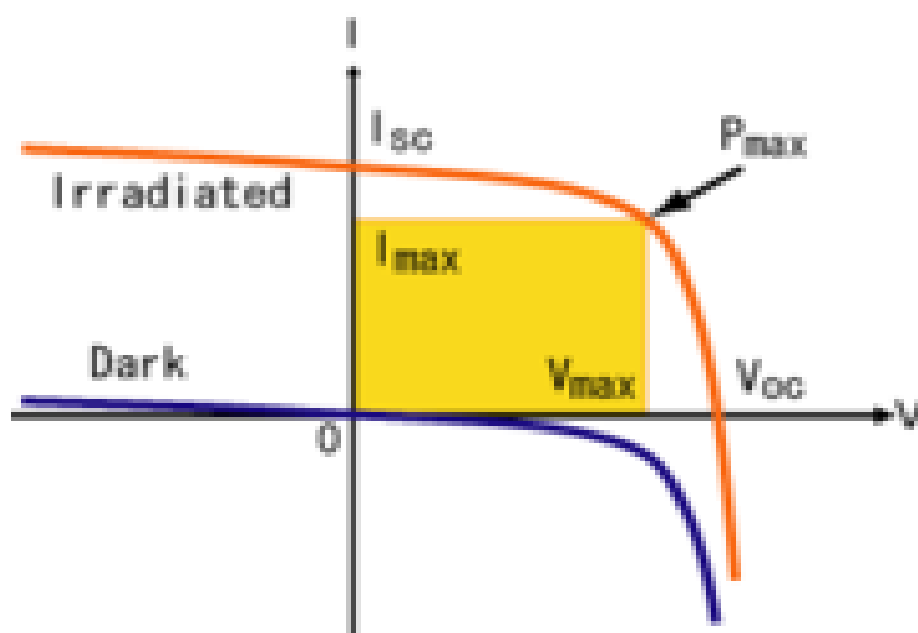
Συντελεστής Πλήρωσης (Fill Factor-FF)

Τέλος κλείνοντας αυτή την σύντομη αναφορά στην αρχή λειτουργίας των ηλιακών κυψελών αξίζει να αναφερθούμε σε ένα μέγεθος που αποτελεί ουσιαστικά την εικόνα της απόδοσης της ηλιακής κυψέλης. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor - FF) και ορίζεται ως:

$$FF = (I_m V_m) / (I_{sc} V_{oc})$$

Τα I_m και V_m μπορούν να υπολογιστούν είτε λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων της χαρακτηριστικής της ηλιακής κυψέλης και της χαρακτηριστικής του φορτίου, είτε γραφικά φέρνοντας τις κάθετες από το σημείο λειτουργίας του κυκλώματος προς τους δυο άξονες I και V . Το I_{sc}

είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και είναι το μέγιστο δυνατό ρεύμα του κυκλώματος. Η V_{oc} είναι η τάση ανοιχτοκυκλώματος και είναι η μέγιστη δυνατή τάση του κυκλώματος. Ο υπολογισμός αυτών γίνεται από τα σημεία τομής της χαρακτηριστικής της ηλιακής κυψέλης με τους αντίστοιχους άξονες.



13. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης διόδου

Ο FF είναι μια ένδειξη το πόσο κοντά είναι η χαρακτηριστική της ηλιακής κυψέλης στο ιδεατό σχήμα που είναι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Όσο πιο κοντά είναι η χαρακτηριστική σε αυτό το σχήμα τόσο πιο πολύ είναι ο FF κοντά στο 1. Όμως οι εκθετικές ιδιότητες της επαφής p-n καθιστούν κάτι τέτοιο αδύνατο. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι συνήθεις τιμές για τον FF είναι μεταξύ 70-85% και εξαρτάται από το υλικό της διάταξης και την δομή.

Δομή Πολλαπλών Ετεροεπαφών

Οι πολλαπλές ετεροεπαφές (multijunction) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στις ηλιακές κυψέλες για μεγαλύτερη απόδοση. Οι κυψέλες αυτές αποτελούνται από πολλαπλά επίπεδα κυψελών. Παρασκευάζονται από επιταξιακή επίστρωση ή μεταλλουργική ένωση. Κάθε τύπος ημιαγωγού έχει ένα συγκεκριμένο ενεργειακό διάκενο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να απορροφά αποτελεσματικά ένα μέρος μόνο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι ημιαγωγοί επιλέγονται έτσι ώστε να απορροφούν σχεδόν όλο το ηλιακό φάσμα. Σκοπός επομένως είναι να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι σε δομές πολλαπλών ετεροεπαφών χρησιμοποιούνται διαφορετικά επίπεδα, ώστε να απορροφούν όσο το δυνατό μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού φωτός που διέρχεται από τον ημιαγωγό και να το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε μια απλή ηλιακή κυψέλη ο βαθμός απόδοσης είναι σαφώς αρκετά περιορισμένος. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ημιαγωγός δεν έχει την δυνατότητα να απορροφήσει ολόκληρο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω σ'αυτόν. Δηλαδή τα φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού χάνονται. Είτε διέρχονται μέσα από τον ημιαγωγό χωρίς να αλληλεπιδράσουν με αυτόν, είτε πρόσκρουουν στο κρυσταλλικό πλέγμα μετατρέποντας μέρος της ενέργειας τους σε θερμότητα. Σε κάθε περίπτωση δεν συμμετέχουν στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Και αυτό συμβαίνει, γιατί δεν έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να διεγείρουν ηλεκτρόνια από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Ακόμα σε φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από την τιμή του ενεργειακού διακένου η επιπλέον ενέργεια χάνεται. Αφού απορροφάται το μέρος της ενέργειας που απαιτείται να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας

ένα ζεύγος ηλεκτρονίου οπής, το επιπλέον ποσό ενέργειας του φωτονίου μετατρέπεται σε θερμότητα.

Χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα με διαφορετικά ενεργειακά διάκενα απορροφάται μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού φάσματος. Αυτό προφανώς αυξάνει κατά πολύ τον βαθμό απόδοσης.

Σε ηλιακές κυψέλες με δομή πολλαπλών ετεροεπαφών χρησιμοποιείται η επιταξιακή επίστρωση σε υμένια. Χρησιμοποιούνται διάφορα κράματα από ημιαγώγιμα υλικά των III-V ομάδων του περιοδικού πίνακα. Με τον τρόπο αυτό το ενεργειακό διάκενο του κάθε επιπέδου μπορεί να ρυθμιστεί. Έτσι απορροφά ένα συγκεκριμένο μέρος της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η βελτιστοποίηση των ενεργειακών διακένων των διαφόρων επιπέδων εξαρτάται κάθε φορά από τις σταθερές πλέγματος του κάθε υλικού. Οι σταθερές αυτές πρέπει να ταιριάζουν μεταξύ τους. Τα διάφορα επίπεδα βρίσκονται τοποθετημένα σε σειρά. Το μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο βρίσκεται στη κορυφή. Η πρώτη επαφή δέχεται όλο το φάσμα της ακτινοβολίας και απορροφά τα φωτόνια με την κατάλληλη ενέργεια. Τα φωτόνια με χαμηλότερη ενέργεια διέρχονται και απορροφώνται από τα επόμενα επίπεδα. Από ηλεκτρικής άποψης τα διάφορα επίπεδα είναι συνδεδεμένα σε σειρά (tandem cells). Στην ουσία συνθέτουν μια κυψέλη με δυο ακροδέκτες. Ένας περιορισμός που προκύπτει είναι ότι εξαιτίας της αντίστασης σε σειρά το ρεύμα που περνά μέσα από κάθε αντίσταση είναι το ίδιο. Αν το σημείο μέγιστου ρεύματος κάθε επαφής δεν είναι το ίδιο, τότε δημιουργούνται προβλήματα στο βαθμό απόδοσης. Έτσι το ταίριαγμα των σημείων λειτουργίας για τα ρεύματα κάθε ένωσης είναι πολύ σημαντικό στο σχεδιασμό αυτού του είδους ηλιακών κυψελών.

Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων (thin film solar cells-TFSC)

[2,3,5,6] Στη συνέχεια εξετάζουμε μια ειδική κατηγορία ηλιακών κυψελών τις λεγόμενες ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων. Αποτελούν την τελευταία εξέλιξη στο χώρο των φωτοβολταϊκών κυψελών και σημαντική ελπίδα για την ευρεία εξάπλωση τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό και οι μετρήσεις έγιναν και αυτές σε ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων. Η νέα αυτή τεχνολογία έρχεται να αντικαταστήσει την συμβατική καθώς είναι πιο αποτελεσματική και με χαμηλότερο κόστος. Γενικά η κατασκευή τους γίνεται με εναπόθεση ενός ημιαγωγού που απορροφά το φως πάνω σε υπόστρωμα. Αυτό μπορεί να είναι επενδεδυμένο γυαλί, μεταλλικό ή πλαστικό. Τα ημιαγωγά υλικά δεν χρειάζεται να έχουν μεγάλο πάχος επειδή απορροφούν το φως πολύ αποτελεσματικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι ηλιακές κυψέλες που δημιουργούνται να είναι πολύ λεπτές, ελαφρές, ανθεκτικές. Κατά συνέπεια είναι πιο εύκολες στην χρήση τους.

Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η ίδια όπως και στις συμβατικές ηλιακές κυψέλες, δηλαδή αποτελούνται από στοιχεία γνωστά ως ημιαγωγούς. Οι ημιαγωγοί είναι μονωτές στην καθαρή τους μορφή. Άγουν όμως τον ηλεκτρισμό, όταν θερμαίνονται ή όταν συνδυάζονται με άλλα υλικά. Για παράδειγμα, όταν ένας ημιαγωγός αναμειχθεί με φώσφορο δημιουργείται μια περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων. Έτσι έχουμε έναν ημιαγωγό τύπου n. Αντίθετα, όταν ένας ημιαγωγός αναμειχθεί με κάποιες άλλες ουσίες, όπως το βόριο, δημιουργείται περίσσεια οπών και έχουμε έναν ημιαγωγό τύπου p.

Μια ηλιακή κυψέλη αποτελείται από υλικά τύπου n και τύπου p χωρισμένα μεταξύ τους από ένα επίπεδο (επαφή-junction). Έτσι ακόμα και στην

απουσία φωτός ένας αριθμός ηλεκτρονίων κινείται κατά μήκος της επαφής από την περιοχή τύπου n στην περιοχή τύπου p. Δημιουργείται έτσι μια μικρή τάση. Με την παρουσία του φωτός, τα φωτόνια διεγείρουν έναν μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια κινούνται κατά μήκος της ένωσης. Δημιουργούν με αυτό τον τρόπο ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών.

Υπάρχουν τρία κυρίως είδη ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων, ανάλογα με τον ημιαγωγό που χρησιμοποιείται: άμορφου πυρίτιου (a-Si), κάδμιου-τελλουρίου (CdTe) και χαλκοπυριτικού απορροφητή –CuInS₂ (copper indium (gallium) deselenide – CIS / CIGS). Το άμορφο πυρίτιο (a-Si) είναι μια μορφή του κλασσικού δίσκου πυρίτιου και γι'αυτό το λόγο χρησιμοποιείται πολύ συχνά στα ηλεκτρονικά για ηλιακή ενέργεια. Παρόλα αυτά έχει κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Ένα από τα σημαντικά προβλήματα που παρουσιάζουν είναι ο μικρός βαθμός απόδοσης, ιδιαίτερα όταν είναι εκτεθειμένα στο ηλιακό φως. Ο μηχανισμός μείωσης του βαθμού απόδοσης ερμηνεύεται με τη βάση το φαινόμενο Staebler-Wronski. Για μεγαλύτερη σταθερότητα απαιτείται η χρήση πιο λεπτών επιπέδων. Έτσι μειώνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του υλικού. Ωστόσο κάτι τέτοιο μειώνει την απορρόφηση του φωτός. Κατά συνέπεια μειώνεται και ο βαθμός απόδοσης της ηλιακής κυψέλης. Ακόμα θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το a-Si είναι μια μορφή πυρίτιου χωρίς κρυσταλλική δομή, που όμως βρίσκεται σε πολύ μικρές ποσότητες.

Για τους λόγους αυτούς οι κυψέλες άμορφου πυρίτιου είναι κατάλληλες για εφαρμογές μικρότερης κλίμακας όπως σε συσκευές, υπολογιστές τσέπης. Δεν είναι όμως ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας όπως στην ηλεκτροδότηση κτιρίων, κατοικιών κ.α.

Όπως είναι γνωστό το πυρίτιο (Si) παρουσιάζει πάρα πολλά πλεονεκτήματα στη χρησιμοποίηση του στην κατασκευή ηλιακών κυψελών, σε σχέση με άλλα υλικά. Επομένως άλλα υλικά μπορούν να είναι ανταγωνιστικά στο Si, όταν να συμπεριφέρονται καλύτερα εκεί που το Si δεν συμπεριφέρεται όπως θα θέλαμε. Δηλαδή στην χαμηλή απορροφητικότητα του φωτός. Έτσι στα ανταγωνιστικά αυτά υλικά οι μεταπτώσεις από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας πρέπει να είναι άμεσες. Ακόμα πρέπει ο συντελεστής απορρόφησης να έχει μεγάλη τιμή. Για την απορρόφηση του μέρους του ηλιακού φάσματος που συνήθως μας ενδιαφέρει σε αυτές τις εφαρμογές στα λεπτά υμένια, επαρκεί πάχος μόνο λίγων μm. Για τον ίδιο αριθμό κέντρων επανασύνδεσης, όπως σε μια κλασική κυψέλη πυριτίου μεγάλου πάχους, μπορεί να γίνει ανεκτή μια υψηλότερη συγκέντρωση προσμίξεων καθώς και η παρουσία ορίων κόκκων. Ακόμα λόγω των μικρότερων διαστάσεων τα μήκη διάχυσης μπορούν να είναι μικρότερα. Αυτό επιτρέπει την χρησιμοποίηση υλικών με χαμηλότερη κινητικότητα. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα οδηγούν στη χρησιμοποίηση και άλλων υλικών στην κατασκευή ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων. Εξαιτίας της μεγάλης εγγύτητας της επιφάνειας με την περιοχή επανασύνδεσης, απαιτείται η χρησιμοποίηση στο επίπεδο αυτό κατάλληλου υλικού τουλάχιστον στην μπροστινή επαφή. Το υλικό αυτό πρέπει να έχει μεγάλο ενεργειακό διάκενο, αφού στην περιοχή αυτή δημιουργούνται ζεύγη οπών – ηλεκτρονίων. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η επανασύνδεση τους. Το επίπεδο αυτό ονομάζεται επίπεδο-παράθυρο (window layer). Επιτρέπει στα φωτόνια να περνάν ανεμπόδιστα. Παράλληλα όμως αποτρέπει την επανασύνδεση οπών ηλεκτρονίων στην μπροστινή επαφή.

[14] Έτσι ενώ οι κλασικές ηλιακές κυψέλες χρησιμοποιούν πυρίτιο στις περιοχές αγωγιμότητας τύπου n και τύπου p, οι νέες τεχνολογίες στις κυψέλες λεπτών υμενίων χρησιμοποιούν περιοχές αποτελούμενες είτε από κάδμιο τελλούριο (CdTe) είτε από τριμερή χαλκού – ινδίου– σεληνίου/θείου

(copper indium deselenide – CIS) είτε τέλος από τετραμερή χαλκού – ινδίου – γαλλίου – σεληνίου/θείου (copper indium gallium deselenide – CIGS).

Γενικά στις κυψέλες τεχνολογίας CIGS-CIS βασικό συστατικό είναι ο χαλκοπυριτικός απορροφητής. Τα υπόλοιπα μέρη επιλέγονται συνήθως από κατιόντα της 3η ομάδα του περιοδικού πίνακα δηλαδή In, Ga και Al και ανιόντα των Se και S. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί ένα μεγάλο εύρος ενεργειακών διακενων (E_g) πραγματοποιώντας διαφορετικούς συνδυασμούς μεταξύ των στοιχείων αυτών. Τα ενεργειακά διάκενα που συνήθως επιτυγχάνονται για το σκοπό αυτό κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 1 και 1,7 eV. Στην περίπτωση του CdTe το ενεργειακό διάκενο βρίσκεται συνήθως γύρω στο 1,5 eV, το οποίο ανταποκρίνεται πολύ καλά στο ηλιακό φάσμα. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε διάφορα στοιχεία όπως τον βαθμό απόδοσης για κυψέλες λεπτών υμενίων διαφόρων συνθέσεων,.

14.	Area (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Efficiency (%)	Comments
CIGSe	0.410	0.697	35.1	79.52	19.5	CIGSe/CdS/Cell NREL, 3-stage process
CIGSe	0.402	0.670	35.1	78.78	18.5	CIGSe/ ZnS (O,OH) NREL, Nakada et al.
CIGS	0.409	0.830	20.9	69.13	12.0	Cu(In,Ga) S₂ /CdS Dhere, FSEC
CIAS	—	0.621	36.0	75.50	16.9	Cu(In, Al)Se ₂ /CdS IEC, E _g = 1.15 eV
CdTe	1.03	0.845	25.9	75.51	16.5	CTO/ZTO/CdS/CdTe NREL, CSS
CdTe	—	0.840	24.4	65.00	13.3	SnO ₂ /Ga ₂ O ₃ /CdS/CdTe IEC, VTD
CdTe	0.16	0.814	23.56	73.25	14.0	ZnO/CdS/CdTe/Metal U. of Toledo, sputtered

Ηλεκτρικά μεγέθη ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων

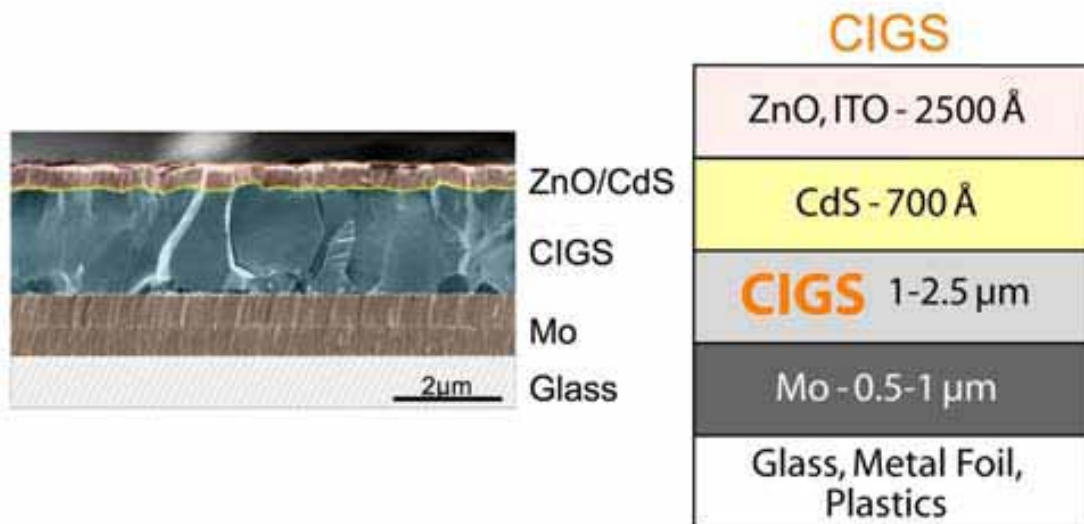
Στην συνέχεια βλέπουμε ένα πίνακα όπου παρουσιάζονται διάφοροι βαθμοί απόδοσης και άλλα στοιχεία για ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων από διάφορες εταιρίες. Όπως μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε, τα αποτελέσματα αυτών των τεχνολογιών προσεγγίζουν πλέον αυτά της συμβατικής τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

	Device	Aperture	Efficiency	Power	Date
--	--------	----------	------------	-------	------

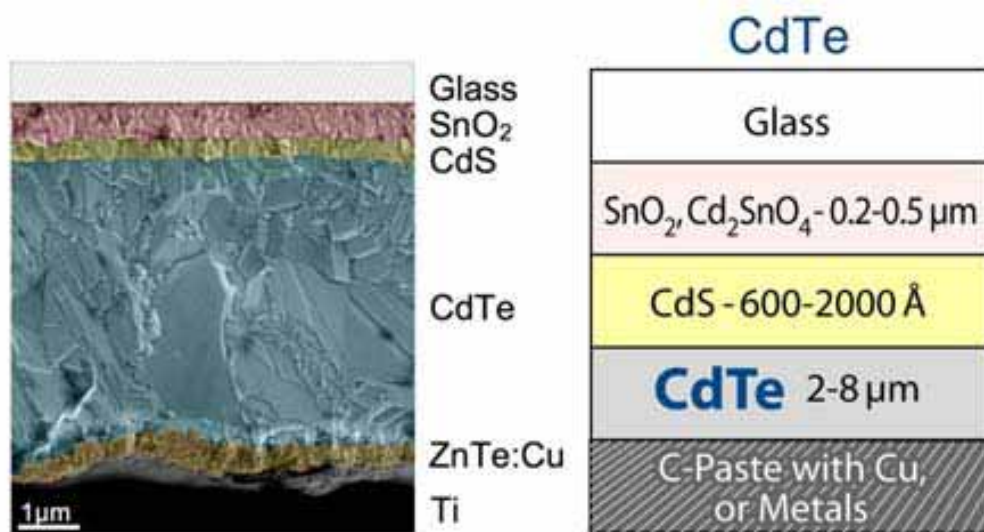
Company		Area (cm ²)	(%)	(W)	
Global Solar	CIGS	8390	10.2*	88.9*	05/05
Shell Solar	CIGSS	7376	11.7*	86.1*	10/05
Würth Solar	CIGS	6500	13.0	84.6	06/04
First Solar	CdTe	6623	10.2*	67.5*	02/04
Shell Solar GmbH	CIGSS	4938	13.1	64.8	05/03
Antec Solar	CdTe	6633	7.3	52.3	06/04
Shell Solar	CIGSS	3626	12.8*	46.5*	03/03
Showa Shell	CIGS	3600	12.8	44.15	05/03

15. Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων διάφορων εταιριών με ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δυο είδη κυψελών λεπτών υμενίων χωρίς πυρίτιο. Στην περίπτωση των κυψελών CIGS υπάρχουν δυο βασικές διαμορφώσεις. Οι κυψέλες που βρίσκονται τοποθετημένα σε γυαλί απαιτούν ένα επίπεδο από μολυβδένιο που παίζει το ρόλο του ηλεκτροδίου. Αυτό το επίπεδο δεν χρειάζεται στην περίπτωση της CIGS κυψέλης που τοποθετείται πάνω σε έλασμα. Το έλασμα από μόνο του παίζει το ρόλο του ηλεκτροδίου. Ένα επίπεδο κατασκευασμένο από οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) έχει το ρόλο του άλλου ηλεκτροδίου. Ανάμεσα σε αυτά τα επίπεδα βρίσκονται τοποθετημένα δυο ακόμα επίπεδα. Ένα από το υλικό του ημιαγωγού και ένα από καδμίου - θείο (CdS) τα οποία αποτελούν τα επίπεδα n και p της ηλιακής κυψέλης.



16. Μικροδομή τεχνολογίας CIGS



17. Μικροδομή τεχνολογίας CdTe

Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, οι κυψέλες CIGS και CdTe παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά καθώς και παρόμοια δομή. Για το λόγο αυτό θα αναμένονταν το κόστος ανά μονάδα επιφανείας να είναι περίπου ίδιο. Ο καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει το κόστος / watt είναι ο βαθμός απόδοσης. Παρόλα αυτά στην πράξη οι κατεργασίες παραγωγής διαφέρουν σημαντικά για τα δυο είδη κυψελών. Προς το παρόν

το κόστος παραγωγής μιας κυψέλης CdTe είναι μικρότερο από το αντίστοιχο για κυψέλη CIGS. Στο μέλλον όμως αυτό αναμένεται να καθοριστεί κατά κύριο λόγο από το κόστος των ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται.

Μειονέκτημα για τα υλικά αυτά αποτελεί το γεγονός ότι, με εξαίρεση το a-Si, δεν δέχονται ίσες νοθεύσεις στην p και στην n περιοχή. Για το λόγο αυτό απαιτείται δομή ετεροεπαφής (hetero-junction).

Ο θεωρητικός μέγιστος βαθμός απόδοσης των κλασικών ηλιακών κυψελών είναι περίπου 50%. Το μισό δηλαδή της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην κυψέλη μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην πραγματικότητα όμως ο βαθμός απόδοσης περιορίζεται στο 15-20% εξαιτίας διάφορων περιορισμών που εξετάσαμε πιο πάνω. Πλέον οι ηλιακές κυψελών έχουν γίνει αρκετά ανταγωνιστικές. Ο βαθμός απόδοσης για μια κυψέλη CdTe έχει ξεπεράσει το 15%. Για μια κυψέλη CIGS βρίσκεται γύρω στο 20%.

Παρ'όλα αυτά ανησυχία δημιουργεί η χρήση κάδμιου στην κατασκευή ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων. Το κάδμιο είναι μια ουσία υψηλά τοξική, η οποία μάλιστα συσσωρεύεται στην τροφική αλυσίδα. Για το λόγο αυτό οι ερευνητές και οι κατασκευαστές αυτών των διατάξεων στρέφονται στη δημιουργία ηλιακών κυψελών χωρίς την χρήση καδμίου. Μάλιστα οι τεχνολογίες αυτές είναι πλέον τόσο αποτελεσματικές όσο και οι κλασικές που απαιτούσαν την χρήση καδμίου. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε τις μεθόδους κατασκευή των ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων.

