



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΦΑΝΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ
ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ**

ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΜΑΚΡΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2013



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΦΑΝΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ
ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ**

ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΜΑΚΡΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2013

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2

Ημερομηνία αίτησης του κ. Μακρή Θεοδώρου : 14/11/2006

Ημερομηνία ορισμού Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής: 09/11/2007

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Επιβλέπων

Ελευθέριος Σκούρας, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Μέλη

Παναγιώτης Γιαννούλης, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Ευγενία Μυτιληναίου, Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Ημερομηνία ορισμού θέματος: 09/11/2007

Κατασκευή και χαρακτηρισμός διαφανών ηλιακών κυττάρων υψηλής απόδοσης

ΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ : 06/02/2013

| | |
|-----------------------|---|
| Σκούρας Ελευθέριος | Αν.Καθηγητής ΤΜΕΥ , Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων |
| Γιαννούλης Παναγιώτης | Καθηγητής Τμ.Φυσικής , Πανεπιστήμιο Πατρών |
| Μυτιληναίου Ευγενία | Καθηγήτρια Τμ.Φυσικής , Πανεπιστήμιο Πατρών |
| Ματίκας Θεόδωρος | Καθηγητής ΤΜΕΥ , Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων |
| Χαραλαμπίδης Αντώνιος | Αν.Καθηγητής ΣΕΜΦΕ , Ε.Μ.Π |
| Λοιδωρικής Ελευθέριος | Αν.Καθηγητής ΤΜΕΥ , Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων |
| Περράκη Βασιλική | Λέκτορας Τμ.Ηλ.Μηχ κ Τεχν.Υπολ. , Παν. Πατρών |

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις 06/03/2013

Ο Πρόεδρος του Τμήματος

Η Γραμματέας του Τμήματος

**Καρακασίδης Μιχαήλ
Καθηγητής**

Ξανθή Τουτουτζόγλου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Είναι πάρα πολλοί οι άνθρωποι που θα ήθελα να ευχαριστήσω, οι οποίοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διδακτορικής διατριβής. Κάποιοι βοήθησαν έμπρακτα, κάποιοι υλικά και κάποιοι ψυχολογικά. Σε όλους όμως χρωστάω το λιγότερο ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου και επιβλέποντα της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής κ.Ελευθέριο Σκούρα Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο δύσκολο θέμα που μου ανατέθηκε, για τις γνώσεις που μου παρείχε απλόχερα αλλά κυρίως γιατί ήταν ένας πραγματικός συνοδοιπόρος όλα αυτά τα χρόνια συνεργασίας μας. Ατελείωτες συζητήσεις σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο, πάρα πολλές ώρες μετρήσεων και επεξεργασίας αποτελεσμάτων για να φτάσουμε μέχρι το τέλος.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε δύο ανθρώπους που ήταν δίπλα μου από την πρώτη στιγμή που έγινα μέλος του εργαστηρίου, τότε σαν προπτυχιακός φοιτητής που εκπονούσα την διπλωματική μου εργασία. Αναφέρομαι στον Λεωνίδα Κανδύλη Ε.Τ.Ε.Π του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών και στον Λουκά Μπρέχα Ε.Τ.Ε.Π του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Οι δυο τους είναι η ψυχή και το σώμα του εργαστηρίου, πάντα δίπλα μου όποτε τους χρειαζόμουν, πάντα να τρέξουν για μένα και πάντα να μου συμπαραστέκονται σαν δύο πολύ καλοί φίλοι. Τους ευχαριστώ για τις πολλές ώρες βοήθειας στα τεχνικά θέματα της διατριβής καθώς και στη διαδικασία των μετρήσεων.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Υπ.Διδάκτορα Δημήτριο Μπελά για την υπομονή του, την διαθεσιμότητά του και την άψογη συνεργασία όλα αυτά τα χρόνια στο εργαστήριο. Ευχαριστώ πάρα πολύ τον Δρ. Δημήτριο Αναγνωστόπουλο ΕΕΔΙΠ του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης των Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων για όσα χρόνια ήμουν στο Πανεπιστήμιο. Με βοήθησε επιστημονικά αλλά και ψυχολογικά όλα αυτά τα χρόνια. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Λεωνίδα Γεργίδη Λέκτορα του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης των Υλικών για τη στήριξή του όλα αυτά τα χρόνια.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ από όλα είναι για την οικογένεια μου, τον πατέρα μου, τη μητέρα μου και τον αδερφό μου. Πάντα αρωγοί σε κάθε μου προσπάθεια, πάντα δίπλα μου με ψυχολογική και υλική υποστήριξη. Χωρίς αυτούς δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί η παρούσα διδακτορική διατριβή το λιγότερο που μπορώ να κάνω είναι να την αφιερώσω σε αυτούς.