[6,7]Μέχρι πρόσφατα το υψηλό κόστος αποτελούσε το μεγάλο εμπόδιο στην ευρείασιμοποίηση της ηλιακής τεχνολογίας. Η κατασκευή των συμβατικών ηλιακών κυψελών απαιτούσε σύνθετες και χρονοβόρες μεθόδους κατασκευής, με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος. Σήμερα όμως με

την κατασκευή μη πυριτιούχων ηλιακών κυψελών το εμπόδιο αυτό ξεπεράστηκε. Πλέον οι κατεργασίες που απαιτούνται είναι πολύ πιο απλές, λιγότερο χρονοβόρες και πιο οικονομικές.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται μια διαδεδομένη μέθοδος κατασκευής ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων πάνω σε έλασμα. Είναι ενδεικτική του πόσο εύκολη και σύντομη χρονικά είναι πλέον μια τέτοια κατασκευή.

Κύλινδροι αποτελούμενοι από έλασμα αλουμινίου περιστρέφονται ανάμεσα σε μεγάλες πρέσες, παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση των εφημερίδων. Οι κύλινδροι αυτοί μπορεί να φτάνουν σε πλάτος μέχρι και λίγα μέτρα και σε μήκος εκατοντάδες μέτρα. Αυτό κάνει το τελικό προϊόν πιο εύκολο να προσαρμοστεί στην κάθε διαφορετική εφαρμογή.

Ένας εκτυπωτής, ο οποίος λειτουργεί σε συνθήκες ατμοσφαιρικού αέρα, εναποθέτει ένα λεπτό επίπεδο υλικού του ημιαγωγού πάνω στο υπόστρωμα του αλουμινίου. Θα πρέπει να σημειωθεί μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής CIGS πάνω σε γυαλί και CdTe κυψελών. Απαιτούνταν η εναπόθεση του ημιαγωγικού υλικού να γίνεται σε συνθήκες κενού. Τώρα που η εναπόθεση γίνεται σε συνθήκες ατμοσφαιρικού αέρα και η όλη κατεργασία, είναι πολύ πιο σύντομη χρονικά και με πολύ χαμηλότερο κόστος.



18. Παραγωγή-εκτύπωση

λεπτού υμενίου (film)

Στην συνέχεια με την βοήθεια άλλης πρέσσας εναποτίθενται οι στρώσεις CdS και ZnO. Η στρώση του ZnO δεν αντανακλά το φως. Εξασφαλίζεται έτσι ότι η ηλιακή ακτινοβολία θα φτάσει μέχρι και το επίπεδο του ημιαγωγού. Τελικά το έλασμα κόβεται στο τελικό του μέγεθος ανάλογα με το μέγεθος της τελικής κατασκευής που θέλουμε να έχουμε.

Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι πολύ απλός στη εγκατάσταση, χρήση και στη συντήρηση του. Επιπλέον σπαταλάται πολύ μικρή ποσότητα υλικού. Αυτό που συμβάλλει στην συνολική αποτελεσματικότητα της κατεργασίας, και κατ'έπекταση στην μείωση του κόστους. Στη συνέχεια εξετάζεται αναλυτικά κάθε κατηγορία ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων.

Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων άμορφου πυριτίου (a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο διαφέρει από το κρυσταλλικό πυρίτιο στο γεγονός ότι τα άτομα δεν βρίσκονται τοποθετημένα σε πολύ συγκεκριμένες αποστάσεις το ένα με το άλλο. Ακόμα οι γωνίες που σχηματίζουν οι δεσμοί δεν έχουν μια μοναδική τιμή. Οι διατομικές αποστάσεις και οι γωνίες των δεσμών παίρνουν οποιαδήποτε τιμή μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών. Επομένως οι ατομικές ιδιότητες του χαρακτηρίζονται από μια στοχαστικότητα, η οποία και επηρεάζει δραστικά τις ηλεκτρονικές ιδιότητες του υλικού. Το ενεργειακό του διάκενο έχει την τιμή 1.75eV. Η δομή των ζωνών του δείχνει μια πολύ υψηλή πυκνότητα καταστάσεων σε αυτό, που προκαλείται σε μεγάλο βαθμό από μη συμπληρωμένους δεσμούς. Το 1969 βρέθηκε ότι η διείσδυση υδρογόνου σε άμορφο πυρίτιο, μπορεί να αδρανοποιήσει τους ελεύθερους δεσμούς και να μειώσει την πυκνότητα των καταστάσεων στο ενεργειακό διάκενο σε μεγάλη έκταση. Έτσι το υλικό μπορεί να μετατραπεί σε n ή p τύπου, με την προσθήκη φωσφόρου ή βορίου. Έτσι από τη στιγμή που έγινε εφικτό να δημιουργηθούν p-n επαφές

από a-Si(H), ο υψηλός συντελεστής απορροφητικότητας του και η ευκολία κατασκευής του, έγινε η αιτία για να μετατραπεί σε ένα πολύ ελκυστικό υλικό για τη χρησιμοποίησή του σε ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων. Και τα p και τα n υλικά έχουν χαμηλές ικανότητες μεταφοράς ηλεκτρονίων και οπών. Για το λόγο αυτό οι απλές p-n επαφές έχουν χαμηλή αποτελεσματικότητα. Έτσι αυτό παρεμβάλλεται ένα εσωτερικό ουδέτερο επίπεδο και δημιουργείται μια p-i-n ένωση με πολύ βελτιωμένες ιδιότητες. Το i επίπεδο δεν είναι στην πραγματικότητα ακριβώς ουδέτερο. Έχει μια ελαφρά n νόθευση. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερο το φως να μπαίνει στην ηλιακή κυψέλη από ένα πολύ λεπτό επίπεδο αγωγιμότητας p. Έτσι το σημείο όπου γίνεται η μέγιστη φωτο-δημιουργία οπών και ηλεκτρονίων συμπίπτει με το σημείο όπου το ηλεκτρικό πεδίο παρουσιάζει την μέγιστη τιμή του. Δηλαδή στην ισχυρά νοθευμένη p περιοχή και στην ελαφρά n νοθευμένη περιοχή δηλαδή την i. Έτσι η βέλτιστη δομή ενός a-Si(H) είναι η ένωση p-i-n, η οποία έχει μια διάφανη αγώγιμη επαφή στο p επίπεδο και μια ωμική επαφή στο n επίπεδο. Δυστυχώς προς το παρόν δεν έχει βρεθεί κάποιο διάφανο υλικό p τύπου με αρκετά υψηλή αγωγιμότητα. Το διαφανές αγώγιμο υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το οξειδίο του κασσιτέρου που είναι n τύπου. Ωστόσο το υψηλά νοθευμένο TCO (διαφανές αγώγιμο οξειδίο) σχηματίζει μια ένωση τούνελ (tunnel junction) με το p επίπεδο. Αποτέλεσμα είναι η αντίσταση στη ροή του ρεύματος να είναι πολύ μικρή.

Έχοντας προσδιορίσει τη βέλτιστη δομή, εξετάζουμε στη συνέχεια την ακολουθία της κατασκευαστικής διαδικασίας. Αυτή ξεκινά με ένα χαμηλού κόστους διαφανές αδιάβροχο υπόστρωμα όπως το γυαλί. Πάνω σε αυτό εναποτίθεται ένα υψηλής αγωγιμότητας και οπτικά διάφανο επίπεδο από οξειδίο του κασσιτέρου. Πάνω σε αυτό τοποθετείται ένα αρκετά λεπτό, έντονα νοθευμένο p – επίπεδο a-Si. Στη συνέχεια το μη νοθευμένο αλλά ελαφρώς n-τύπου εσωτερικό επίπεδο a-Si. Τέλος εναποτίθεται ένα λεπτό

επίπεδο αγώγιμο n-επίπεδο a-Si και ένα επίπεδο μεταλλικής επαφής. Αυτό το επίπεδο – επαφή θα πρέπει να σχηματίζει μια ωμική επαφή με το n επίπεδο του a-Si. Στην ιδανική περίπτωση θα πρέπει να αντανακλά έντονα το φως ώστε το φως που δεν έχει απορροφηθεί στο πέρασμα του μέσα από την κυψέλη να αντανακλάται πίσω για ένα δεύτερο πέρασμα από το επίπεδο i. Το κατάλληλο υλικό για αυτό το επίπεδο θα ήταν το ασήμι. Εξαιτίας όμως του πολύ υψηλού κόστους του χρησιμοποιείται συνήθως αλουμίνιο, ή κράμα αλουμινίου.

Καθώς η ποιότητα των a-Si διατάξεων βελτιώνονταν μέχρι την δεκαετία του 1970 έγινε φανερό ότι η απορρόφηση του φωτός από το i επίπεδο δημιουργούσε πρόσθετα ελαττώματα μειώνοντας την αποδοτικότητα των ηλιακών κυψελών. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φαινόμενο Staebler-Wronski. Εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των φωτονίων που απορροφώνται. Κατά συνέπεια η απόδοση της κυψέλης εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας στην οποία εκτίθεται, την διάρκεια της έκθεσης και το πάχος του επιπέδου i. Για παράδειγμα η έκθεση σε φωτισμό δωματίου έχει πολύ μικρή επίδραση στην απόδοση της κυψέλης. Για το λόγο αυτό το a-Si είναι κατάλληλο για χρησιμοποίηση σε συσκευές όπως υπολογιστές τσέπης. Όμως σε έκθεση σε έντονη ακτινοβολία όπως για παράδειγμα η ηλιακή, μειώνει την απόδοση σημαντικά ειδικά σε διάστημα λίγων μηνών. Αυτή η αστάθεια του a-Si έχει πολύ σημαντικές επιπτώσεις στην εμπορική βιωσιμότητα του σαν παραγωγός ισχύος καθιστώντας τις απλές ενώσεις a-Si ακατάλληλες για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Το φαινόμενο Staebler-Wronski εξαρτάται από το πάχος του i επιπέδου. Μπορεί επομένως να μετριασθεί χρησιμοποιώντας πολλαπλές δομές ετεροεπαφών. Έτσι η απορρόφηση του φωτός χωρίζεται εξίσου σε δυο ή και τρία ξεχωριστά i επίπεδα. Η πιο απλή δομή αυτού του είδους είναι η p-i-n/p-i-n από a-Si(H). Το συνολικό πάχος της ηλιακής κυψέλης παραμένει στα 1000 nm περίπου με το εμπρός i επίπεδο στα 300 nm και το πίσω i επίπεδο

στα 700 nm, ώστε να παράγονται ίσα ρεύματα από κάθε μισό. Ηλιακές κυψέλες με αυτή την δομή έχουν παραχθεί σε εμπορική κλίμακα. Αποδεικνύονται πολύ πιο σταθερά από τις αντίστοιχες απλές ενώσεις. Οι κατασκευαστές αυτών των διατάξεων ισχυρίζονται ότι η σταθερότητα που επιδεικνύουν επιτρέπει να στις κατασκευές αυτές να έχουν και στο μέλλον μια εμπορική βιωσιμότητα σαν γεννήτριες ισχύος.

Η βασική τεχνική δυσκολία στο σχηματισμό αυτών των διατάξεων είναι ο σχηματισμός της ένωσης τούνελ (tunnel junction) μεταξύ του n επιπέδου της πιο πάνω κυψέλης και του p επιπέδου της κατώτερης κυψέλης. Ικανοποιητικά αποτελέσματα έχουμε σε κυψέλες μικρής επιφάνειας που παρασκευάζονται σε εργαστήρια. Η μεγάλη πρόκληση είναι η επίτευξη παρόμοιων αποτελεσμάτων σε εμπορική παραγωγή και σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας..

Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων Κάδμιου-Τελλούριου (Cadmium-telluride – CdTe)

Ήδη από την δεκαετία του 1950 το CdTe ήταν γνωστό ότι παρουσιάζει ιδανικό ενεργειακό διάκενο για υλικό απορρόφησης σε ηλιακές κυψέλες. Όμως οι έρευνες σε αυτό το υλικό αρχικά ήταν πολύ περιορισμένες. Αυτό συνέβαινε εξαιτίας του πολύ χαμηλού επιπέδου χρησιμοποίησης σε τεχνολογικές εφαρμογές των υλικών των II/VI ομάδων του περιοδικού πίνακα. Καθώς η έρευνα στα II/VI υλικά γίνονταν σε όλο και μεγαλύτερο βαθμό, έγινε κατανοητό ότι το κάδμιο-τελλούριο έχει ένα πολύ σοβαρό περιορισμό στην απόδοση. Το μειονέκτημα ήταν η ύπαρξη ατελειών στο μέσο του ενεργειακού διακένου. Οι ατέλειες είχαν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πολύ αποτελεσματικών θέσεων επανασύνδεσης. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 αναπτύχθηκε μια διαδικασία με την οποία μειώνονταν

κατά πολύ η πυκνότητα αυτών των θέσεων επανασύνδεσης. Έτσι την δεκαετία του 1980 όλες αυτές οι θεωρητικές γνώσεις βρήκαν πεδίο εφαρμογής στις ηλιακές κυψέλες.

Υπάρχει ένας σχετικά μεγάλος αριθμός τεχνικών χαμηλού κόστους για την εναπόθεση CdTe. Όλες αυτές και με την βοήθεια των άλλων διαδικασιών που αναφέρθηκαν πιο πάνω μπορούν να δώσουν υψηλής ποιότητας υλικά και πολύ αποτελεσματικές ηλιακές κυψέλες.

Μια πολύ συνηθισμένη τεχνική για την παραγωγή CdTe συσκευών είναι η εκτύπωση όλων των λεπτών υμενίων, της πίσω και της μπροστά επαφής καθώς και του επιπέδου κάδμιου τελλουρίου και κάδμιου θείου. Αυτή η τεχνική είναι χαμηλού κόστους. Γίνεται όμως με χαμηλούς όμως ρυθμούς παραγωγής. Ο περιορισμός εδώ είναι η θερμική επεξεργασία της εκτύπωσης μετά την εναπόθεση. Απαιτούνται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (περίπου στους 500 °C) για διάστημα μιας ώρας ή και περισσότερο. Το κλειδί για την επιτυχία της μεθόδου εκτύπωσης φαίνεται να είναι η χρησιμοποίηση των στοιχείων καδμίου και τελλουρίου σε μορφή μελανιού αντί για την χρησιμοποίησή τους σε μορφή σκόνης. Τα δυο στοιχεία αντιδρούν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας προς το σχηματισμό της ένωσης CdTe. Η θερμότητα της αντίδρασης είναι αρκετή υψηλή, ώστε να ευνοείται η ανάπτυξη υψηλής ποιότητας επιπέδων. Μια άλλη μέθοδος είναι η ηλεκτρική επιμετάλλωση (electroplating). Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται σε μεγάλο βαθμό τα υλικά. Απαιτεί χαμηλού κόστους εξοπλισμό σχετικά με τις κατεργασίες εναπόθεσης σε κενό. Οι ηλιακές κυψέλες που δημιουργούνται με αυτή την μέθοδο επιδεικνύουν άριστη συμπεριφορά και υψηλούς βαθμούς απόδοσης. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία τεχνικών εναπόθεσης σε συνθήκες κενού τα οποία να παράγουν καλά αποτελέσματα σε εργαστηριακή κλίμακα και σε μικρής επιφάνειας κυψέλες. Μόνο μια όμως χρησιμοποιείται σε εμπορική κλίμακα, η εξάχνωση κλειστού διαστήματος (closed space sublimation).

Ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων χαλκοκυριτικού απορροφητή (CIS-CIGS)

Η ένωση αυτών των στοιχείων δημιουργεί ένα ημιαγώγιμο υλικό το οποίο μπορεί να είναι είτε p είτε n αγωγιμότητας. Το υλικό αυτό έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Οι ηλεκτρονικές ιδιότητες των λεπτών υμενίων τύπου CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία χαλκού/ ίνδιου. Για το λόγο αυτό απαιτείται πολύ καλή στοιχειομετρία της ένωσης.

Είναι δυνατόν να κατασκευαστούν επαφές p-n τύπου CIS όμως δεν είναι ιδιαίτερα σταθερές. Έτσι συνήθως έχουμε ετεροεπαφές (heterojunctions) με κάδμιο - θείο (CdS). Υπάρχει πολύ καλή επαφή των σταθερών πλέγματος και της ηλεκτρονικής συγγένειας των δυο αυτών υλικών. Αποτέλεσμα είναι να μην υπάρχει πλεόνασμα επανασύνδεσης. Το CdS μπορεί να γίνει υλικό αγωγιμότητας τύπου n και το CIS αγωγιμότητας τύπου p. Είναι αρκετά εύκολο να δημιουργηθεί μια ωμική επαφή στο CdS, ιδιαίτερα όταν είναι έντονα νοθευμένο. Όμως οι επαφές στο p αγωγιμότητας CIS είναι πιο δύσκολες. Καλή ωμική επαφή σχηματίζει ο χρυσός αλλά είναι πολύ ακριβός για εμπορική χρήση. Έτσι χρησιμοποιείται συνήθως το μολυβδένιο που σχηματίζει αξιόπιστες επαφές με το έντονα νοθευμένο p αγωγιμότητας CIS. Για αποδοτικές συσκευές το CIS πρέπει να είναι πολύ ελαφρά νοθευμένο κοντά στην επαφή. Έτσι η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται μέσα στον όγκο όπου πραγματοποιείται η φωτο-δημιουργία. Αυτό εξασφαλίζει τη συλλογή με τη βοήθεια του πεδίου των φωτοδημιουργούμενων φορέων και κατά συνέπεια υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης.

Ηλιακές κυψέλες τύπου CIS έχουν ενεργειακό διάκενο 1eV. Η τάση ανοιχτοκυκλώματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ρεύματα επανασύνδεσης κοντά στην ένωση, εξαιτίας των ορίων των κόκκων και της επαφής. Υμένια CIS καλής ποιότητας έχουν μεγέθη κόκκων της τάξης

κάποιων μικρομέτρων και μήκη διάχυσης γύρω στα 2 μm . Έτσι είναι απαραίτητη η αδρανοποίηση των ορίων των κόκκων, ώστε να μειωθεί το ρεύμα επανασύνδεσης. Μια διαδικασία οξειδωσης μετά την εναπόθεση μπορεί να δώσει σημαντική βελτίωση στην συμπεριφορά. Αυτό συμβαίνει λόγω της αδρανοποίησης των ορίων των κόκκων. Προφανώς μια μέθοδος εναπόθεσης που δίνει μέγιστο μέγεθος κόκκων με ελάχιστα όρια είναι προτιμότερη.

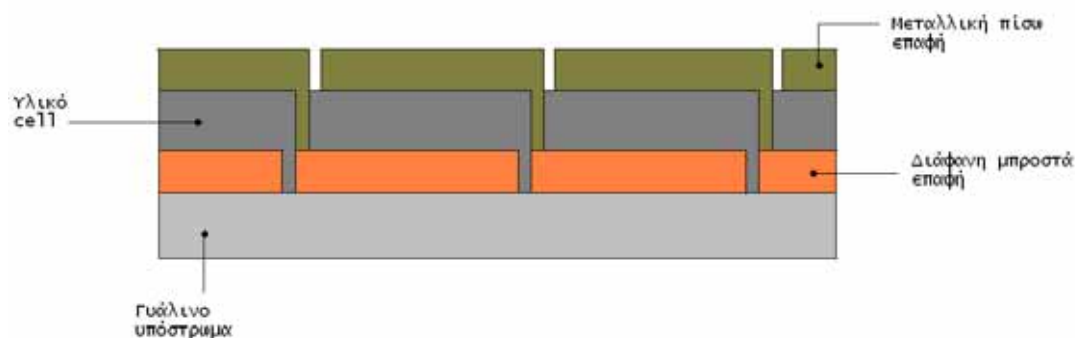
Το CdS έχει ενεργειακό διάκενο στα 2.4 eV. Επομένως απορροφά πολύ έντονα την ακτινοβολία στο πρασινο / μπλε άκρο του φάσματος. Οι διατάξεις πολύ καλής ποιότητας χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό επίπεδο (30 nm) CdS με ένα επίπεδο – 'παράθυρο' από πολύ υψηλά αγώγιμο υλικό. Το πιο κατάλληλο υλικό για το επίπεδο -'παράθυρο' είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου.

Η διαδικασία παραγωγής των ηλιακών κυψελών τεχνολογίας CIS στα πρώτα 10 χρόνια έρευνας και ανάπτυξης τους ήταν η εξάτμιση σε κενό των στοιχείων. Σύντομα έγινε αντιληπτό ότι η διατήρηση της στοιχειομετρίας της αντίδρασης εξαρτώνταν σημαντικά από την παροχή της σωστής αναλογίας χαλκού/ίνδιου με την ύπαρξη αερίου σεληνίου πάνω από την αναπτυσσόμενη επιφάνεια του φιλμ. Μια θετική για την εμπορική ανάπτυξη τους εξέλιξη που ακολούθησε ήταν η εναπόθεση ινδίου και χαλκού στην μεταλλική επαφή από μολυβδένιο. Στη συνέχεια επιτυγχάνονταν η 'σεληνοποίηση' αυτών των επιπέδων με την παροχή υδρογόνου – σεληνίου πάνω από την επιφάνεια στους 400°C. Αυτή η διαδικασία 'σεληνοποίησης' δίνει πολύ υψηλής ποιότητας υλικά. Ακόμα μπορεί να παράγει ενιαία φιλμ σε μεγάλες επιφάνειες. Η συγχώνευση του σεληνίου στα επίπεδα του χαλκού και του ινδίου προκαλεί σημαντική αύξηση του όγκου. Κατά συνέπεια δημιουργούνται μεγάλες τάσεις στο υμένιο (φιλμ). Αυτά τα προβλήματα λύνονται με τον προσεκτικό έλεγχο των λεπτομερειών της προετοιμασίας του υποστρώματος, της εναπόθεσης του μολυβδενίου, της

δημιουργίας των επιπέδων χαλκού και ινδίου και τον έλεγχο της διαδικασίας σεληνοποίησης. Η προσθήκη γαλλίου (Ga) στην διεπαφή Mo/Cu In βελτιώνει σημαντικά το πρόβλημα. Η προσθήκη γαλλίου έχει και άλλα πλεονεκτήματα εκτός από αυτά που αναφέρθηκαν. Δίνει ένα πραγματικό κράμα χαλκού-ινδίου-γάλλιου-σεληνίου (CIGS). Το κράμα αυτό έχει ενεργειακό διάκενο που αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό του γαλλίου που προστίθεται. Καθώς το ενεργειακό διάκενο αυξάνεται, αυξάνεται και η τάση ανοιχτοκυκλώματος. Προκύπτουν έτσι μεγαλύτεροι παράγοντες πλήρωσης (fill-factor) και λιγότερες κυψέλες ανά συστοιχία φωτοβολταϊκών. Για παράδειγμα για ηλιακές κυψέλες τεχνολογίας CIS η τάση στη μέγιστη ισχύ είναι συνήθως στα 300-350 mV που είναι χαμηλή. Αντίθετα στις κυψέλες τεχνολογίας CIGS με 10-20% γάλλιο έχει 450-500 mV. Η τάση αυτή είναι περίπου ίση με κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου. Παράλληλα απαιτούνται και λιγότερες κυψέλες. Έτσι όταν αυτές συνδεθούν σε μια εγκατάσταση η όλη διαδικασία γίνεται πιο αξιόπιστη και με λιγότερο κόστος. Στις κυψέλες τεχνολογίας CIGS με ενεργειακό διάκενο μεγαλύτερο από 1.1eV αποφεύγονται προβλήματα με απορρόφηση ελεύθερων φορέων στο επίπεδο του οξειδίου του ψευδαργύρου. Εξαιτίας των ελεύθερων ηλεκτρονίων και της απορρόφησης της ακτινοβολίας μεγάλων μηκών κύματος λόγω των ελεύθερων φορέων, το οξείδιο του ψευδαργύρου εμφανίζει αγωγιμότητα που ξεκινά στα 1.1 μm (1.1eV). Είναι δυνατόν να μειωθεί η συγκέντρωση ελεύθερων φορέων βελτιώνοντας την ποιότητα του επιπέδου του ZnO. Όμως δεν μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς. Με την τεχνολογία CIGS το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται πλέον, αφού τα φωτόνια με ενέργεια μέχρι 1.1eV δεν απορροφώνται. Η απώλεια ρεύματος από το μεγάλο ενεργειακό διάκενο υπερκαλύπτεται από την αυξημένη τάση και το παράγοντα πλήρωσης.

Κυκλωμάτωση των ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων

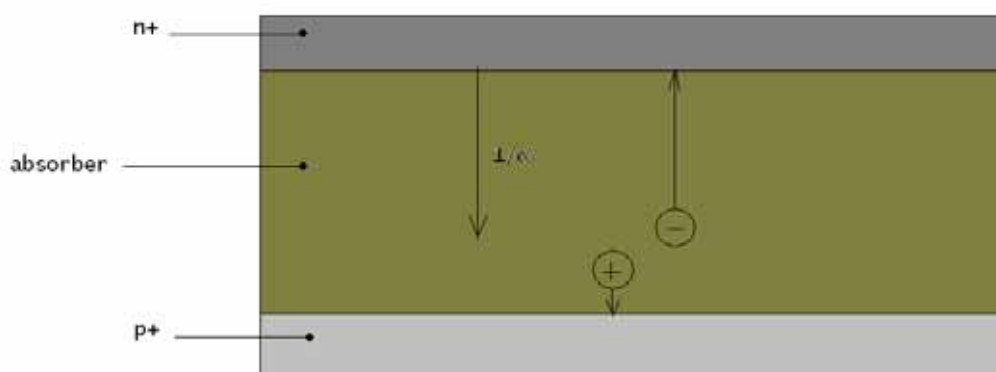
Ένα από τα πλεονεκτήματα των λεπτών υμενίων είναι η ενιαία κατασκευή ολόκληρου του πλαισίου με τις διεπαφές της κυψέλης κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης. Η επένδυση του οξειδίου του κασσιτέρου (tin oxide) στο γυαλί αφαιρείται είτε μηχανικά είτε με laser. Σχηματίζονται λωρίδες πάχους 1-2 cm σε όλο το μήκος της κατασκευής. Στη συνέχεια εναποτίθεται η επαφή p-i-n ή οι άλλου είδους επαφές πάνω σε όλη την επιφάνεια. Αφαιρούνται ώστε να σχηματιστούν λωρίδες αντίστοιχες με αυτές της επένδυσης αλλά ελαφρώς μετατοπισμένες. Η μεταλλική πίσω επαφή εναποτίθεται και αυτή σε ολόκληρη την επιφάνεια. Στη συνέχεια αφαιρείται με όμοιο τρόπο. Σχηματίζοντας λωρίδες, που και αυτές είναι ελαφρώς μετατοπισμένες. Έτσι σχηματίζεται κάθε κυψέλη ξεχωριστά σε μια μακριά και στενή λωρίδα. Κατ'αυτόν τον τρόπο μειώνεται η αντίσταση σε σειρά. Όλες οι κυψέλες ενώνονται σε σειρά. Η εξωτερική μεταλλική λωρίδα είναι ο αρνητικός ακροδέκτης. Το εξωτερικό επίπεδο οξειδίου του κασσιτέρου να είναι ο θετικός ακροδέκτης για το σύνολο της διάταξης.



19. Κυκλωμάτωση λεπτών υμενίων

Ελάχιστο πάχος

Το πάχος μιας ηλιακής κυψέλης είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα. Η επιλογή του βέλτιστου πάχους είναι συχνά συνάρτηση πολλών συγκρουόμενων μεταξύ τους παραγόντων. Για παράδειγμα με την χρησιμοποίηση περισσότερου υλικού θα αυξάνονταν αδικαιολόγητα το κόστος. Όμως με πολύ μικρή ποσότητα χάνεται μέρος των σημαντικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών. Για παράδειγμα θα απορροφούσε λιγότερο φως. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, το επίπεδο απορρόφησης πρέπει να έχει πάχος μικρότερο από τα μήκη διάχυσης οπών και ηλεκτρονίων. Επίσης το πάχος πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το βάθος διείσδυσης των φωτονίων ($1/\alpha$). Αυτές οι συνθήκες είναι ικανές αλλά όχι και αναγκαίες. Η αναγκαία συνθήκη είναι να υπάρχει αρκετό υλικό για να απορροφηθεί επαρκώς το φως. Δυο ξεχωριστά επίπεδα απορρόφησης λεπτού πάχους έχουν το ίδιο αποτέλεσμα με ένα επίπεδο διπλάσιου πάχους.



20. Απορροφητής – Διαχωρισμός ζευγών ηλεκτρονίων - οπών

Έτσι η αναγκαία συνθήκη είναι να φτάνουν στις αντίστοιχες πλευρές της κυψέλης. Το γεγονός αυτό άμεσα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πάχος του επιπέδου απορρόφησης πρέπει να είναι μικρότερο από τα μήκη διάχυσης. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται μια διαμόρφωση που ικανοποιεί και την

συνθήκη απορρόφησης του φωτός και την συνθήκη μεταφοράς οπών και ηλεκτρονίων. Παράλληλα επιτρέπουν και τη χρησιμοποίηση υλικών απορρόφησης με πολύ μικρό μήκος διάχυσης.



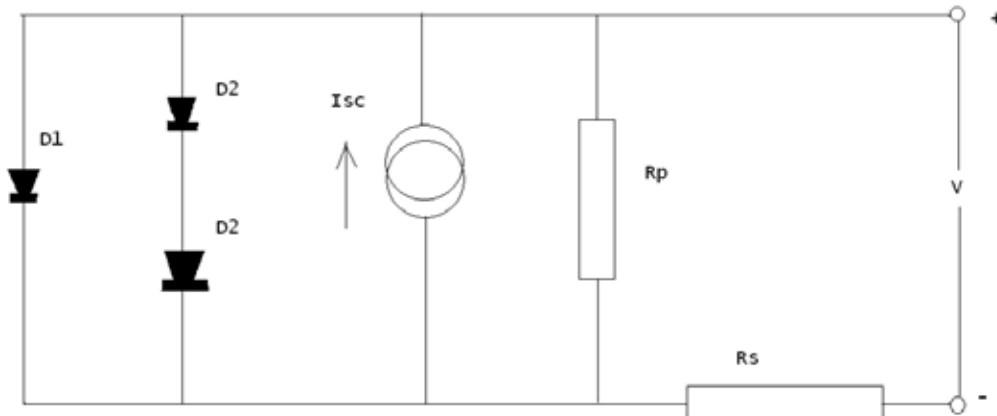
21. Διαμόρφωση για μεγαλύτερη απορρόφηση φωτός

Ισοδύναμο Κύκλωμα

Γενικά η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) στις ηλιακές κυψέλες λαμβάνει υπόψη της και άλλους παράγοντες όπως τις ακαθαρσίες της επαφής p-n. Μπορούμε να πούμε ότι σε υψηλές τάσεις κυριαρχεί η επανασύνδεση μεταξύ ζώνης αγωγιμότητας και ζώνης σθένους. Σε χαμηλές τάσεις κυριαρχεί η επανασύνδεση λόγω των ακαθαρσιών. Έτσι η χαρακτηριστική καμπύλη περιγράφει την επίδραση της επανασύνδεσης μεταξύ των ζωνών, την επίδραση της επανασύνδεσης λόγω ακαθαρσιών, καθώς και την επίδραση του ρεύματος βραχυκύκλωσης εξαιτίας του φωτισμού. Το μοντέλο αυτό προσομοιάζεται με δυο διόδους συνδεδεμένες παράλληλα. Η κάθε diode αντιστοιχεί στα δυο είδη επανασύνδεσης. Ακόμα υπάρχει και μια πηγή ρεύματος που αντιστοιχεί στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Λόγω της σύνδεσης των δυο διόδων σε σειρά, το μισό της τάσης

εφαρμόζεται σε κάθε μια δίοδο. Τελικά η χαρακτηριστική έχει την εξής μορφή:

$$I_Q = I_{s1} \exp \left\{ \frac{eV}{kT} - 1 \right\} + I_{s2} \exp \left\{ \frac{eV}{2kT} - 1 \right\} + I_{sc}$$



22. Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακής κυψέλης

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα δυο ακόμα στοιχεία έχουν προστεθεί. Η αντίσταση R_p τοποθετημένη παράλληλα στις δυο διόδους του μοντέλου, αναπαριστά τις μετακινήσεις που μπορούν να λάβουν χώρα σε πραγματικές ηλιακές κυψέλες κατά μήκος της επιφάνειας. Η αντίσταση R_s αναπαριστά όλες τις πτώσεις τάσης εξαιτίας της αντίστασης στην μετακίνηση καθώς και τη σύνδεση του με το φορτίο. Τελικά η χαρακτηριστική ρεύματος- τάσης και με τη βοήθεια του προηγούμενου κυκλώματος παίρνει την εξής μορφή:

$$I_Q = I_{s1} \exp \left\{ \left[\frac{e(V - I_Q R_s)}{kT} \right] - 1 \right\} + I_{s2} \exp \left\{ \left[\frac{e(V - I_Q R_s)}{2kT} \right] - 1 \right\} + I_{sc} + \frac{(V - I_Q R_s)}{R_p}$$

Σύγκριτικά δεδομένα μεταξύ των νέων τεχνολογιών ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων

[13] Στην συνέχεια θα επιχειρήσουμε μια σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων. Μόλις πρόσφατα ερευνητές του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των Η.Π.Α. (NREL) ανακοίνωσαν ότι κατάφεραν να δημιουργήσουν μια ηλιακή κυψέλη λεπτών υμενίων η οποία μπορεί να ανταγωνιστεί σε απόδοση τις κοινές ηλιακές κυψέλες πυριτίου. Έτσι σε ηλιακές κυψέλες τεχνολογίας CIGS ο βαθμός απόδοσης υπολογίστηκε σχεδόν στο 19.9% στο εργαστήριο. Αυτός είναι ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης που έχει παρατηρηθεί σε ηλιακές κυψέλες αυτού του είδους σύμφωνα με το NREL. Βέβαια αυτό απέχει ακόμα πολύ από το μέγιστο βαθμό απόδοσης σε κυψέλες συμβατικής τεχνολογίας που μετρήθηκε τον Ιούλιο του 2007 (42.8% χρησιμοποιώντας νέα τεχνολογία με αρκετές βελτιώσεις σε μια υψηλής απόδοσης κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου). Όμως, υπάρχουν μεγάλες διαφορές στο κατασκευαστικό κόστος στις δυο αυτές τεχνολογίες. Διαφορές υπάρχουν και στις δυνατότητες χρησιμοποίησης τους στις διάφορες εφαρμογές. Στην συνέχεια παρατίθεται ένας πίνακας που παρουσιάζει σε γενικές γραμμές την αγορά ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων με την αντίστοιχη τεχνολογία που χρησιμοποιείται και φυσικά τα αντίστοιχα κόστη.

Thin film technology	% of thin film market	Module cost
Amorphous Silicon (a-Si)	61	< \$2.00
Cadmium telluride (CdTe)	34	\$1.25
Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS)	4	< \$2.00
Dye Sensitized Solar Cells (DSSC)	~1	< \$3.00

23. Αγορά ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων και κόστος αυτών (Πηγή: U.S. Department of Energy)

Όπως βλέπουμε, προς το παρόν επικρατούν οι τεχνολογίες a-Si και CdTe. Αυτό όμως σύντομα αναμένεται να αλλάξει. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια πολύ έντονη δραστηριότητα στο χώρο των CIGS. Πολλές εταιρίες και ερευνητικά κέντρα στρέφονται σε αυτό τον χώρο. Μάλιστα γίνονται ιδιαίτερα ανταγωνιστικοί με αποτέλεσμα στα επόμενα χρόνια να αναμένεται να καταλάβουν πολύ μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά των κυψελών λεπτών υμενίων. Πολλοί είναι οι παράγοντες που οδηγούν προς αυτή την κατεύθυνση, όπως για παράδειγμα το χαμηλό κόστος κατασκευής.

Έτσι ο συνδυασμός των υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες όπως επίσης και οι βελτιωμένες μέθοδοι κατεργασιών για τα υλικά αυτά μπορούν να προσφέρουν πολλές λύσεις. Στόχος είναι πάντα η αύξηση του βαθμού απόδοσης. Αυτό αποτελεί την μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζει σήμερα η φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Μελλοντικές Προκλήσεις

[12,13,14] Στη συνέχεια θα εξετάσουμε κάποια θέματα σχετικά με την τεχνολογία των ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων, που θα πρέπει να λυθούν στο μέλλον. Έτσι θα καταστεί δυνατό να εξελιχθεί περαιτέρω η τεχνολογία αυτή και να μπορέσει να έχει εμπορική επιτυχία. Τα κριτήρια για την εμπορική βιωσιμότητα αυτών των προϊόντων, βασίζονται κατά κύριο λόγο στην οικονομική θεώρηση τους. Προφανώς όμως και τα κριτήρια αυτά εξαρτώνται από την επίτευξη κάποιων συγκεκριμένων τεχνολογικών στόχων.

Η ηλιακή ακτινοβολία έχει χαμηλή πυκνότητα ισχύος. Για το λόγο αυτό η επιφάνεια που θα πρέπει να έχει μια τέτοια εγκατάσταση, για να παραχθεί μια σημαντική ποσότητα ενέργειας – ισχύος θα πρέπει και αυτή κατά συνέπεια να είναι αρκετά μεγάλη. Πολλά από τα κόστη που σχετίζονται με μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μεταβάλλονται ανάλογα με την επιφάνεια που αυτή καταλαμβάνει. Για παράδειγμα το κόστος της απαιτούμενης έκτασης, η επιφάνεια των πλαισίων μέσα στα οποία θα τοποθετηθούν οι ηλιακές κυψέλες, καλωδιώσεις. Όλα αποτελούν κόστη που σχετίζονται με την απαιτούμενη επιφάνεια της εγκατάστασης. Πολύ συχνά είναι αυτά που καθορίζουν και το συνολικό κόστος του όλου συστήματος. Ιδιαίτερα εάν ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης είναι χαμηλός. Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις αρχικά απαιτούν αρκετά υψηλά επενδυτικά κεφάλαια. Στη συνέχεια όμως, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης τους είναι ελάχιστο. Έτσι ο καθοριστικός παράγοντας που καθορίζει την αποδοτικότητα της επένδυσης είναι ο χρόνος ζωής της. Προς το παρόν ο χρόνος ζωής των συμβατικών ηλιακών κυψελών πυριτίου είναι 20-30 χρόνια. Κατά συνέπεια και ο στόχος και για τις κυψέλες λεπτών υμενίων πρέπει να είναι ανάλογος. Ο κύριος στόχος για τα επόμενα χρόνια στις κυψέλες λεπτών υμενίων θα

πρέπει να είναι η μείωση του κόστους σε αυτές τις εγκαταστάσεις. Για το λόγο αυτό θα πρέπει οι κυψέλες αυτού του τύπου να κατασκευάζονται σε μεγάλους όγκους με χαμηλό παράλληλα κόστος.

Μια ακόμα απαίτηση είναι η ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και συγκεκριμένα των αποβλήτων. Και εδώ συμπεριλαμβάνεται το σύνολο των αποβλήτων. Δηλαδή αυτά που δημιουργούνται από την αρχική εξόρυξη των στοιχείων που θα σχηματίσουν τις κυψέλες έως και αυτά που σχηματίζονται κατά την εγκατάσταση και την λειτουργία τους. Ένα τέτοιο παράδειγμα που έχει αναφερθεί και πιο πάνω είναι η ύπαρξη του καδμίου στις αντίστοιχες κυψέλες λεπτών υμενίων, που όπως αναφέρθηκε, είναι ιδιαίτερα τοξικό.

Όλα τα είδη λεπτών υμενίων χρησιμοποιούν κατεργασίες που είναι ικανές να παράγουν μεγάλους όγκους με σχετικά μικρό κόστος. Τα υλικά και οι κατεργασίες επιλέχθηκαν ακριβώς για αυτή τους την δυνατότητα. Πλέον οι σημαντικότερες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης στρέφονται στην αύξηση του βαθμού απόδοσης αυτών των κυψελών. Αλλά μια προσέγγιση στην κατασκευή λεπτών υμενίων που θα πρέπει να αναφερθεί είναι η χρησιμοποίηση πολυμερών. Για παράδειγμα μπορούν τα πολυμερή να δεχτούν προσμίξεις p και n αγωγιμότητας. Δίοδοι πολυμερών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εκπομποί φωτισμού. Τα υλικά αυτά μελετώνται για την μελλοντική χρήση τους σε ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων και δίνουν αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Παρουσιάζουν πολύ χαμηλό κόστος. Όμως πριν προωθηθούν για εμπορική χρήση θα πρέπει να έχουν βαθμούς απόδοσης πάνω από 5%. Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά διάφορα θέματα που θα πρέπει να επιλυθούν για την περαιτέρω προώθηση αυτής της τεχνολογίας.

- Όπως είναι φυσικό χρειάζεται να αναπτυχθεί περαιτέρω η εν γένει επιστημονική γνώση σε θέματα όπως: (α) γνώση και μέτρηση των

ιδιοτήτων υλικών που είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν σε συσκευές και διατάξεις φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, (β) μοντελοποίηση των σχέσεων μεταξύ του μεγέθους του φιλμ και της κατανομής του υλικού και (γ) χρησιμοποίηση των γνώσεων αυτών στη βιομηχανική παραγωγή. Τα οφέλη που αναμένονται από κάτι τέτοιο είναι μεγαλύτερη αποδοση κάθε βήματος της κατεργασίας και μεγαλύτερος βαθμός αξιοπιστίας και παραγωγικότητας και κατά συνέπεια μεγαλύτερη απόδοση της όλης διαδικασίας.

- Γενικά όλες αυτές οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν πιο πάνω έχουν επιδείξει μια σταθερότητα ως προς τη συμπεριφορά τους σε βάθος χρόνου. Συχνά όμως παρατηρείται το φαινόμενο της μείωσης του βαθμού απόδοσης μακροπρόθεσμα. Έτσι θα πρέπει να απαντηθεί το ερώτημα γιατί κάποιες διατάξεις ηλιακών κυψελών διατηρούν σταθερό τον βαθμό απόδοσης σε βάθος χρόνου ενώ κάποιες άλλες όχι. Για την απάντηση στο ερώτημα αυτό απαιτείται μια καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού που οδηγεί στη μείωση της απόδοσης σε τέτοιες διατάξεις και το αν επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες για παράδειγμα θα μπορούσαν να είναι οι διαδικασίες συσκευασίας. Ένα απλό παράδειγμα πάνω σε αυτό είναι ότι, όπως έχει αποδειχθεί, η εναπόθεση υδρατμών πάνω στις ηλιακές κυψέλες κατά την διάρκεια της συσκευασίας τους μειώνει τον βαθμό απόδοσης. Έτσι λαμβάνοντας μέτρα για την αποφυγή ενός τέτοιου φαινομένου προκύπτουν κυψέλες με σταθερό βαθμό απόδοσης και μακροπρόθεσμα. Σε μεγάλο βαθμό έχει μελετηθεί η συμπεριφορά των ηλιακών κυψελών τεχνολογίας CIGS και CdTe. Ωστόσο μέχρι σήμερα θεωρείται ανεπαρκής ο βαθμός κατανόησης των αιτιών που προκαλούν αυτή τη μείωση στο βαθμό απόδοσης. Μόλις πρόσφατα μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στο μηχανισμό μείωσης του βαθμού απόδοσης στις κυψέλες CdTe. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι επικρατούν διαφορετικοί μηχανισμοί σε διαφορετικές

θερμοκρασίες. Δηλαδή, στο θερμοκρασιακό εύρος 90-120°C η μείωση χαρακτηρίζεται από την διάχυση του χαλκού (Cu) από την πίσω επαφή προς την ηλεκτρική ένωση. Αντίθετα στην περιοχή από 60 έως 90°C, ο μηχανισμός αυτός δεν είναι γνωστός προς το παρόν. Τέτοιες μελέτες θα βοηθούσαν στη δημιουργία σχετικών και κατάλληλων δοκιμών.

- Επί τόπου διαδικασίες διάγνωσης βλαβών και ελέγχου. Προς το παρόν πολύ λίγα υπάρχουν ως προς τις επί τόπου διαδικασίες ελέγχου και διάγνωσης βλαβών στις τεχνολογίες CIGS και CdTe. Η επιστημονική γνώση ως προς τις ιδιότητες των υλικών είναι σχετικά ανεπαρκής, για να μπορεί να θεμελιωθεί μια ισχυρή θεωρητική βάση. Έτσι είναι δύσκολο να προκύψουν τα απαραίτητα εργαλεία για διάγνωση βλαβών. Αυτά τα εργαλεία θα πρέπει να αναπτυχθούν σε γρήγορες διεργασίες και στην ανάδραση τους. Να δικαιολογούν δηλαδή την επεξεργασία των πληροφοριών που θα προκύπτουν σε πραγματικό χρόνο. Προς το παρόν πολύ λίγες τεχνικές μπορούν πρακτικά να χρησιμοποιηθούν. Αυτές βασίζονται στην εκπομπή ακτινοβολίας από την επιφάνεια της κυψέλης, και στον επί τόπου προσδιορισμό της σύνθεσης με χρήση ακτίνων-X.
- Πιο λεπτά επίπεδα απορρόφησης σε κυψέλες τεχνολογίας CIGS, CdTe. Αυτή η επιδίωξη προκύπτει εξαιτίας της διαθεσιμότητας και της τιμής των In, Te. Η ανησυχία γίνεται πιο έντονη στην περίπτωση του In σε σχέση με το Te, λόγω της χρησιμοποίησης του σε πολλές χρήσεις. Μειώνοντας το πάχος των επιπέδων απορρόφησης, προκύπτουν και άλλα οφέλη ειδικά για τα CIGS. Για παράδειγμα, το μικρότερο κόστος των υλικών. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε διάφορα στοιχεία για διάφορες κυψέλες CIGS και CdTe με πολύ λεπτά επίπεδα απορρόφησης. Η πτώση στην απόδοση μειώνεται σημαντικά για πάχη μικρότερα από 1μm. Μελέτες πραγματοποιούνται για την μοντελοποίηση αυτών των διατάξεων.

Σκοπός είναι να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός των απωλειών στην περίπτωση πολύ λεπτών επιπέδων απορρόφησης του φωτός.

t (μm)	V _{OC} (V)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF (%)	Efficiency (%)
1.0 CIGS	0.676	31.96	79.47	17.16 NREL
0.75 CIGS	0.652	26.0	74.0	12.5
0.40 CIGS	0.565	21.3	75.7	9.1
0.47 CIGS	0.576	26.8	64.2	9.9 EPV
1. CIGSS Module	25.26	2.66	69.2	12.8 Shell Solar
0.87 CdTe	0.772	22.0	69.7	11.8

24. Ηλεκτρικά μεγέθη και πάχος λεπτών υμενίων

- Ανάγκη για κατεργασίες χαμηλότερου κόστους. Το ζήτημα αυτό αφορά κυρίως τις τεχνολογίες CIGS. Μέχρι σήμερα οι συσκευές και οι διατάξεις με υψηλή απόδοση παρασκευάζονται με δυο τρόπους. Είτε με εξάτμιση των στοιχείων σε κενό, είτε με θέρμανση των μετάλλων και "σεληνοποίηση" με H₂Se. Και οι δυο αυτοί οι μέθοδοι παρουσιάζουν προβλήματα. Για παράδειγμα χαμηλό ρυθμό εναπόθεσης, χαμηλή χρησιμοποίηση των υλικών, αυστηρά υψηλές συνθήκες κενού κ.α. Έτσι μια κατεργασία χαμηλότερου κόστους θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης των υλικών, μεγαλύτερη χρησιμοποίηση των υλικών και ένα πιο απλό εξοπλισμό ικανό όμως να κατεργαστεί πολύ μεγάλα υποστρώματα. Μια σχετική λύση θα μπορούσε να είναι η

χρησιμοποίηση ως συνθετικών κάποιων νανοδομών. Οι νανοδομές αυτές μπορούν να κρυσταλλώνονται κατά τις κατεργασίες CIGS.