Με εκτίμηση
Θεόδωρος Μακρής
Ιωάννινα 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1..... | 12 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 12 |
| 1.1 Πρόλογος..... | 12 |
| 1.2 Σκοπός της διατριβής..... | 15 |
| 1.3 Δομή της διατριβής..... | 16 |
| ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1..... | 18 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2..... | 20 |
| ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 20 |
| 2.1 Εισαγωγή | 20 |
| 2.2 Ενδογενείς Ημιαγωγοί..... | 20 |
| 2.3 Ημιαγωγοί Προσμίξεων (Εξωγενείς ημιαγωγοί)..... | 24 |
| 2.3.1 Ημιαγωγοί Δοτών (N-type)..... | 24 |
| 2.3.2 Ημιαγωγοί Δεκτών (P-type)..... | 26 |
| 2.4 Η Επαφή P-N..... | 27 |
| 2.4.1 Η επαφή p-n απουσία πόλωσης..... | 33 |
| 2.4.2 Η επαφή p-n υπό ορθή πόλωση..... | 33 |
| 2.4.3 Η επαφή p-n υπό ανάστροφη πόλωση..... | 34 |
| 2.5 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο | 36 |
| 2.6 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου | 37 |
| 2.7 Ρεύμα σκότους..... | 39 |
| 2.8 Τάση ανοιχτού κυκλώματος και ρεύμα βραχυκύκλωσης..... | 42 |
| 2.9 Κβαντική απόδοση | 42 |
| 2.10 Απόδοση ηλιακού κυττάρου..... | 44 |
| 2.11 Εξάρτηση της απόδοσης από την ακτινοβολία | 46 |
| 2.12 Επίδραση της συγκέντρωσης στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ηλιακού κυττάρου. | 47 |
| 2.13 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση | 49 |
| 2.14 Επίδραση των παρασιτικών αντιστάσεων στην απόδοση | 51 |
| 2.15 Ωμικές αντιστάσεις ενός ηλιακού κυττάρου | 53 |
| ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2..... | 55 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3..... | 56 |
| ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ..... | 56 |

| | |
|---|------------|
| 3.1 Εισαγωγή | 56 |
| 3.2 Σύστημα μετρήσεων | 57 |
| 3.3 Σύστημα κατασκευής ωμικών συνδέσεων | 62 |
| 3.4 Σύστημα κοπής λέιζερ | 65 |
| 3.5 Μετρήσεις θερμοκρασίας | 67 |
| 3.6 Σύστημα φακών Fresnel-ηλιακών κυττάρων..... | 70 |
| 3.6.1 Φακοί Fresnel | 71 |
| 3.6.2 Συστήματα Παθητικής Απαγωγής Θερμότητας | 73 |
| ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 | 75 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | 76 |
| 4.1 Εισαγωγή | 76 |
| 4.2 Μεταλλικά κράματα συγκολλήσεων φιλικά προς το περιβάλλον..... | 77 |
| 4.3 Βασικά χαρακτηριστικά του νέου κράματος συγκόλλησης..... | 80 |
| 4.4 Pb-free ωμικές συνδέσεις στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών..... | 80 |
| 4.5 Κατασκευή ωμικών συνδέσεων | 83 |
| 4.6 Απώλειες από τις ωμικές συνδέσεις..... | 86 |
| 4.7 Μετρήσεις - Αποτελέσματα | 88 |
| 4.7.1 Χαρακτηριστικές I-V για τις ωμικές συνδέσεις με το συγκολλητικό κράμα κασσιτέρου-αργύρου (Sn/Ag) | 90 |
| 4.7.2 Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας για το κράμα κασσιτέρου-αργύρου (Sn/Ag) | 95 |
| 4.7.3 Μετρήσεις θερμοκρασίας για το κράμα κασσιτέρου αργύρου (Sn/Ag)..... | 103 |
| 4.7.4 Χαρακτηριστικές I-V για τις ωμικές συνδέσεις με το συγκολλητικό κράμα βισμούθιου-κασσιτέρου (Bi/Sn)..... | 108 |
| 4.7.5 Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας για το κράμα βισμούθιου-κασσιτέρου (Bi/Sn) | 114 |
| 4.7.6 Μετρήσεις θερμοκρασίας για το κράμα βισμούθιου-κασσιτέρου(Bi/Sn) | 122 |
| 4.8 Συμπεράσματα | 125 |
| ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | 127 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | 130 |
| ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΜΙΔΙΑΦΑΝΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ | 130 |
| 5.1 Εισαγωγή | 130 |
| 5.2 Εφαρμογές και πλεονεκτήματα από την χρησιμοποίηση των λέιζερ στη βιομηχανική παραγωγή..... | 131 |
| 5.3 Τα λέιζερ στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών..... | 133 |
| 5.4 Βασικές αρχές για την επεξεργασία με λέιζερ..... | 135 |
| 5.5 Ημιδιαφανή ηλιακά κύτταρα..... | 137 |
| 5.6 Σχεδιασμός και κατασκευή ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων..... | 138 |