- Βελτίωση της τάσης ανοιχτού-κυκλώματος (Voc) στις διατάξεις CdTe. Η σημαντικότερη παράμετρος που χρειάζεται βελτίωση για την επίτευξη υψηλότερων βαθμών απόδοσης, είναι η τάση ανοιχτού-κυκλώματος (Voc). Το μέγεθος της τάσης ανοιχτοκυκλώματος καθορίζεται από τις ιδιότητες της ένωσης, την συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας και την πίσω επαφή. Η ενίσχυση της Voc, μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας την νόθευση στην p-περιοχή, με εξωτερική νόθευση. Καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται βελτιώνοντας τις συνθήκες ανάπτυξης κρυστάλλων. Περιορίζεται έτσι ο σχηματισμός περισσότερων σημείων ατελειών μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Κατασκευή

[12] Η διάταξη σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με βάση τους κανόνες και τις αρχές του Μηχανολογικού Σχεδιασμού. Έγινε προσπάθεια η διάταξη να τηρεί τους εξής κανόνες:

- ❖ Σαφής και ξεκάθαρη λειτουργική διάταξη
- ❖ Απλή και όχι πολύπλοκη κατασκευή
- ❖ Ασφαλής κατασκευή και λειτουργία
- ❖ Κατά το δυνατόν ελαφρότερη κατασκευή
- ❖ Επιτευκτική και άνετη συναρμολόγηση / αποσυναρμολόγηση

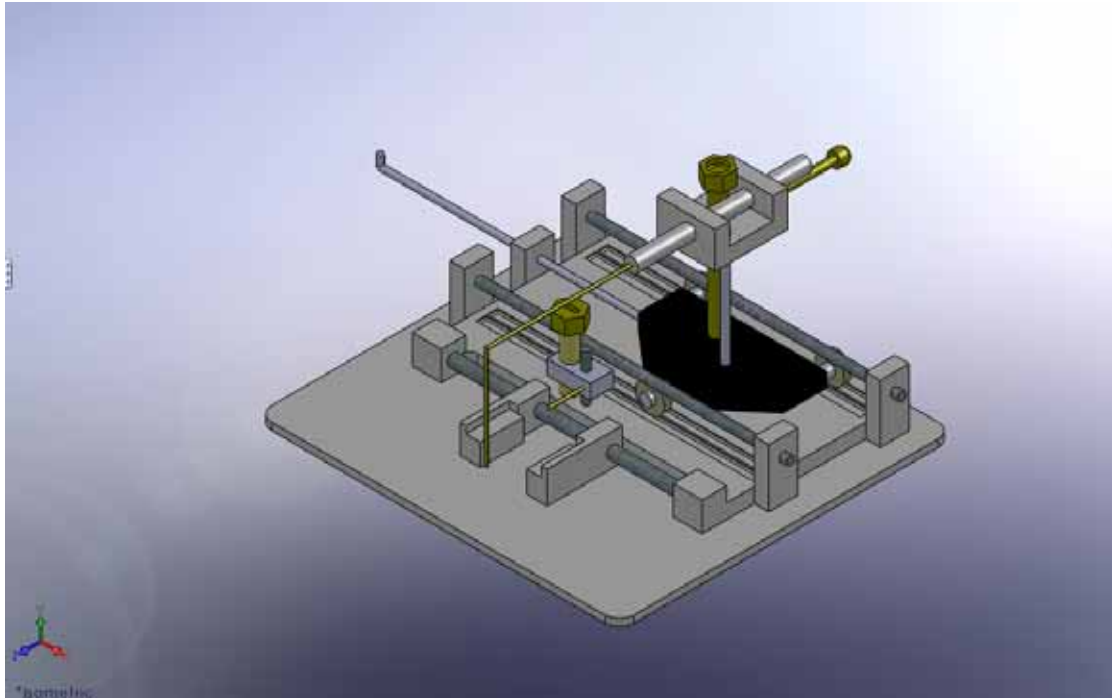
Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι προδιαγραφές που τέθηκαν για την συγκεκριμένη κατασκευή. Καταρχήν θα πρέπει να υπάρχει μια βάση πάνω στην οποία θα τοποθετείται και θα συγκρατείται η ηλιακή κυψέλη. Οι μετρήσεις θα πραγματοποιούνται με βοήθεια δυο ακίδων. Αυτές θα πρέπει να ακουμπάνε την κυψέλη σε συγκεκριμένα σημεία σε όλη την επιφάνεια της. Τέλος η μορφή τους θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να δημιουργείται η ελάχιστη δυνατή σκίαση. Έτσι δεν θα επηρεάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Ακολουθεί μια πιο αναλυτική περιγραφή των προδιαγραφών που θα πρέπει να έχει η κατασκευή. Στόχος είναι να υπάρχουν δύο 'ακίδες'. Οι ακίδες θα πρέπει να ακουμπάνε πάνω στο δοκίμιο σε συγκεκριμένα σημεία. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Η μια ακίδα μπορεί να κινείται και στους τρεις άξονες. Η άλλη ακίδα μπορεί να κάνει μικρές μετατοπίσεις καθ' ύψος. Έτσι μπορούν να πραγματοποιούνται μετρήσεις σε οποιοδήποτε σημείο του δοκιμίου. Αυτό εξυπηρετείται και με τη δημιουργία μιας 'μετακινούμενης' βάσης για την στήριξη του δοκιμίου.

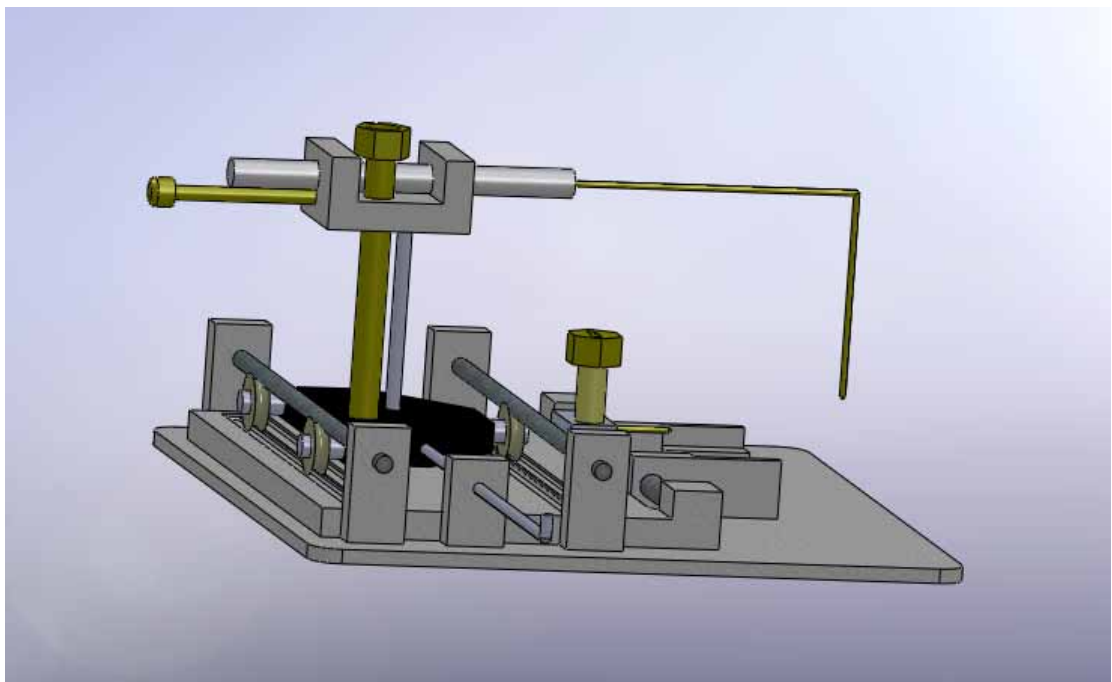
Η δυνατότητα κίνησης στις δυο ακίδες δίνεται με την βοήθεια συστημάτων κορώνας – ατέρμονα κοχλία. Επίσης γίνεται χρήση σπειρωμάτων κίνησης.

Σπειρώματα χρησιμοποιούνται και για την μετακίνηση και την συγκράτηση της βάσης πάνω στην οποία τοποθετείται η ηλιακή κυψέλη. Όλοι οι κοχλίες κίνησης έχουν βήμα 1mm. Οι διαστάσεις των σπειρωμάτων κίνησης βρίσκονται αναλυτικά στα κατασκευαστικά σχέδια της διάταξης. Είναι τέτοιες ώστε να επιτρέπουν την κίνηση στους τρεις άξονες και στην κλίμακα που απαιτεί μια τέτοια διάταξη με αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας. Τα τρισδιάστατα σχέδια πέρασαν από διάφορες φάσεις διορθώσεων ανάλογα με τις υποδείξεις. Ακόμα αλλαγές έγιναν για να εξυπηρετείται καλύτερα η λειτουργικότητα τους. αυτά. Τελικά δημιουργήθηκε μια σχεδιαστική λύση η οποία καλύπτει τις λειτουργικές απαιτήσεις της διάταξης. Οι κατασκευαστικές απαιτήσεις, ήταν πολύ υψηλές λόγω της αυξημένης ακρίβειας σε τόσο μικρά μεγέθη. Αξίζει να σημειωθεί ότι σχεδιαστικές αλλαγές έγιναν ακόμα και κατά την διάρκεια της κατασκευής των διαφόρων τμημάτων της διάταξης. Ο λόγος ήταν οι δυσκολίες κατεργασίας τόσο λεπτών τεμαχίων.

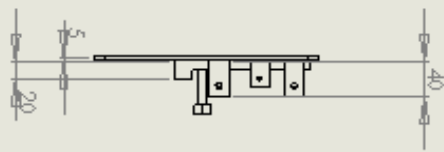
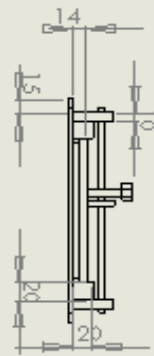
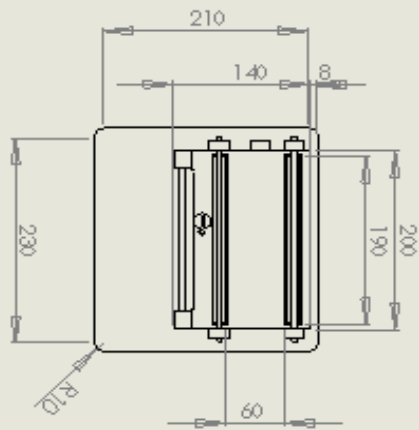
Έτσι ακολουθούν κάποια τρισδιάστατα σχέδια σε διάφορες όψεις. Στην συνέχεια παρατίθενται και τα κατασκευαστικά σχέδια των διαφόρων τεμαχίων που αποτελούν την διάταξη.



25. Τρισδιάστατη όψη της διάταξης



26. Τρισδιάστατη όψη της διάταξης

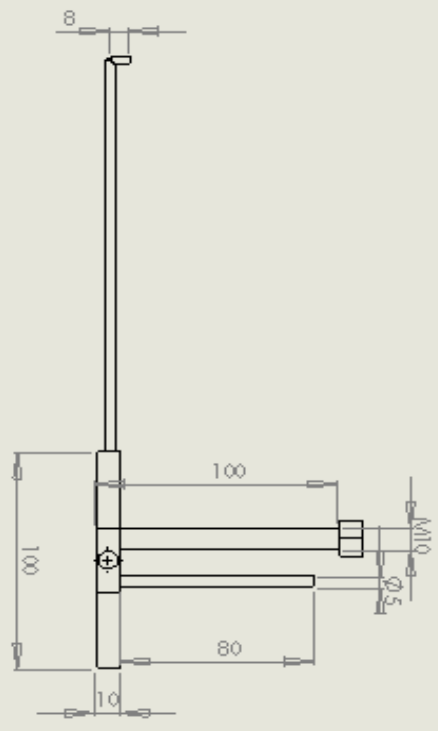
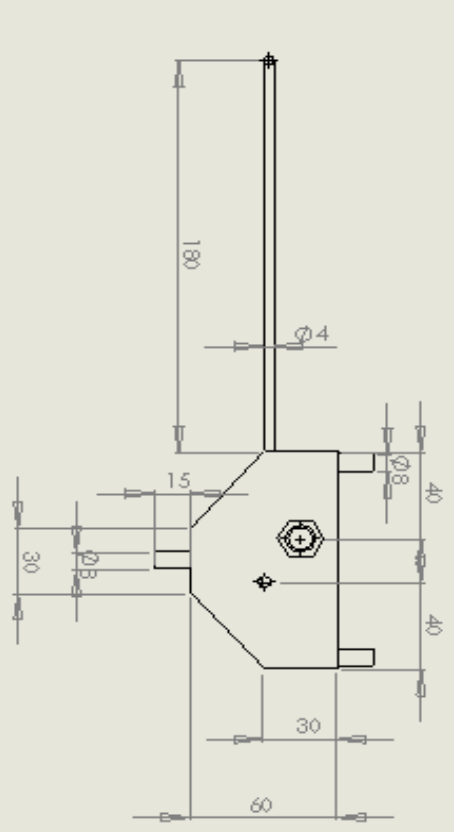


MATERIALS		MATERIALS		MATERIALS		MATERIALS	
NO.	DESCRIPTION	NO.	DESCRIPTION	NO.	DESCRIPTION	NO.	DESCRIPTION

PART NO. 10000000		REV. NO. 001	
TITLE BRACKET		DATE 10/10/2011	
DRAWN BY ...		CHECKED BY ...	
APPROVED BY ...		ENGINEER ...	
PROJECT NO. ...		SHEET NO. ...	
DRAWING NO. ...		SCALE ...	
MATERIAL ...		FINISH ...	
TOLERANCE ...		SURFACE ...	
WEIGHT ...		VOLUME ...	

bash

A3



MATERIALELEMENTS			MID		DATE FOR		DO NOT EDIT BELOW		INVEN	
DESCRIPTION			REVISION		REVISION		REVISION		REVISION	
NO.	REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	DATE	BY	DATE	BY	DATE	BY
01										
02										
03										
04										

Dwg No. **Kolwinda**
 Date: 10/10/11
 Scale: A3

Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της διάταξης. Τα υλικά αυτά είναι plexiglass, ertalon, acetal χάλυβας και αλουμίνιο. Το plexiglass χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των δυο βάσεων. Της μεγάλης, πάνω στην οποία τοποθετείται και όλη η υπόλοιπη διάταξη και της μικρότερης βάσης πάνω στην οποία τοποθετείται σύστημα κορώνας – ατέρμονα κοχλία. Το plexiglass (PMMA) το οποίο θεωρείται πολυμερές θερμοπλαστικό υλικό, σχηματίζεται στους 240-250 °C. Παράγεται με όλες τις συνήθεις μεθόδους χύτευσης όπως για παράδειγμα χύτευση έγχυσης (injection) κ.α. Η πυκνότητα του είναι 1,150-1,190 kg/m³. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από το μισό της πυκνότητας του γυαλίου και αντίστοιχη με άλλων πλαστικών. Επίσης έχει πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το γυαλί. Είναι όμως σημαντικά μικρότερη σε σχέση με άλλα βιομηχανικά πλαστικά. Το υλικό αυτό επιτρέπει την διείσδυση του ορατού φωτός έως και 98% (ανα μέτρο). Αντανακλά περίπου το 4% από κάθε επιφάνεια του με συντελεστή διάθλασης 1,4893-1,4899. Τέλος έχει πολύ καλές ιδιότητες σε ανοιχτό περιβάλλον σε σχέση με άλλα πλαστικά. Στον επόμενο πίνακα φαίνονατι συγκαντρωτικά κάποιες ιδιότητες του plexiglass:

Plexiglass – Acrylic glass (PMMA)	
Μονομερές	$(C_5O_2H_8)_n$
Πυκνότητα	1.19 g/cm ³
Σημείο τήξης	130–140 °C
Σημείο βρασμού	200.0 °C

27. Πίνακας ιδιοτήτων plexiglass

Για την κατασκευή των κοχλιών κίνησης χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά και το acetal και το ertalon. Τα υλικά αυτά είναι πολυμερή με αντοχή σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Επίσης είναι σχετικά εύκολα στη κατεργασία τους. Άλλα πλεονεκτήματα τους είναι η μεγάλη χημική αντίσταση, η πολύ χαμηλή απορρόφηση νερού και η ανθεκτικότητα σε υδρόλυση από βάση. Ακόμα έχουν πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής. Από μηχανικής άποψης χαρακτηρίζονται ως θερμοπλαστικά. Είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Έτσι συχνά χρησιμοποιούνται ως επένδυση μεταλλικών τεμαχίων.

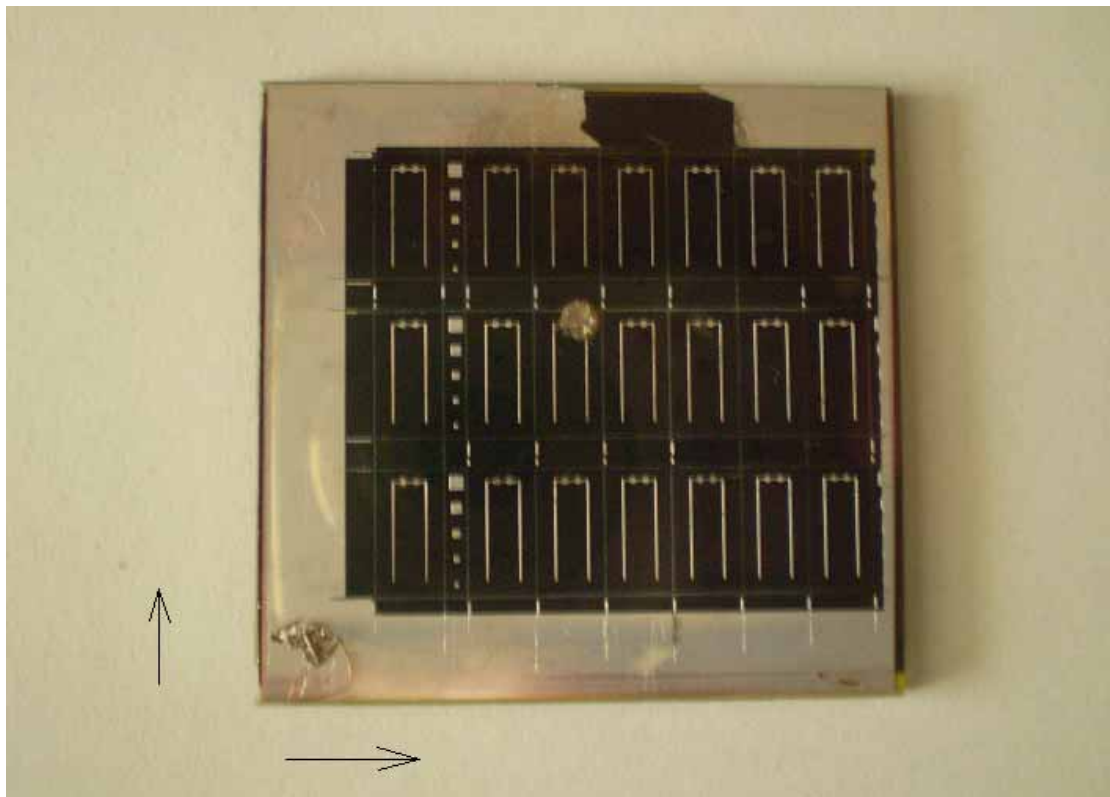
Το αλουμίνιο όπως είναι γνωστό είναι ένα μαλακό, ανθεκτικό και ελαφρύ μέταλλο. Έχει πολύ υψηλή ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Ακόμα η πυκνότητα του είναι περίπου ίση με το 1/3 της πυκνότητας του χάλυβα. Επόμενος είναι αρκετά ελαφρύ. Το αλουμίνιο είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και της θερμότητας. Όμως επέλεχθηκε για την κατασκευή για να προσδώσει στιβαρότητα. Δηλαδή για την αποφυγή μετατοπίσεων από την κατακόρυφη θέση λόγω του βάρους του που είναι αρκετά μεγαλύτερο από τα πλαστικά τμήματα της κατασκευής. Εξ' άλλου τα τμήματα της διάταξης που είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να μην έρχεται σε επαφή με την ηλιακή κυψέλη. Έτσι δεν δημιουργούνται προβλήματα κατά την διάρκεια των ηλεκτρικών μετρήσεων. Τέλος, ένας ακόμα λόγος που οδήγησε στην επιλογή του αλουμινίου είναι ότι κατεργάζεται σχετικά εύκολα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στοιχείο για την συγκεκριμένη εφαρμογή λόγω του μικρού μεγέθους της και της αυξημένης ακρίβειας που απαιτεί. Στη συνέχεια παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις κυριότερες ιδιότητες του αλουμινίου:

Φυσικές ιδιότητες Αλουμινίου	
Φάση	στερεή
Πυκνότητα	2.70 <u>g·cm⁻³</u>
Σημείο τήξης	660.32 ° <u>C</u> ,
Σημείο βρασμού	2519 ° <u>C</u>

28. Πίνακας ιδιοτήτων αλουμινίου

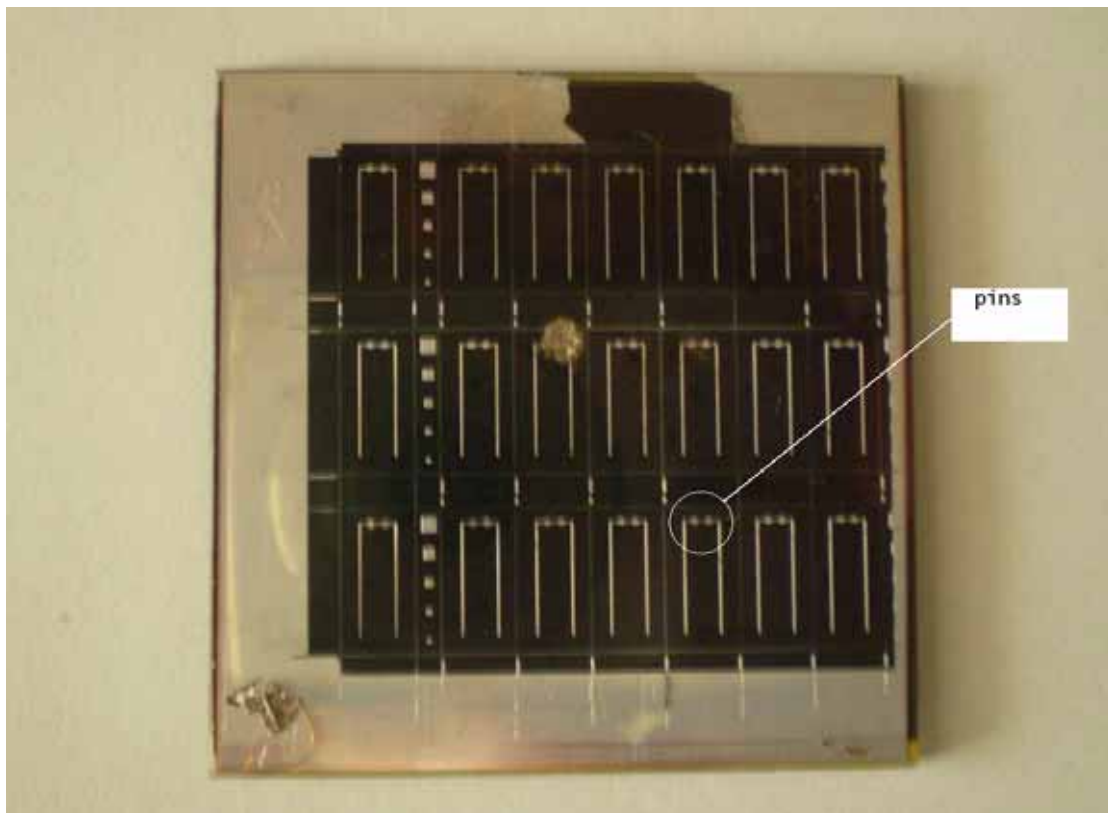
Μετρήσεις - Αποτελέσματα

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, σε ειδική διάταξη μέτρησης ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ηλιακών κυψελών. Το δοκίμιο που μετρήθηκε είναι τεχνολογίας CIGS. Αποτελείται από 3 σειρές και η κάθε σειρά έχει 7 κυψέλες. Για το λόγο αυτό κάθε κυψέλη θα προσδιορίζεται από δυο αριθμούς. Ο πρώτος αντιπροσωπεί τον αριθμό της σειράς που βρίσκεται η κυψέλη (από κάτω προς τα πάνω). Ο δεύτερος υποδηλώνει τη θέση που βρίσκεται μέσα στη σειρά (από αριστερα προς τα δεξιά). Στους τίτλους των διαγραμμάτων που ακολουθούν, ο τρίτος αριθμός είναι ο αριθμός της μέτρησης στην κυψέλη. Στη φωτογραφία που ακολουθεί φαίνεται το δοκίμιο στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις. Ακόμα φαίνεται και το σύστημα με βάση το οποίο γίνεται ο χαρακτηρισμός της κάθε κυψέλης σύμφωνα με τη θέση που έχει στο δοκίμιο.



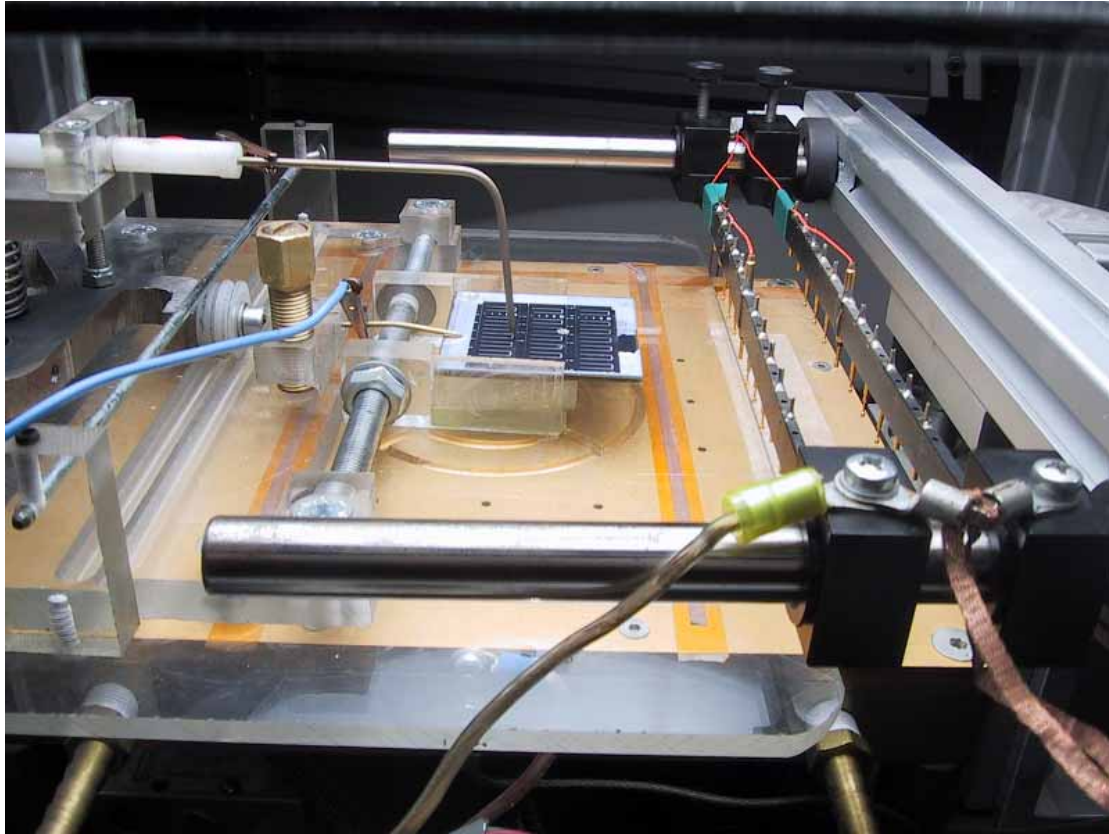
29. Δοκίμιο και σύμβαση ονοματολογίας

Περιμετρικά του δοκιμίου φαίνεται η οπίσθια ωμική επαφή από αλουμίνιο. Πάνω σε αυτή την επαφή εφάπτεται η μια ακίδα της μηχανικής διάταξης. Στις σημειακές ωμικές επαφές από αλουμίνιο κάθε κυψέλης εφάπτεται η άλλη ακίδα της μηχανικής ρυθμιστικής διάταξης. Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνονται μέσα στον κύκλο οι σημειακές επαφές αλουμινίου (=pins) στην κυψέλη με αριθμό (1,5).

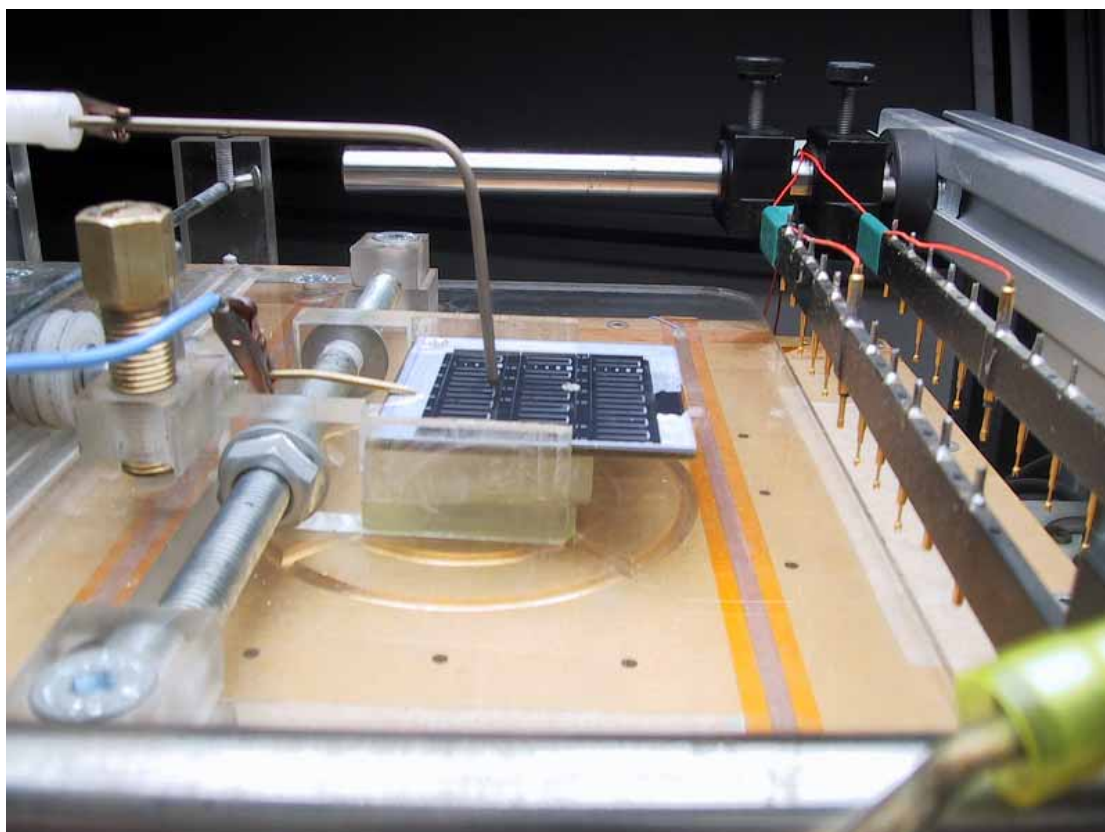


30. Δοκίμιο και ωμικές επαφές κυψελών

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, κατά την διάρκεια των μετρήσεων των κυψελών CIGS.



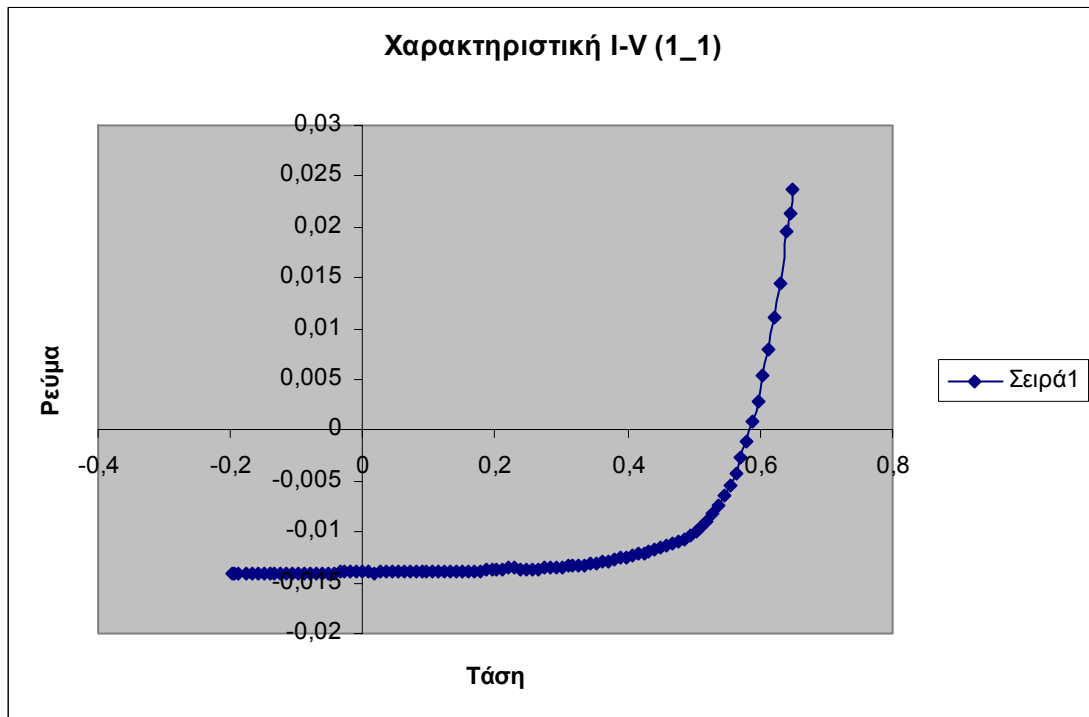
31. Ηλεκτρικές μετρήσεις δοκιμίου CIGS με χρήση της ιδιοκατασκευής



32. Ηλεκτρικές μετρήσεις δοκιμίου CIGS με χρήση της ιδιοκατασκευής

Οι μετρήσεις έγιναν ως εξής: στην αρχή μετρήθηκε η πρώτη σειρά κυψελών. Πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις σε κάθε κυψέλη, για να υπάρχει μια ένδειξη της στατιστικής συμπεριφοράς κάθε κυψέλης. Στην συνέχεια μετρήθηκαν και οι άλλες δυο σειρές κάνοντας μια μέτρηση σε κάθε κυψέλη. Έτσι σχηματίστηκε μια εικόνα της συμπεριφοράς του δοκιμίου σε όλη την επιφάνεια του. Για κάθε κυψέλη της πρώτης σειράς παρουσιάζεται μια ενδεικτική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν στις υπόλοιπες κυψέλες και τέλος παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο (3-D) διάγραμμα με τους βαθμούς απόδοσης σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου.

Η πρώτη μέτρηση έγινε στην κυψέλη με αριθμό (1,1) και η χαρακτηριστική που προέκυψε είναι η εξής:



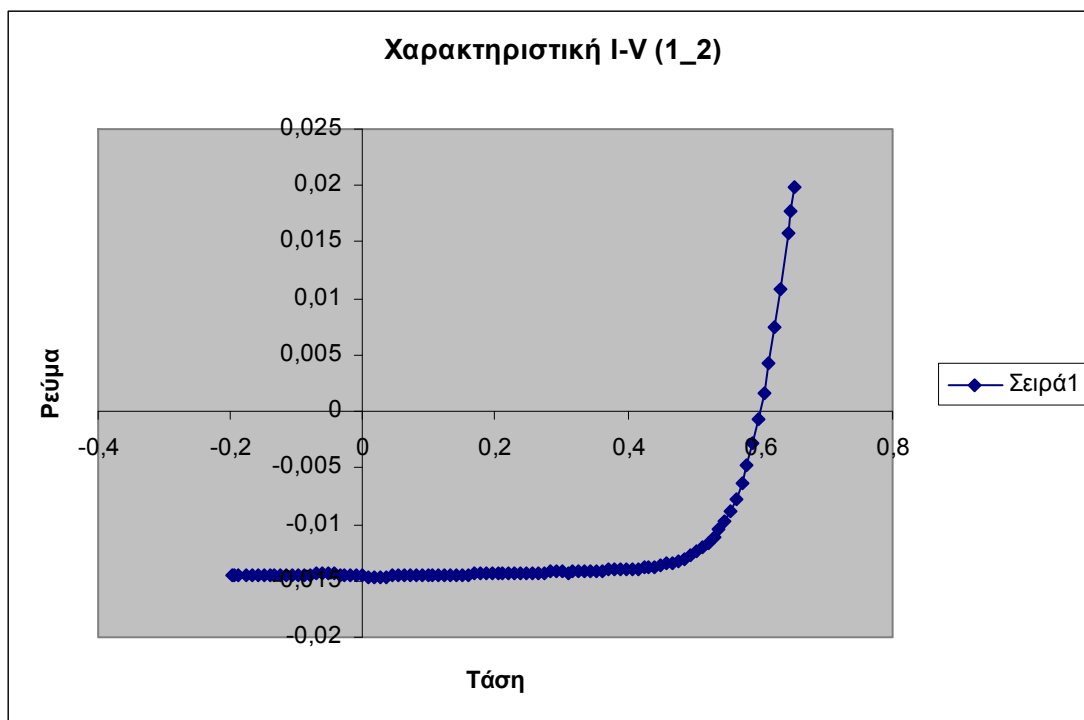
Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κυψέλης που μετρήθηκαν, αναλυτικά είναι:

Area	0.5
Voc	0.5841
Isc	0.0139
Vmp	0.4673
Imp	0.0114
Pmax	0.0052
FF	63.82
Eff	10.41
Rsh	1349.66
Rs	4.36

Ο μέσος όρος των βαθμών απόδοσης που μετρήθηκαν είναι

$$\text{Eff}(1_1) = 10,53$$

Στη συνέχεια μετρήθηκε η κυψέλη (1,2) και η χαρακτηριστική που προέκυψε είναι:

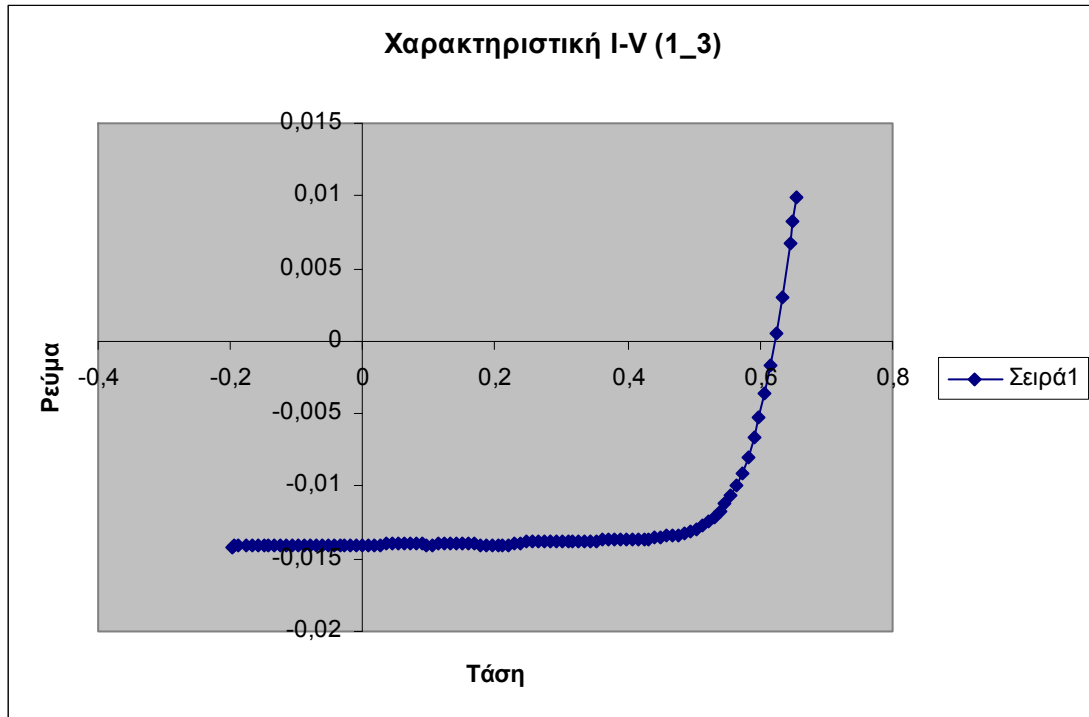


Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν είναι:

Area	0.5
Voc	0.5995
Isc	0.0145
Vmp	0.4856
Imp	0.0131
Pmax	0.0063
FF	72.88
Eff	12.68
Rsh	11801.75
Rs	3.70

Ο μέσος βαθμός απόδοσης είναι $eff(1_2) = 12,73$

Η επόμενη κυψέλη που μετρήθηκε είναι το (1_3) και μια ενδεικτική χαρακτηριστική που προέκυψε είναι:



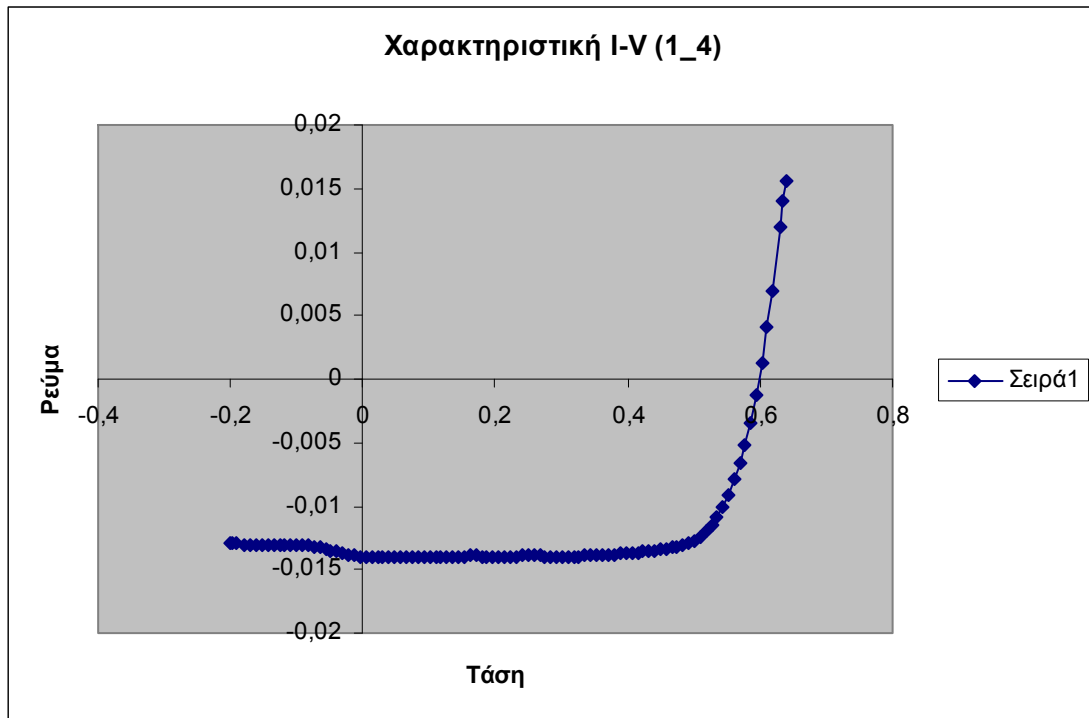
Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κυψέλης είναι

Area	0.5
Voc	0.6212
Isc	0.0141
Vmp	0.5037
Imp	0.0130
Pmax	0.0066
FF	75.11
Eff	13.12
Rsh	3022.42
Rs	3.84

Ο μέσος βαθμός απόδοσης που μετρήθηκε είναι

$$\text{eff}(1_3) = 12,63$$

Έπειτα μετρήθηκε η κυψέλη υπ' αριθμό (1_4) και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

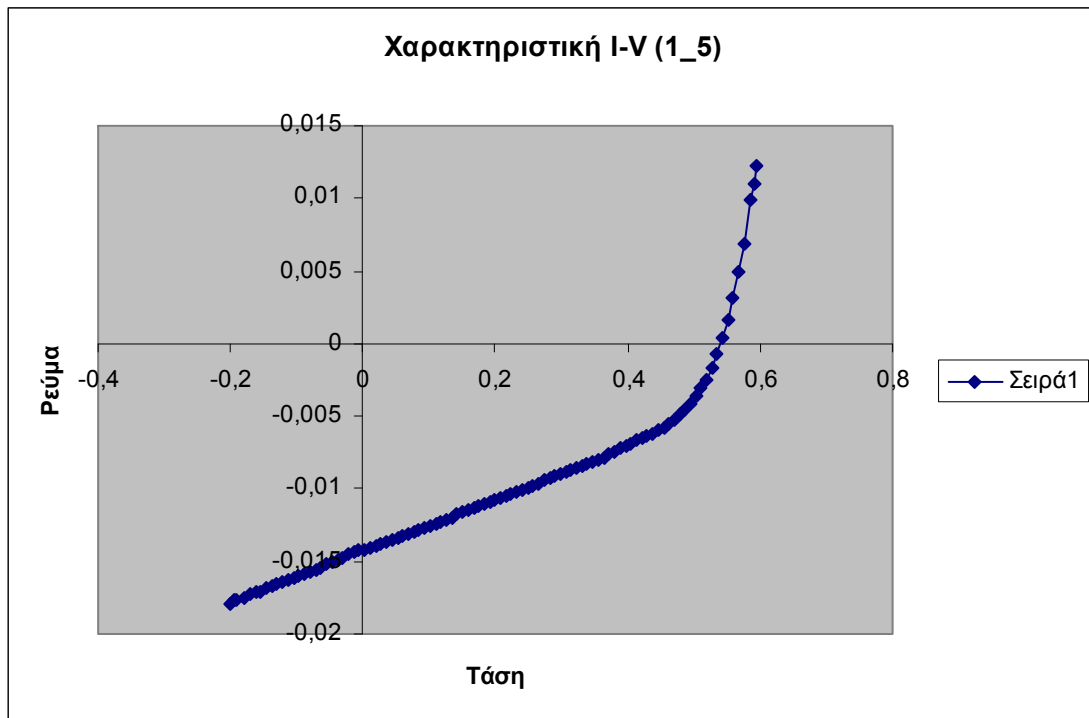


και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν είναι:

Area	0.5
Voc	0.5983
Isc	0.0136
Vmp	0.5011
Imp	0.0127
Pmax	0.0064
FF	77.92
Eff	12.72
Rsh	301.46
Rs	3.57

Ο μέσος βαθμός απόδοσης είναι $eff(1_4) = 12,29$

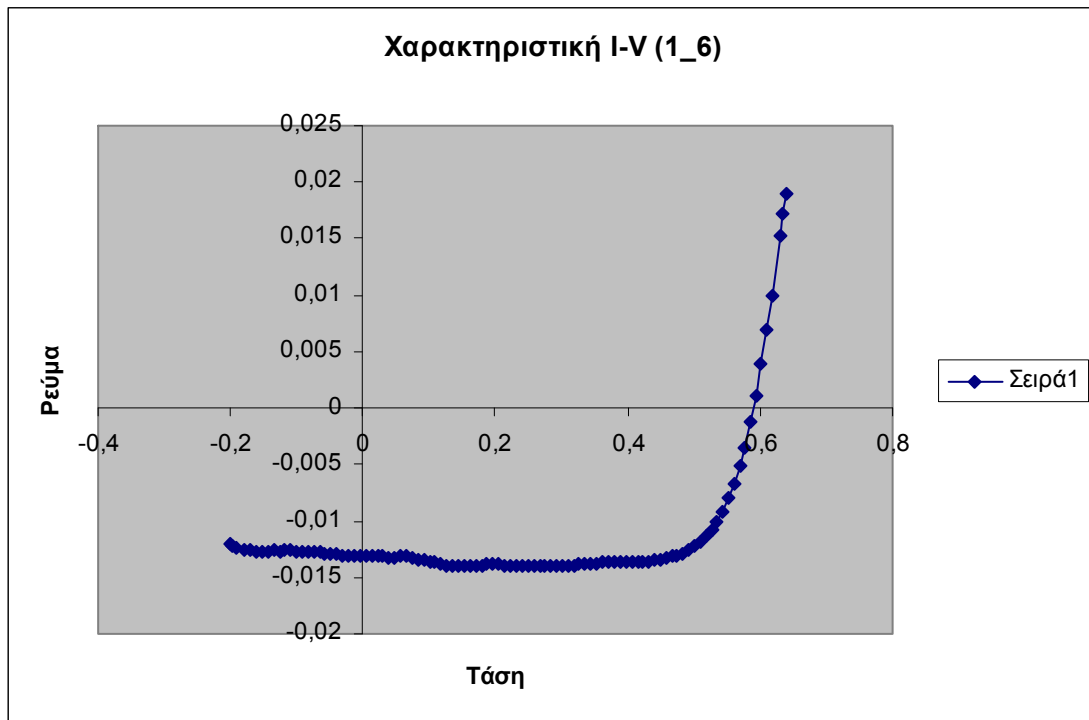
Η κυψέλη υπ' αριθμό (1_5) έδωσε τα εξής αποτελέσματα:



Area	0.5
Voc	0.5376
Isc	0.0143
Vmp	0.3641
Imp	0.0078
Pmax	0.0028
FF	37.12
Eff	5.70
Rsh	56.68
Rs	8.09

Ο μέσος βαθμός απόδοσης που προέκυψαν από τις 5 μετρήσεις είναι $eff(1_5) = 5,61$

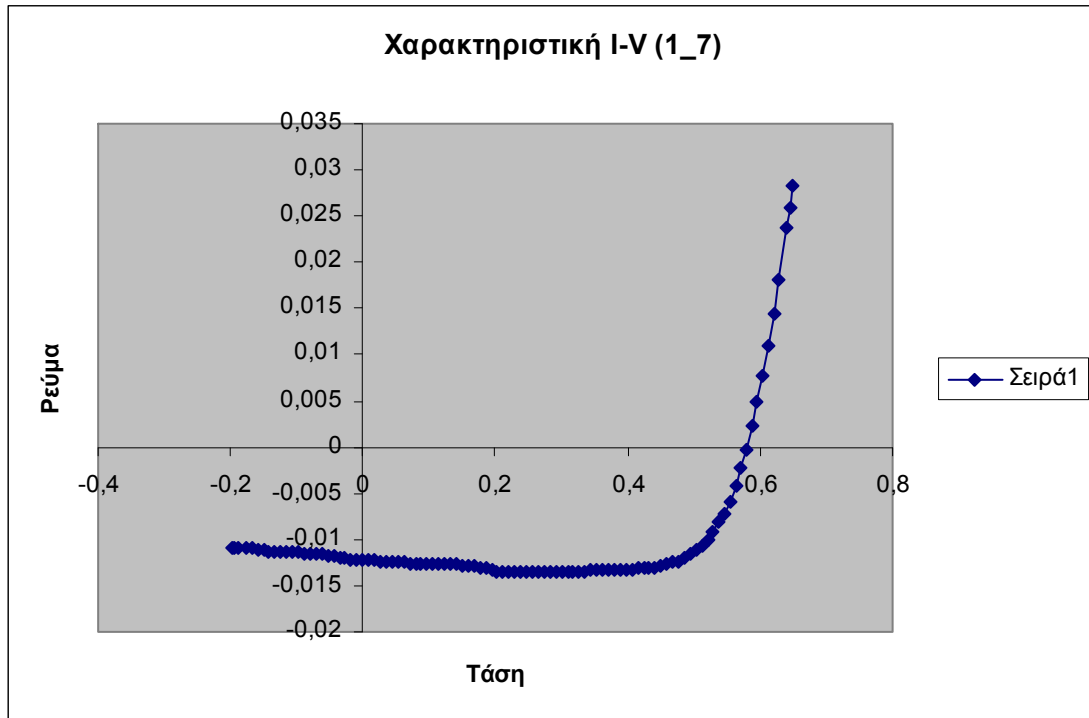
Η μέτρηση στην κυψέλη (1_6) έδωσε τα εξής αποτελέσματα:



Area	0.5
Voc	0.5894
Isc	0.0132
Vmp	0.4924
Imp	0.0126
Pmax	0.0062
FF	80.30
Eff	12.45
Rsh	234.72
Rs	3.396

Ο μέσος βαθμός απόδοσης μετρήθηκε ίσος με
 $eff(1_6) = 12,16$

Τέλος η μέτρηση στην κυψέλη (1_7) έδωσε ενδεικτικά την εξής χαρακτηριστική καμπύλη:



Τα υπόλοιπα στοιχεία της κυψέλης μετρήθηκαν ως εξής:

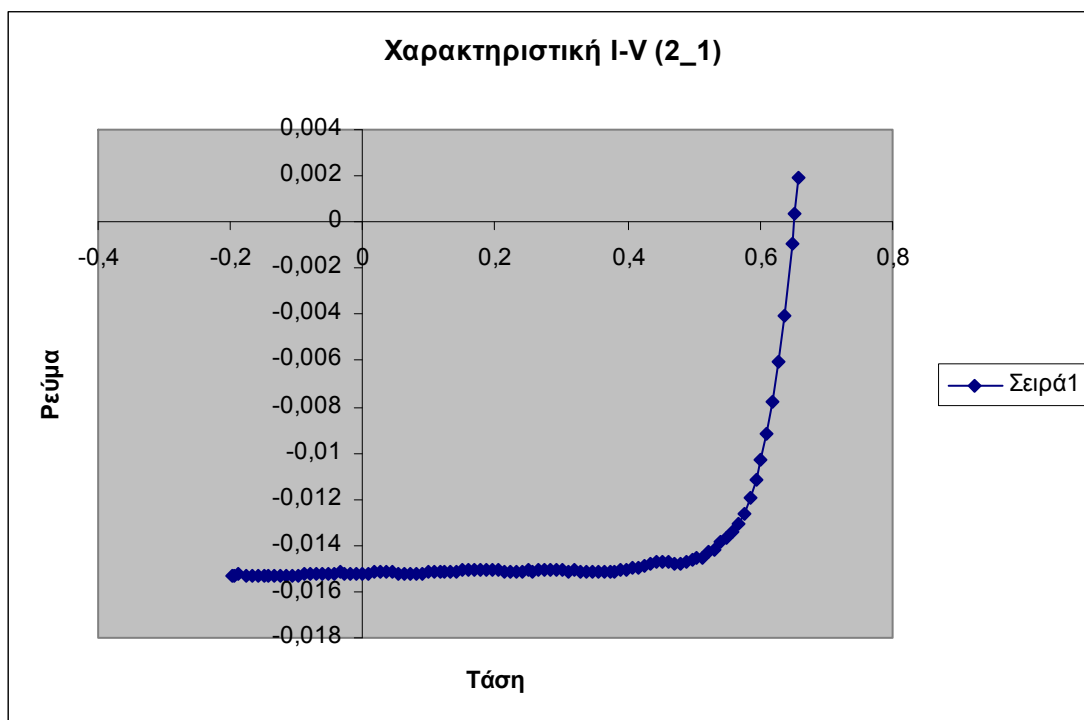
Area	0.5
Voc	0.5801
Isc	0.0121
Vmp	0.4765
Imp	0.0123
Pmax	0.0059
FF	83.89
Eff	11.75
Rsh	170.32
Rs	3.635

Ο μέσος βαθμός απόδοσης προέκυψε ως:

$$\text{Eff}(1_7) = 11,62$$

Σε κάθε κυψέλη στις επόμενες δυο σειρές έγινε από μια μέτρηση. Πριν αναλυθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων, αξίζει να σημειωθεί ότι η κυψέλη υπ' αριθμό (2_3) είναι καμμένη λόγω συγκόλλησης που επιχειρήθηκε να γίνει στην επιφάνεια της.

Έτσι η επόμενη μέτρηση έγινε στην κυψέλη υπ' αριθμό (2_1) και έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

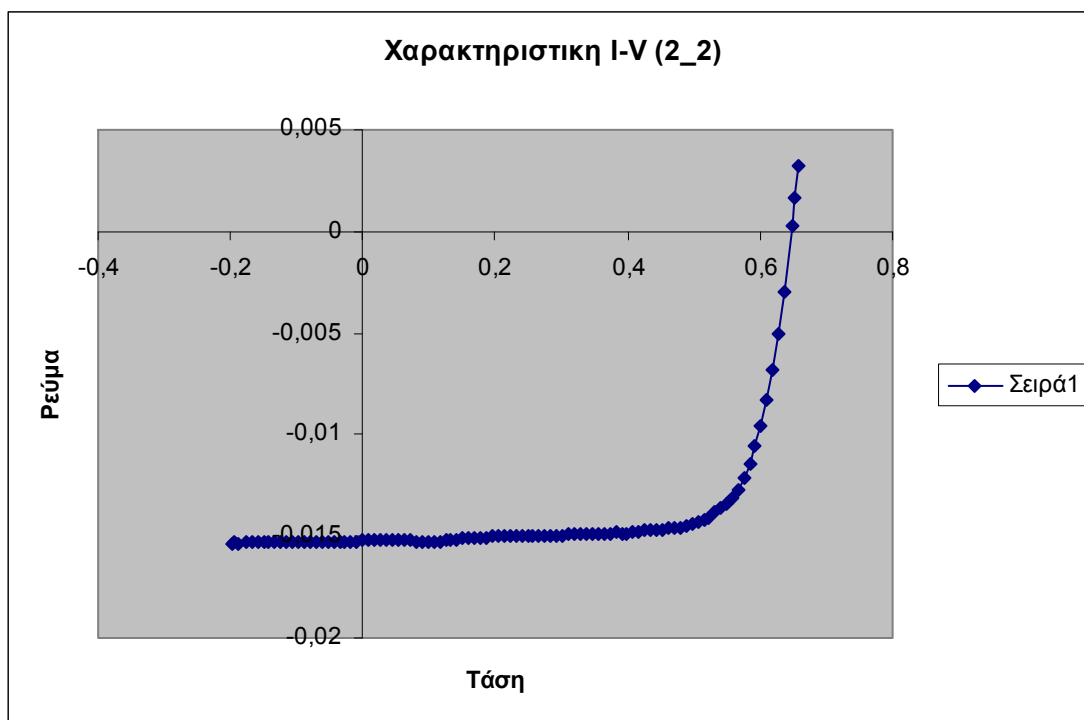


Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κυψέλης μετρήθηκαν ως εξής:

Area	0.5
Voc	0.6509
Isc	0.0152
Vmp	0.5319
Imp	0.0142
Pmax	0.0075
FF	76.04
Eff	15.05
Rsh	1475.38
Rs	3.14

Ο βαθμός απόδοσης που προέκυψε από αυτή την μέτρηση είναι όπως φαίνεται ίσος με $Eff(2_1) = 15.05$

Στη συνέχεια η κυψέλη (2_2) έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

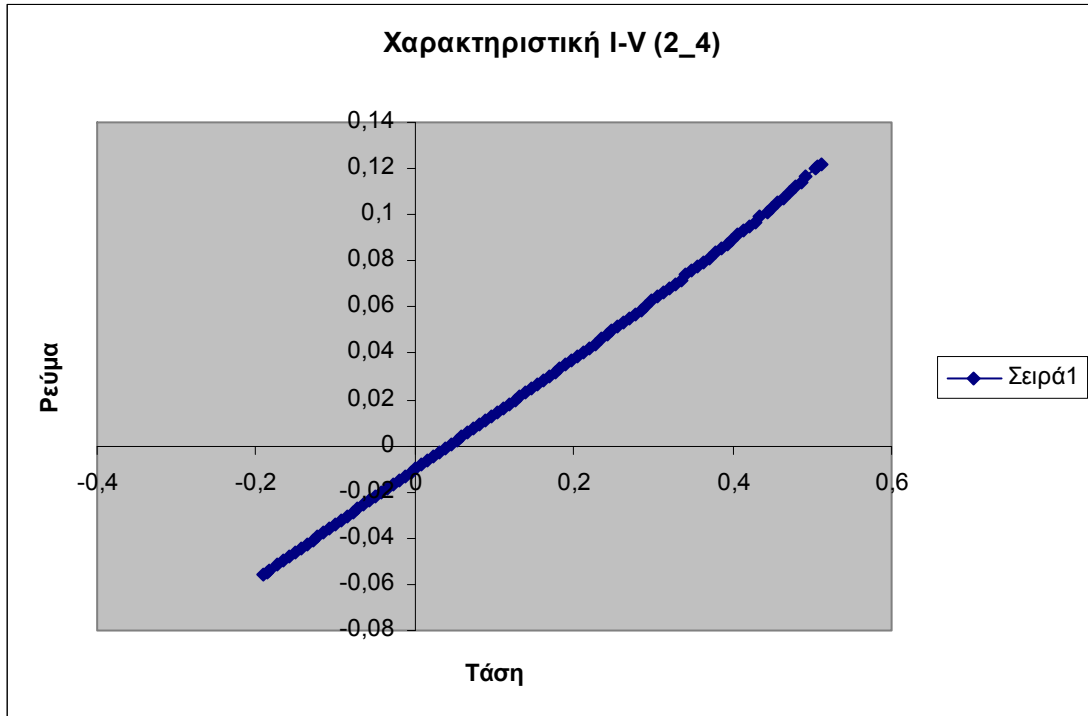


Area	0.5
Voc	0.6463
Isc	0.0152
Vmp	0.5491
Imp	0.0134
Pmax	0.0074
FF	74.95
Eff	14.75
Rsh	1655.32
Rs	3.56

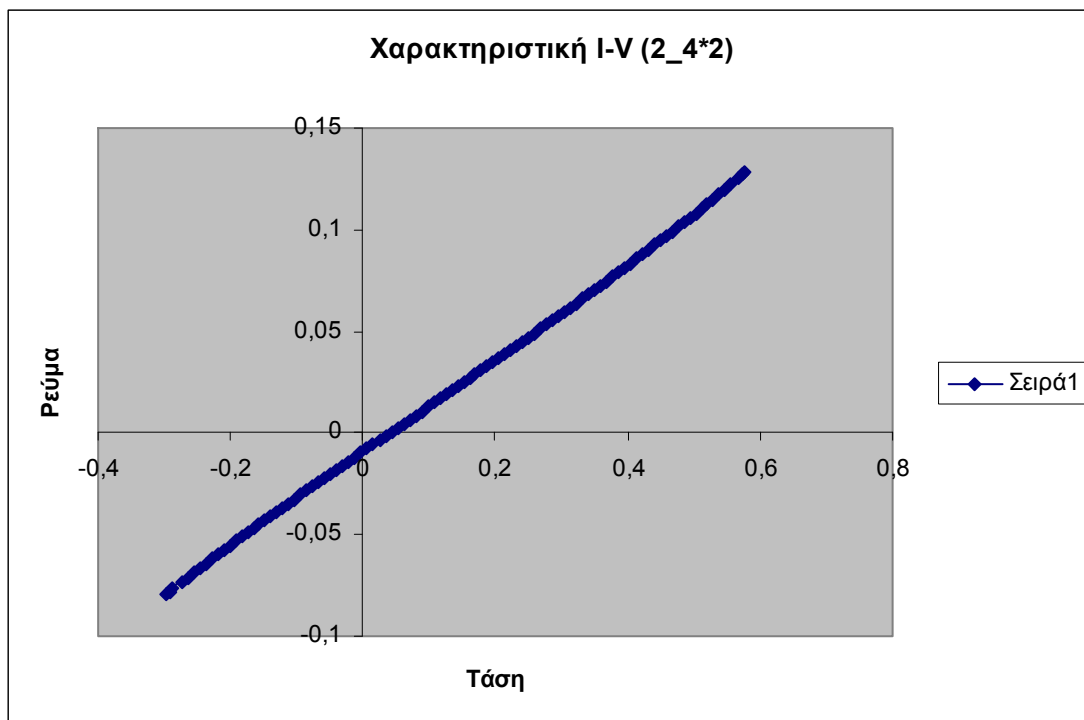
Ο βαθμός απόδοσης είναι $eff(2_2) = 14.75$

Η επόμενη κυψέλη (υπ' αριθμό 2_3) όπως αναφέρθηκε είναι καμμένη λόγω της συγκόλλησης και δεν μετρήθηκε.

Έτσι η επόμενη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε έγινε στην κυψέλη υπ' αριθμό (2_4) και έδωσε τα εξής αποτελέσματα:



Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η κυψέλη αυτή συμπεριφέρεται σαν ωμική αντίσταση. Έτσι πραγματοποιήθηκε και δεύτερη μέτρηση, που έδωσε την εξής χαρακτηριστική:

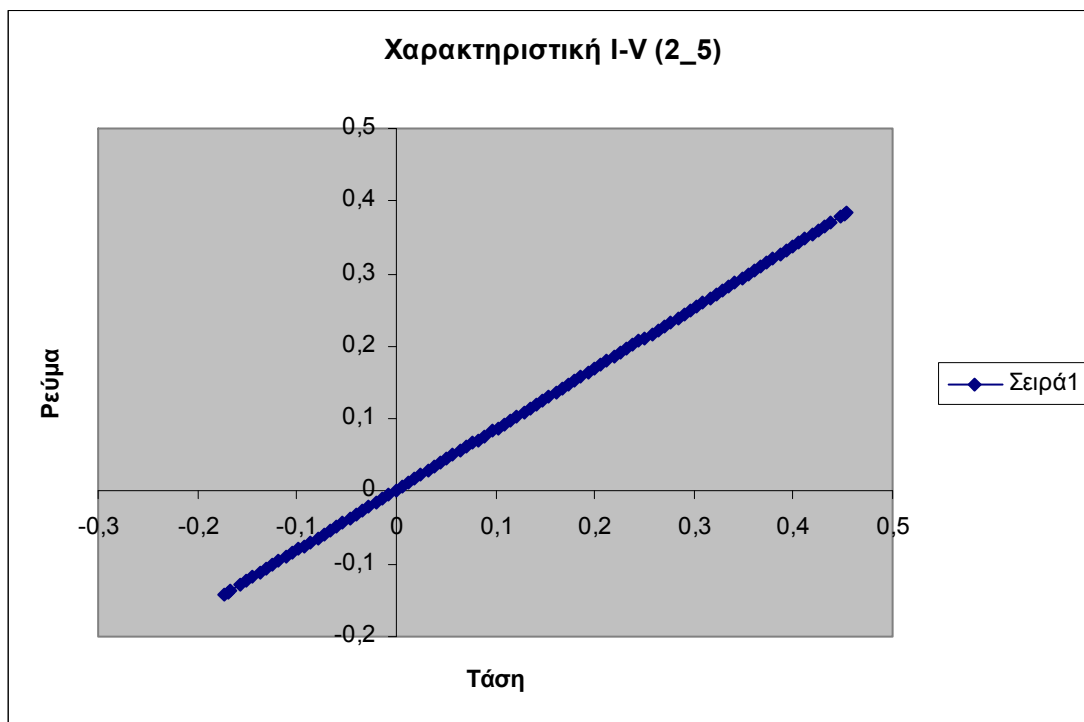


Δηλαδή και στη δεύτερη μέτρηση η κυψέλη δεν είχε συμπεριφορά διόδου αλλά ωμικής αντίστασης.

Ο βαθμός απόδοσης βρέθηκε ίσος με $eff(2_4) = 0,20$
και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μετρήθηκαν ως εξής:

Area	0.5
Voc	0.0437
Isc	0.0103
Vmp	0.0234
Imp	0.0048
Pmax	0.000112
FF	24.96
Eff	0.2244
Rsh	4.19
Rs	4.20

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δυο μετρήσεις στην κυψέλη υπ' αριθμό (2_5) και όπως διαπιστώθηκε και αυτό συμπεριφέρονταν σαν ωμική αντίσταση. Μια ενδεικτική χαρακτηριστική που προέκυψε φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

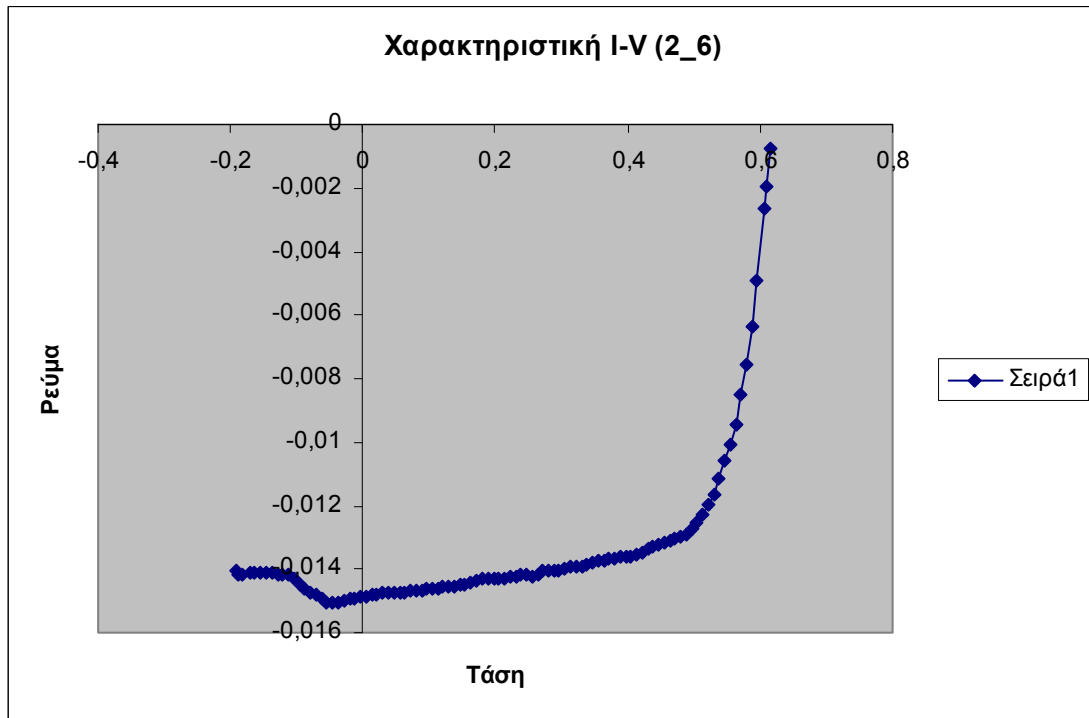


Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά και ο μέσος βαθμός απόδοσης βρέθηκαν ίσα με:

Area	0.5
Voc	-0.0023
Isc	-0.0019
Vmp	-0.0006
Imp	-0.0014
Pmax	8.8867E-007
FF	19.73
Eff	0.0018
Rsh	1.19
Rs	1.20

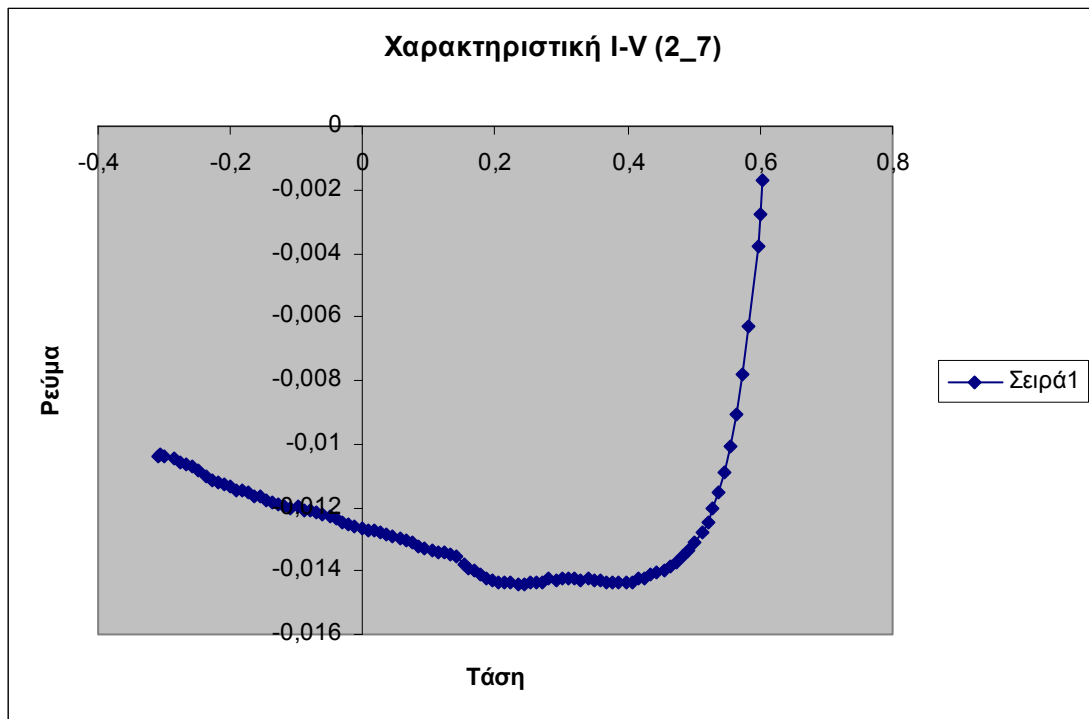
$$\text{Eff}(2_5) = 0,002$$

Για την κυψέλη (2_6) μετρήθηκαν:



Area	0.5
Voc	0.6180
Isc	0.0146
Vmp	0.5047
Imp	0.0125
Pmax	0.0063
FF	70.33
Eff	12.65
Rsh	1461.52
Rs	4.17

Η τελευταία κυψέλη της δεύτερης σειράς (2_7) έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

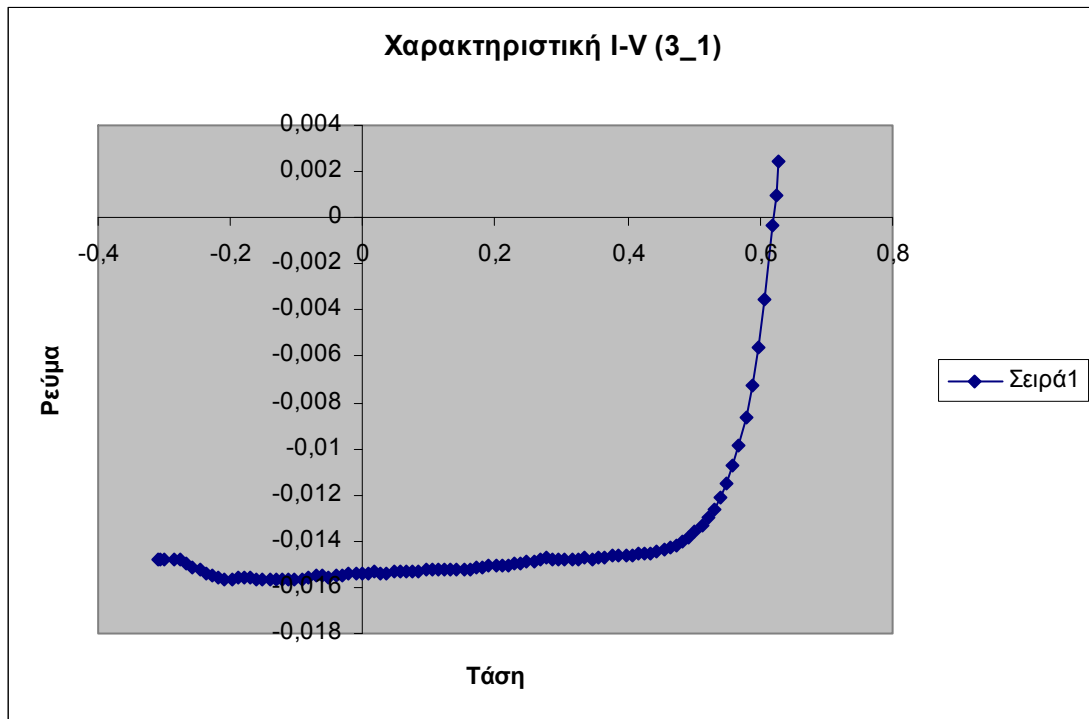


Ακόμα μετρήθηκαν:

Area	0.5
Voc	0.6124
Isc	0.0127
Vmp	0.5021
Imp	0.0131
Pmax	0.0066
FF	84.76
Eff	13.18
Rsh	146.10
Rs	4.36

Οι μετρήσεις στην τρίτη σειρά έδωσαν τα εξής αποτελέσματα:

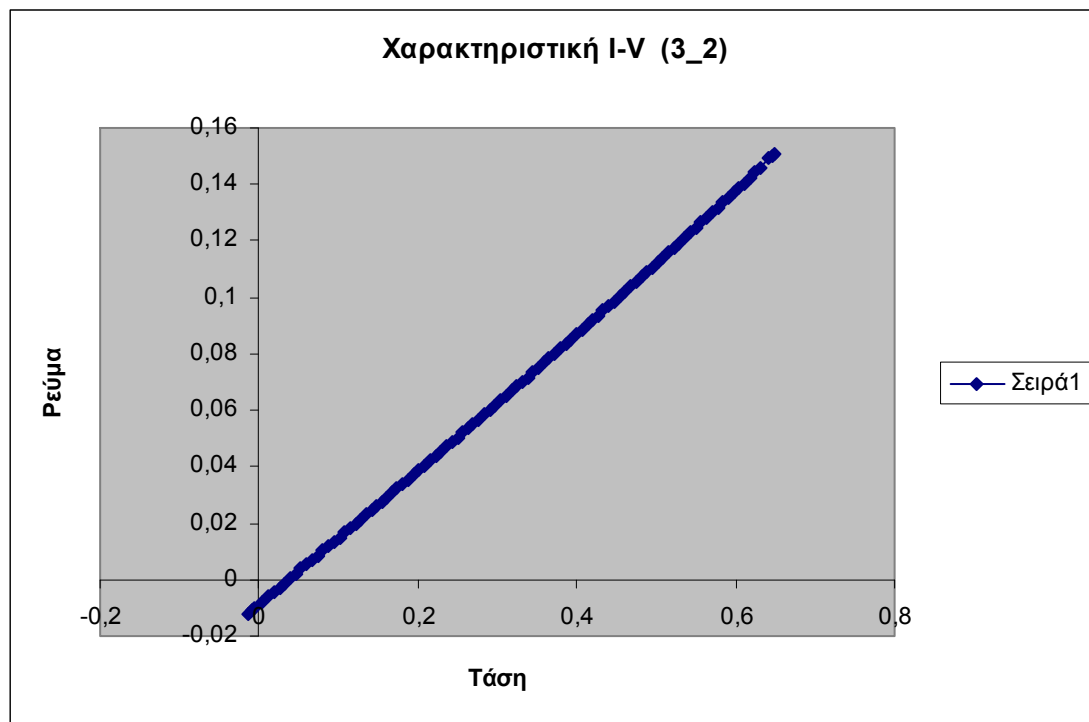
Κυψέλη (3_1):



Area	0.5
Voc	0.6198
Isc	0.0154
Vmp	0.5117
Imp	0.0134
Pmax	0.0068
FF	71.47
Eff	13.66
Rsh	646.94
Rs	3.88

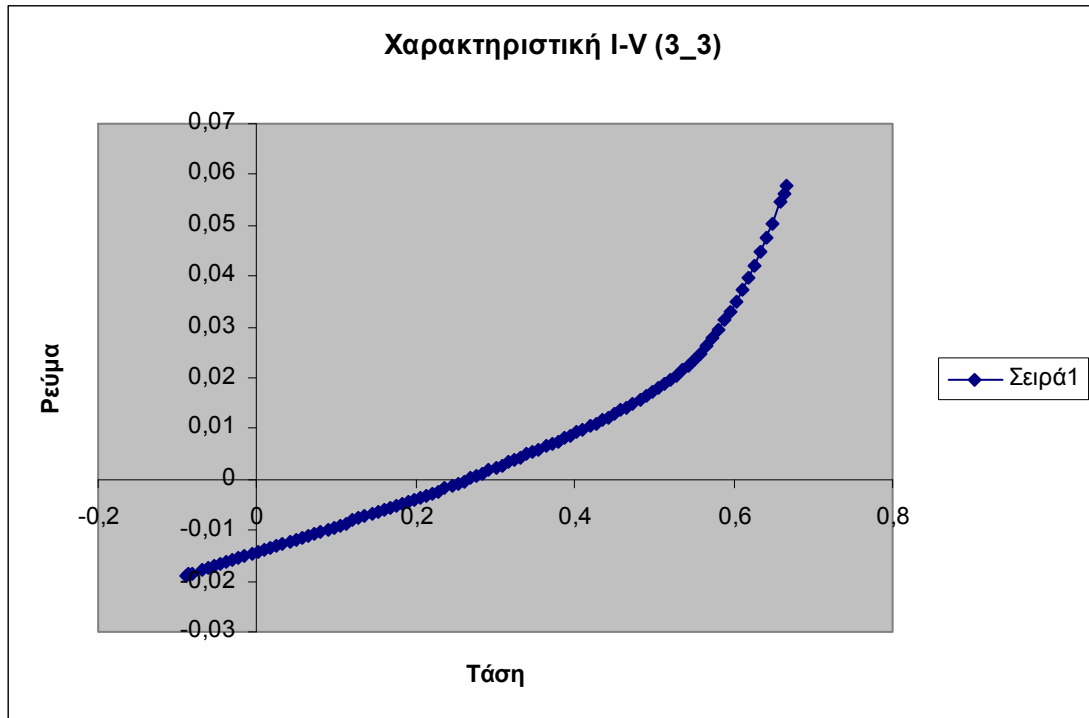
Κυψέλη (3_2):

Area	0.5
Voc	0.0374
Isc	0.0089
Vmp	0.0185
Imp	0.0045
Pmax	8.3339E-005
FF	25.15
Eff	0.1667
Rsh	4.23
Rs	4.14



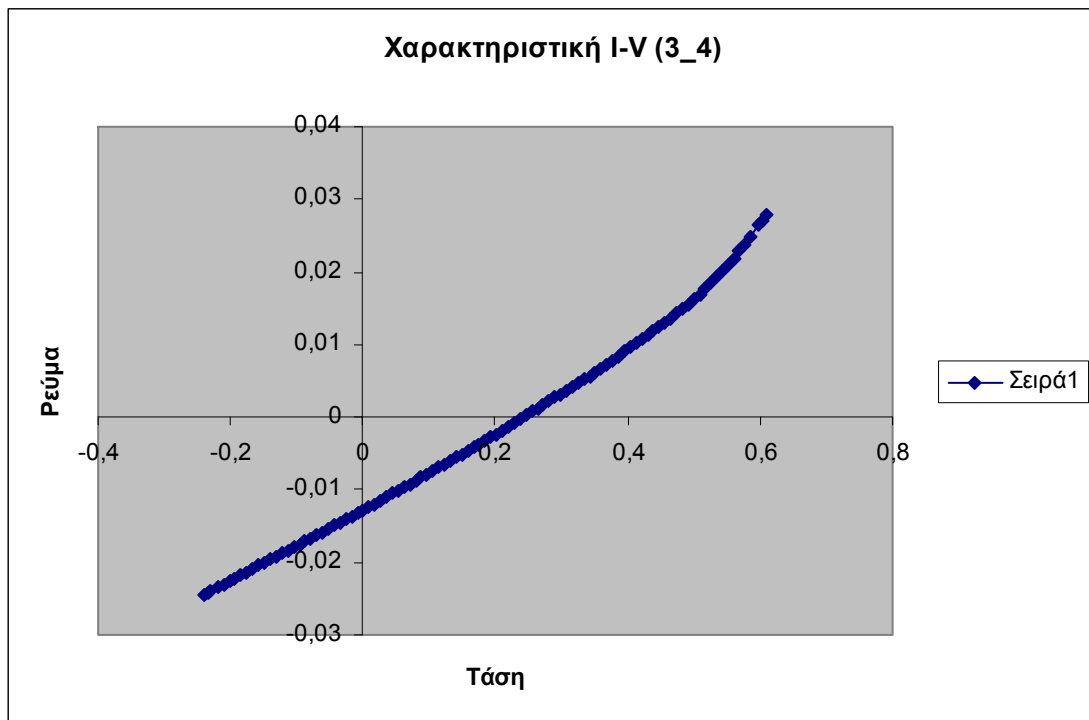
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα και αυτή η κυψέλη παρουσιάζει ωμική συμπεριφορά.

Κυψέλη (3_3):



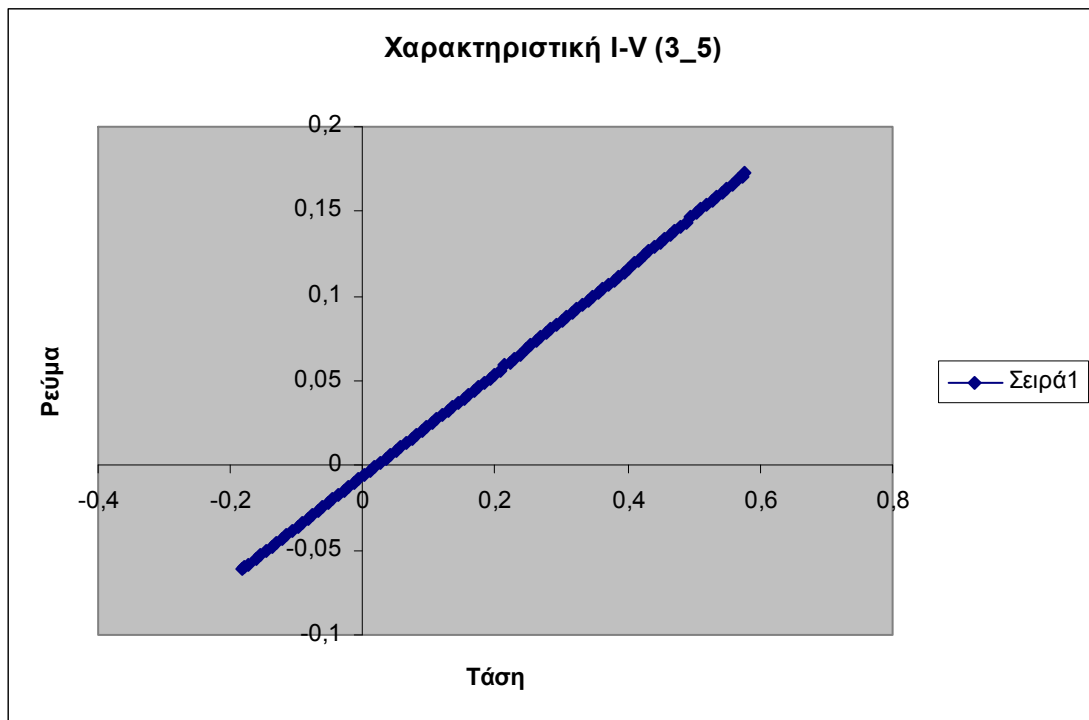
Area	0.5
Voc	0.2647
Isc	0.0143
Vmp	0.1359
Imp	0.0073
Pmax	0.0010
FF	26.15
Eff	1.98
Rsh	19.53
Rs	15.74

Κυψέλη (3_4):



Area	0.5
Voc	0.2425
Isc	0.0127
Vmp	0.1233
Imp	0.0066
Pmax	0.0008
FF	25.94
Eff	1.59
Rsh	19.94
Rs	17.62

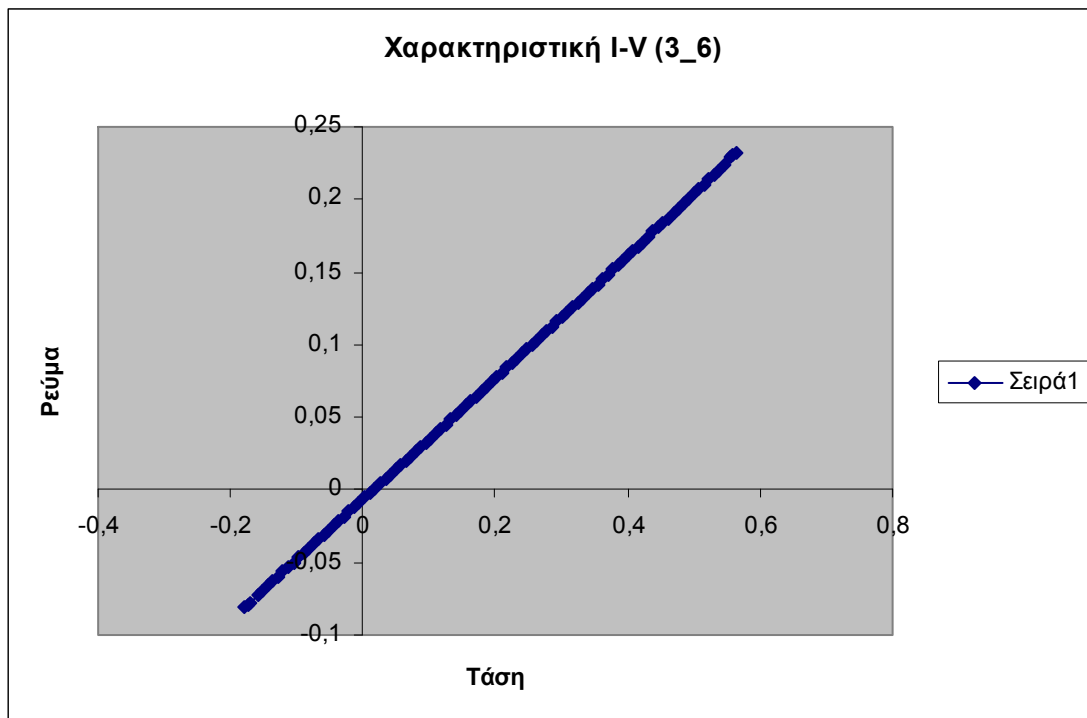
Κυψέλη (3_5):



Area	0.5
Voc	0.0219
Isc	0.0065
Vmp	0.0107
Imp	0.0034
Pmax	3.624E-005
FF	25.53
Eff	0.0725
Rsh	3.31
Rs	3.29

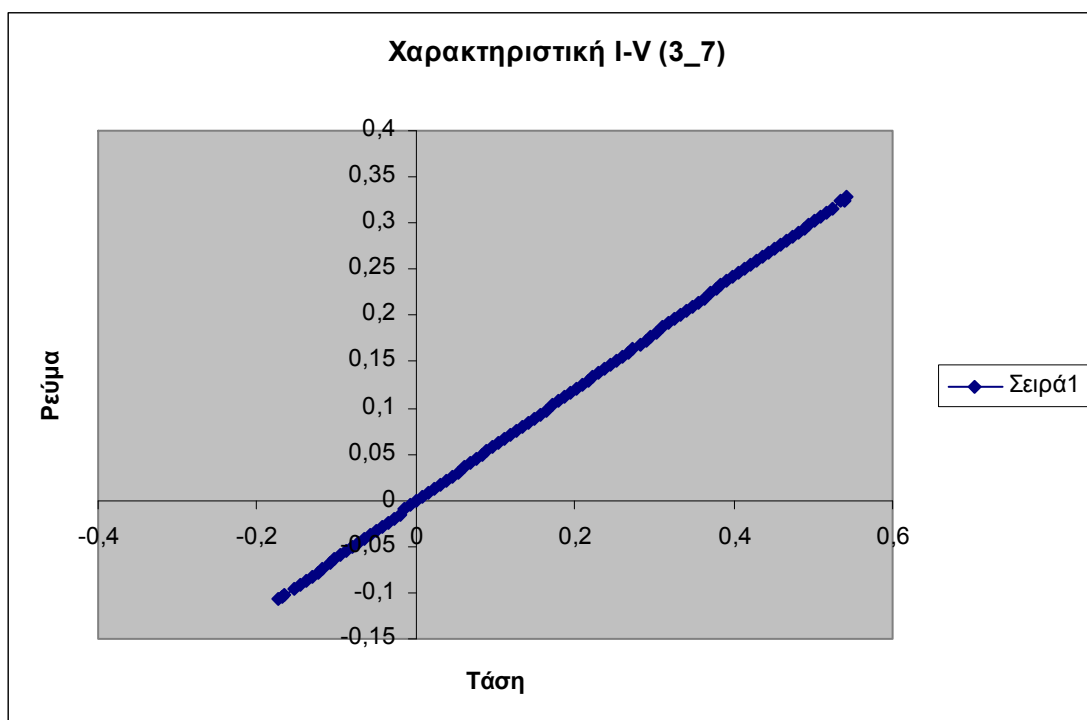
Κυψέλη (3_6):

Area	0.5
Voc	0.0152
Isc	0.0065
Vmp	0.0103
Imp	0.0021
Pmax	2.2E-005
FF	21.90
Eff	0.0446
Rsh	2.41
Rs	2.40

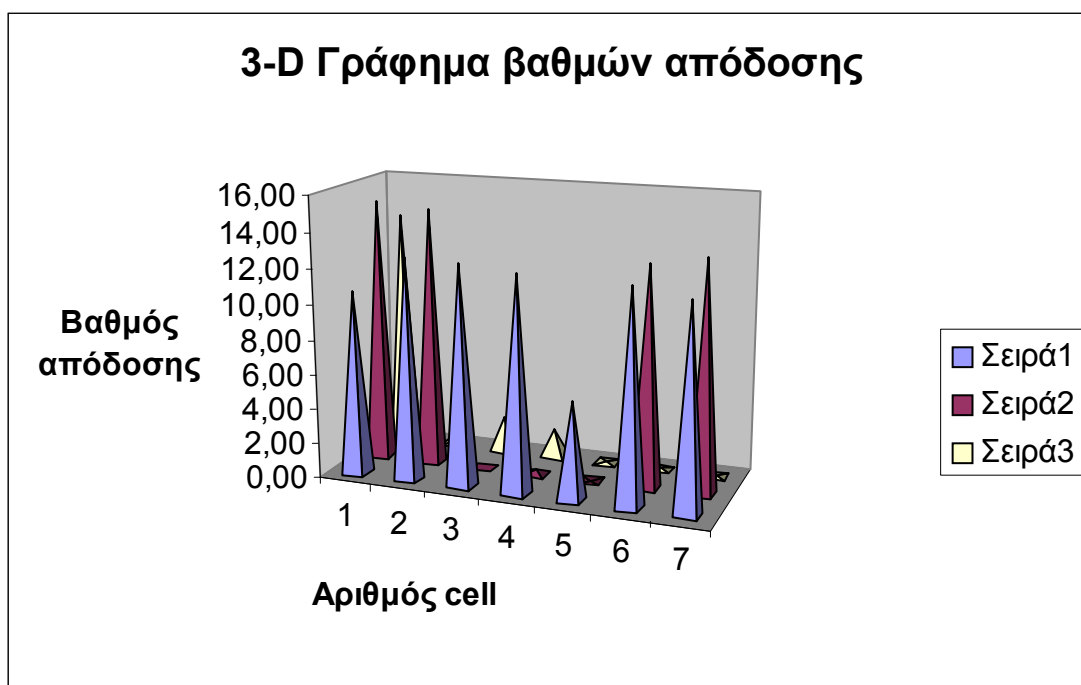


Κυψέλη (3_7):

Area	0.5
Voc	0.0033
Isc	0.0021
Vmp	0.0017
Imp	0.0009
Pmax	1.656E-006
FF	24.52
Eff	0.0033
Rsh	1.64
Rs	1.62

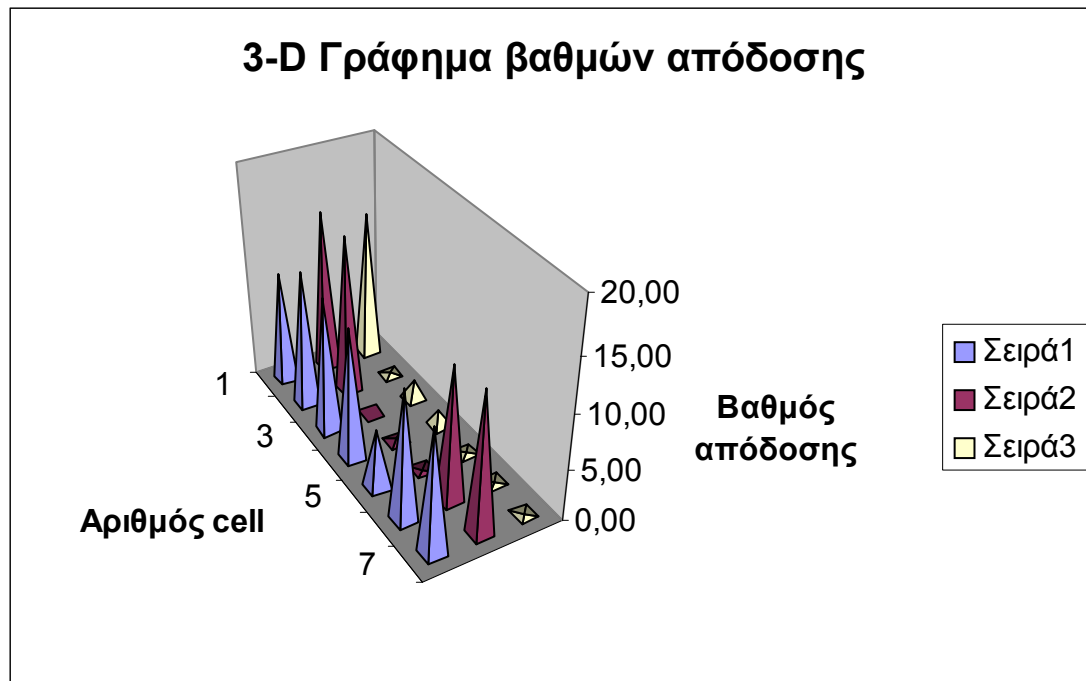


Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο διάγραμμα. Εμφανίζονται οι βαθμοί απόδοσης των διάφορων κυψελών σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου. Η πρώτη σειρά παρουσιάζει σχετική ομοιομορφία με τους βαθμούς απόδοσης (εκτός από το 1_5) να βρίσκονται πάνω από το 10%. Στη δεύτερη σειρά βρίσκεται η καμμένη κυψέλη. Η κυψέλη αυτή φαίνεται να έχει επηρεάσει και τις γειτονικές κυψέλες (2_3, 2_4, 2_5), οι οποίες συμπεριφέρονται σαν ωμικές αντιστάσεις. Η κυψέλη υπ' αριθμό 2_3 κάηκε σε μια προσπάθεια συγκόλλησης ενός καλωδίου πάνω της. Σκοπός της συγκόλλησης ήταν ακριβώς η μέτρηση της χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης. Έτσι μόνο οι κυψέλες που βρίσκονται στα άκρα (2_1, 2_2 και 2_6, 2_7) συμπεριφέρονται σαν ημιαγωγοί. Τέλος στην τρίτη σειρά μόνο η πρώτη κυψέλη συμπεριφέρεται σαν ημιαγωγός. Τα υπόλοιπα φαίνεται να έχουν επηρεαστεί από την καμμένη κυψέλη της δεύτερης σειράς. Έτσι παρουσιάζουν ωμική συμπεριφορά με σχεδόν αμελητέους βαθμούς απόδοσης.



33. Τρισδιάστατο γράφημα βαθμών απόδοσης στην επιφάνεια του δοκιμίου

και στη συνέχεια παρουσιάζεται από μια άλλη οπτική:

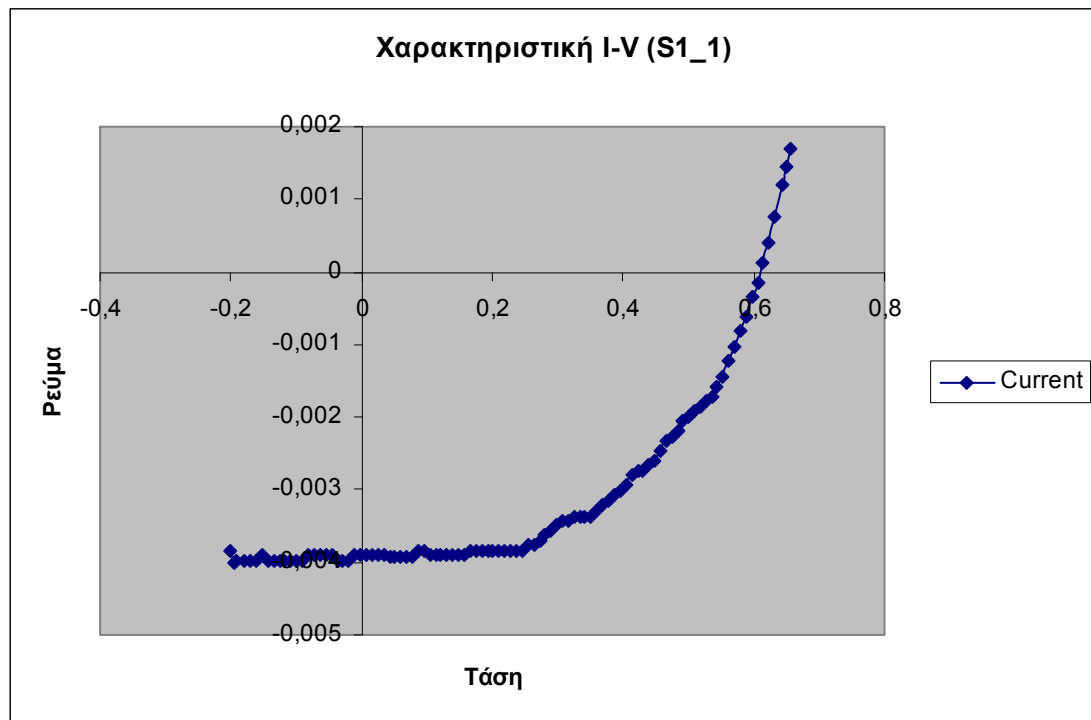


34. Τρισδιάστατο γράφημα βαθμών απόδοσης στην επιφάνεια του δοκιμίου

Ακόμα υπολογίστηκε ο μέσος όρος των βαθμών απόδοσης των ηλιακών κυψελών που λειτουργούν κανονικά. Οι κυψέλες που ελήφθησαν υπόψη στον υπολογισμό ήταν όλες της πρώτης σειράς εκτός από την (1,5), οι κυψέλες που βρίσκονται στα άκρα της δεύτερης σειράς, (2,1)(2,2) και (2,6)(2,7) και η πρώτη της τρίτης σειράς (3,1). Έτσι ο μέσος όρος που προέκυψε βρέθηκε ίσος με 12,84. Σε κάθε περίπτωση αυτός ο βαθμός απόδοσης είναι αρκετά υψηλότερος σε σχέση με αυτόν που προκύπτει από μια ηλιακή κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου. Το γεγονός αυτό προκύπτει από την σύγκριση που έγινε σε κυψέλες των δυο τεχνολογιών.

Τέλος μετρήθηκαν οι ακροδέκτες που βρίσκονται ανάμεσα στην κυψέλη (1_1) και στην κυψέλη (1_2). Σκοπός ήταν να εξεταστεί αν αντιπροσωπεύουν μια συγκεκριμένη συνδεσμολογία των κυψελών μεταξύ τους (για παράδειγμα ο πρώτος ακροδέκτης αντιπροσωπεύει τις δυο πρώτες κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά, ο δεύτερος τις τρεις πρώτες μαζί κ.ο.κ.). Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν επιβεβαιώθηκε από τις μετρήσεις, οι οποίες δεν έδειξαν κάποια συσχέτιση μεταξύ τους. Έτσι έγιναν πέντε μετρήσεις στον πρώτο ακροδέκτη (τον μικρότερο). Στη συνέχεια από μια στους δυο τελευταίους (τους μεγαλύτερους). Για τον πρώτο ακροδέκτη μια ενδεικτική χαρακτηριστική που προέκυψε είναι η:

Ακροδέκτης S1_1

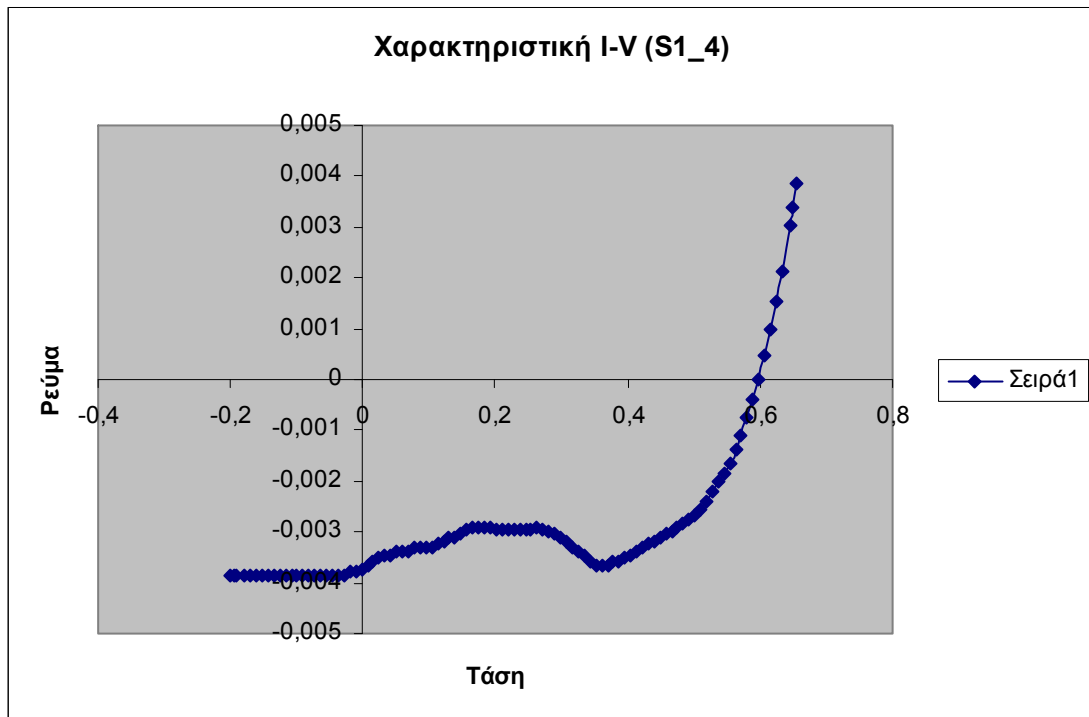


και τα υπόλοιπα δεδομένα μετρήθηκαν ως εξής:

Area	0.5
Voc	0.6767
Isc	0.0039
Vmp	0.3866
Imp	0.0031
Pmax	0.0012
FF	44.91
Eff	2.38
Rsh	3529.81
Rs	147.39

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους άλλους δυο ακροδέκτες:

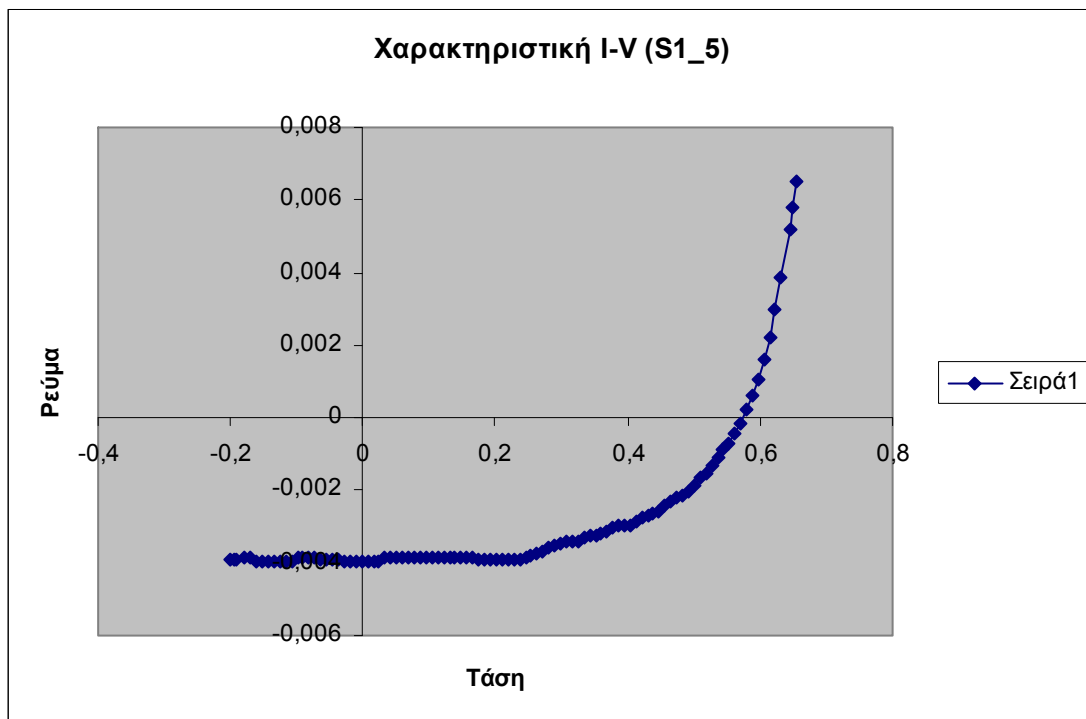
Ακροδέκτης S1_4



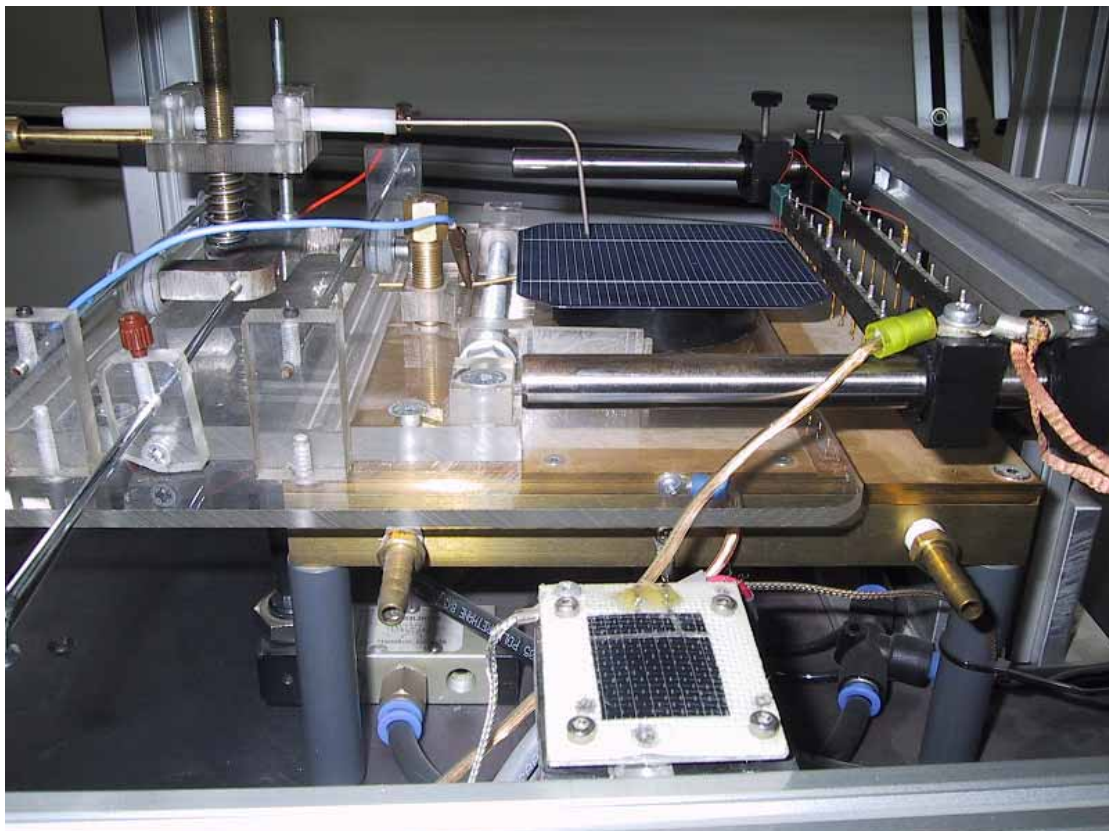
Area	2.5
Voc	0.5334
Isc	0.0035
Vmp	0.4223
Imp	0.0033
Pmax	0.0014
FF	74.13
Eff	0.5598
Rsh	365.52
Rs	109.76

Ακροδέκτης S1_5

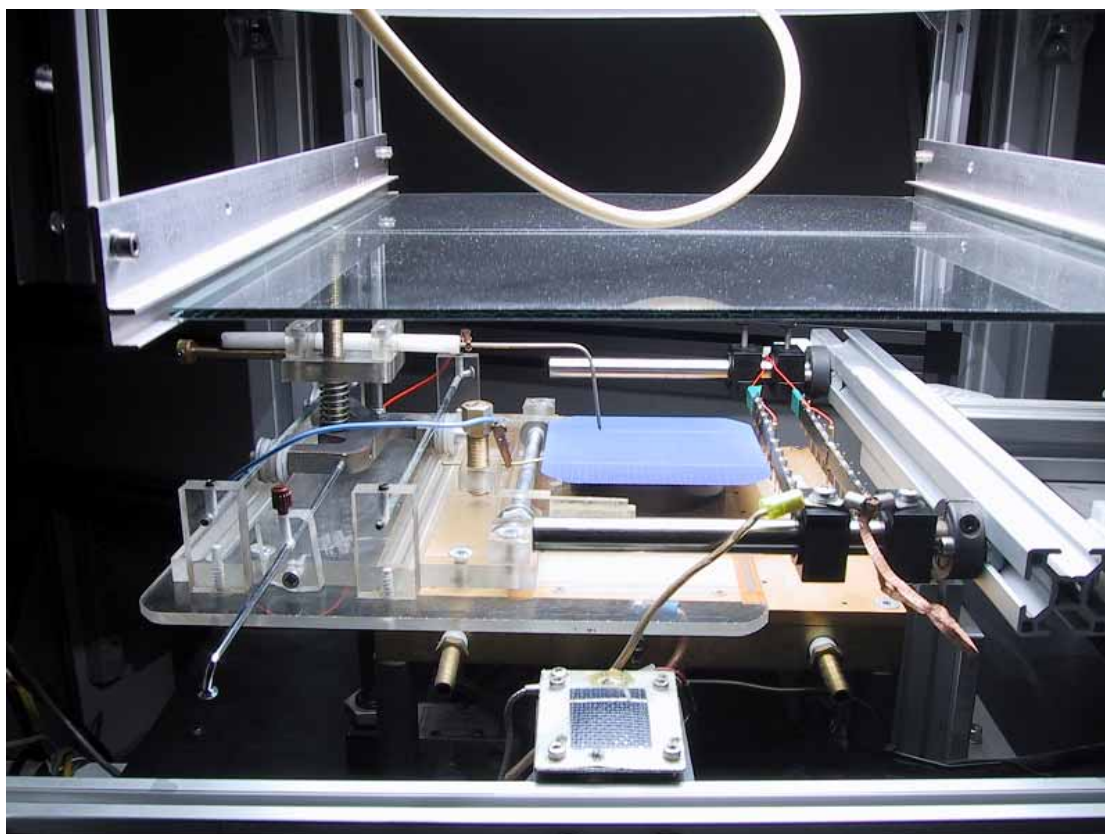
Area	3
Voc	0.5564
Isc	0.0042
Vmp	0.4047
Imp	0.0031
Pmax	0.0012
FF	56.08
Eff	0.4006
Rsh	9197.84
Rs	113.29



Τέλος με τη ιδιοκατασκευή αυτή μετρήθηκε και μια κλασσική κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου. Η κυψέλη αυτή μετρήθηκε και με ειδική διάταξη που υπάρχει στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Έγινε έτσι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για τις δύο κυψέλες. Η μέτρηση που έγινε με την ιδιοκατασκευή δεν έδωσε αξιολογήσιμα αποτελέσματα (συγκεκριμένα, προέκυψαν τυχαία σημεία σε ακαθόριστες μεταξύ τους θέσεις). Αυτό οφείλεται σε δυο λόγους. Κατά πρώτο, στο ότι η μέτρηση γίνεται από ένα και μοναδικό σημείο. Αποτέλεσμα ήταν να δημιουργείται πολύ μεγάλη αντίσταση με άμεσες επιπτώσεις στις μετρήσεις. Ακόμα για την μέτρηση αυτής της κυψέλης χρειάζεται να υπάρχει μεγάλη πίεση μεταξύ των ακροδεκτών της μηχανικής διάταξης και των αντίστοιχων της κυψέλης. Κάτι τέτοιο δεν εξασφαλίζεται με την συγκεκριμένη ιδιοκατασκευή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διάταξη και ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις:



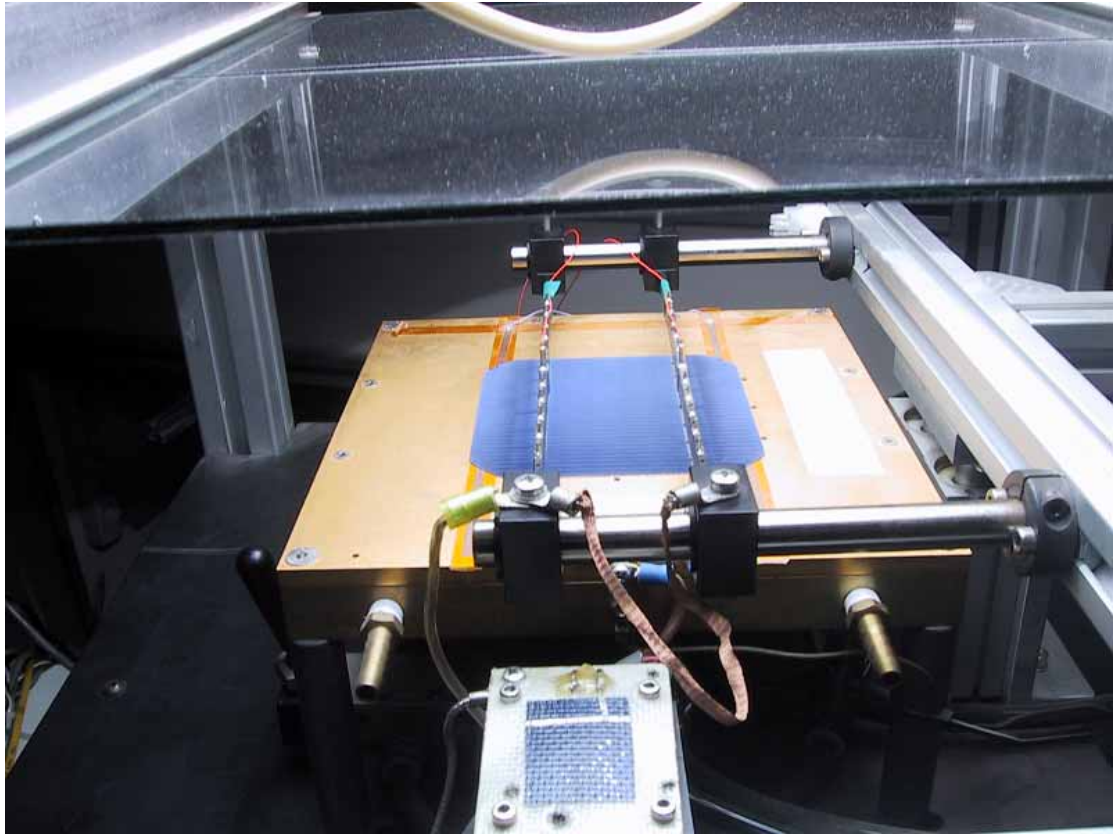
35. Ηλεκτρικές μετρήσεις κυψέλης πυριτίου με χρήση της ιδιοκατασκευής



36. Ηλεκτρικές μετρήσεις κυψέλης πυριτίου με χρήση της ιδιοκατασκευής

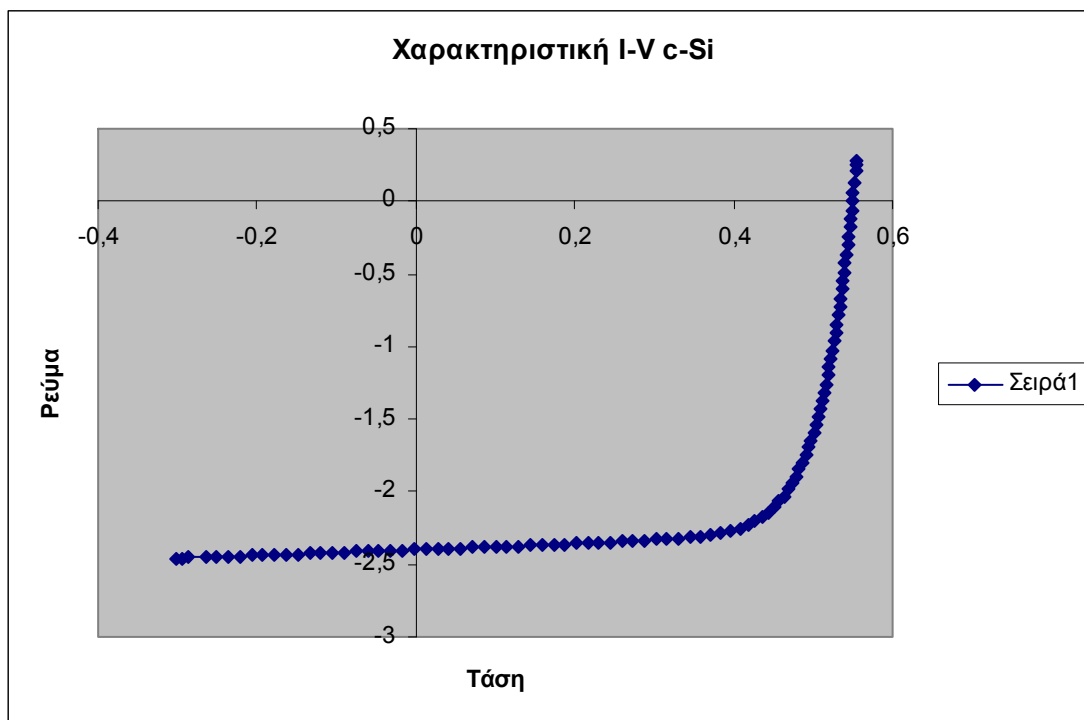
Στην κυψέλη αυτή έγιναν πέντε μετρήσεις με τη βοήθεια της διάταξης που υπάρχει στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η αντίστοιχη διάταξη για μέτρηση I-V του Κ.Α.Π.Ε. κατά την διάρκεια των μετρήσεων:



35. Ηλεκτρικές μετρήσεις κυψέλης πυριτίου με χρήση διάταξης του Κ.Α.Π.Ε.

Μια ενδεικτική χαρακτηριστική καμπύλη που προέκυψε φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Με τα λοιπά χαρακτηριστικά να έχουν ως εξής:

Area	100
Voc	0.55
Isc	2.40
Vmp	0.45
Imp	2.11
Pmax	0.95
FF	72.04
Eff	9.50
Rsh	5.18
Rs	0.02

Ο μέσος βαθμός απόδοσης από τις πέντε μετρήσεις βρέθηκε ίσος με:

$$\text{Eff}(c\text{-Si}) = 9,56$$

Συμπεράσματα

Η μηχανική ρυθμιστική διάταξη φαίνεται ότι ανταποκρίνεται πλήρως στις ανάγκες τις οποίες προορίστηκε να εξυπηρετήσει. Δηλαδή μπορεί να παρέχει ηλεκτρικές μετρήσεις άμεσα, με ακρίβεια και χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στην λειτουργικότητα των ηλιακών κυψελών. Ακόμα μπορεί να πραγματοποιεί χαρτογράφηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών στο δοκίμιο τεχνολογίας CIGS. Το γεγονός αυτό εξυπηρετεί την μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου.

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων στις εγκαταστάσεις του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Για κάθε κυψέλη ελήφθησαν τα σημαντικότερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, όπως η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) και ο βαθμός απόδοσης. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι κυψέλες τεχνολογίας CIGS στα σημεία που λειτουργούν κανονικά παρουσιάζουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από την συμβατική κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου.

Η μέτρηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των κυψελών τεχνολογίας CIGS χωρίς την χρήση μιας τέτοιας μηχανικής διάταξης είναι πολύ δύσκολη. Συχνά μπορεί να είναι και καταστροφική για την λειτουργία των κυψελών (όπως φάνηκε για παράδειγμα με την συγκόλληση). Έτσι γίνεται αντιληπτή η χρησιμότητα της συγκεκριμένης ιδιοκατασκευής που μπορεί να παρέχει ηλεκτρικές μετρήσεις χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στην δομή και την λειτουργία αυτών των ηλιακών κυψελών.

Βιβλιογραφία

- 1. S.M.Sze - Physics of Semiconductor Devices - John Wiley & Sons**
- 2. Peter Würfel - Physics of solar cells - Wiley-VCH - 2005**
- 3. Tomas Markvart - Solar electricity - Wiley-second edition**
- 4. Kevin Brennan - The Physics of Semiconductors - Cambridge University Press**
- 5. Jeff Poortmans-Vladimir Arkhipov - Thin Film Solar Cells(Fabrication,Characterization &Applications) - Wiley**
- 6. Yoshihiro Hamakawa - Thin – film solar cells: next generation photovoltaics and its applications - Berlin : Springer - c2004**
- 7. D.A.Glocker, S. Ismat Shah - Handbook of thin film process technology - Bristol : IOP - 1995**
- 8. Jenny Nelson - The physics of solar cells - London: Imperial College Press - 2006**
- 9. Κ.Θ. Δέρβος - Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις - Εκδόσεις Ε.Μ.Π.**
- 10. S.O.Kasap - Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και διατάξεων - Εκδόσεις Παπασωτηρίου**
- 11. Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής - Ήπιες μορφές ενέργειας : πρακτικά - Εθνικό Συνέδριο “Ήπιες μορφές Ενέργειας” - (5^ο;,1996:;, Αθήνα)**
- 12. Μ.Μ.Σφαντζικόπουλος - Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών I – II – Εκδόσεις Ε.Μ.Π. - 2005**
- 13. <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/story?id=52049>**
- 14. <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39894.pdf>**
- 15. <http://www.iet.aau.dk/~des/papers/IWTPV2006.pdf>**

Βιογραφικό σημείωμα

Προσωπικές πληροφορίες

Επώνυμο / Όνομα
(ονόματα) **Ντούσκας Σωτήριος**

Υπηκοότητα (ή
υπηκοότητες) **Ελληνική**

Ημερομηνία γέννησης **09/02/1985**

Εκπαίδευση και κατάρτιση

Χρονολογίες **2002-2009 Φοιτητής τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.**

Τίτλος του πιστοποιητικού ή
διπλώματος **Απόφοιτος ενιαίου λυκείου (βαθμός απολυτηρίου 18,2)**

Κύρια θέματα / επαγγελματικές
δεξιότητες **Κύκλος Σπουδών: Κατασκευαστής
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε θέματα εναλλακτικών πηγών ενέργειας,
διαχείρισης ενέργειας, αυτόματου ελέγχου, αυτοματισμών,
βιομηχανικών δικτύων, συντήρησης μηχανών, πρόληψης και
διάγνωσης βλαβών, ανάλυσης και σχεδιασμού μηχανολογικών
κατασκευών.**

Επωνυμία και είδος του
οργανισμού που παρείχε
εκπαίδευση ή κατάρτιση **Ανώτατη Εκπαίδευση: Εθνικό Μέτσοβιο Πολυτεχνείο
Μέση Εκπαίδευση: 2^ο Ενιαίο λύκειο Αμαρουσίου**

Επίπεδο κατάρτισης με βάση
την εθνική ή διεθνή ταξινόμηση **Τελειόφοιτος Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος**

Μητρική/ες γλώσσα/ες **Ελληνική**

Άλλες Γλώσσες	Επίπεδο
Αγγλικά	Lower (Cambridge)
Γαλλικά	Delf A1, A2, A3, A4
Γερμανικά	Grundstufe Zertifikat

Δεξιότητες πληροφορικής

Windows, Microsoft Office
Γλώσσες Προγραμματισμού Matlab(simulink), Fortran,
Σχεδιαστικά προγράμματα Autocad, SolidWorks