| | |
|---|-----|
| <i>5.7 Ηλεκτρικές μετρήσεις</i> | 151 |
| <i>5.8 Συμπεράσματα</i> | 158 |
| ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | 160 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 | 162 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ | 162 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α | 166 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β | 170 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος

Ο τομέας της ενέργειας βρίσκεται σήμερα σε κατάσταση αλλαγής. Οι συμβατικές πηγές ενέργειας είναι υπό αμφισβήτηση και υπάρχει πλέον μια παγκόσμια τάση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ώστε να μπορούν να ικανοποιήσουν την παγκόσμια ζήτηση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα δεδομένα, ο χρόνος για την υλοποίηση μιας μεγάλης κλίμακας παραγωγής ηλιακής ενέργειας είναι τώρα. Το κύριο εμπόδιο για μια μεγάλης κλίμακας εφαρμογή των φωτοβολταϊκών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η υψηλή τιμή τους [1]. Αυτό οφείλεται τόσο στο υψηλό κόστος του υλικού από το οποίο αποτελείται το φωτοβολταϊκό στοιχείο αλλά και στην ακριβή διαδικασία για την παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σε γενικές γραμμές, το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με την αύξηση της απόδοσης του συστήματος ή μειώνοντας την συνολική τιμή του. Μία από τις λύσεις που προτείνεται είναι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να ενσωματώνονται στις προσόψεις κτιρίων, που θα έχει σαν άμεση συνέπεια τη μείωση στην τιμή της εγκατάστασής του στην ύπαιθρο αλλά και την συνολική εξοικονόμηση χώρου [2]. Η εγκατάστασή τους σε στέγες ή σε προσόψεις όπως προαναφέρθηκε αποτελούν παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών που θα μειώσουν την τιμή του συστήματος και το κυριότερο η παραγωγή ενέργειας θα βρίσκεται στο σημείο χρήσης.

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες που χρησιμοποιούνται σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές δεν έχουν μεταλλικό πλαίσιο και τα ηλιακά κύτταρα ενσωματώνονται σε δύο επίπεδες επιφάνειες γυαλιού. Τα ηλιακά κύτταρα σε αυτού του είδους την κατασκευή (glass-glass laminate) είναι ημιδιαφανή ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη διαπερατότητα από το εγκατεστημένο πλαίσιο αλλά και ομοιόμορφος φωτισμός στο χώρο [3]. Στην εικόνα 1.1 φαίνεται ένα παράδειγμα εγκατάστασης ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών κυττάρων στα γραφεία εταιρείας όπου φαίνεται η εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού παράλληλα με την παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 1.1 Παράδειγμα εγκατάστασης ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών κυττάρων προς εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού παράλληλα με την παραγωγή ενέργειας.

Μία διαφορετική λύση για να μειωθεί η τιμή του συστήματος είναι να χρησιμοποιηθούν συγκεντρωτές ακτινοβολίας για να αυξήσουν την παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών κυττάρων [4]. Το ρεύμα που παράγεται από τα ηλιακά κύτταρα είναι ανάλογο προς την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω τους, οπότε μεγαλύτερη τιμή έντασης θα αυξήσει το ρεύμα. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν συγκεντρωτές ηλιακής ακτινοβολίας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, στα συστήματα υψηλής, μέσης, και χαμηλής συγκέντρωσης. Στα δύο πρώτα ουσιαστικά δεν μειώνεται η τιμή του συστήματος διότι χρειάζονται ενεργητικά συστήματα ψύξης αλλά και ειδική κατασκευή των ηλιακών κυττάρων. Στην τελευταία κατηγορία είναι τα συστήματα με αναλογία συγκέντρωσης από 1X έως 10X. Τα συστήματα αυτά μπορούν να είναι τοποθετημένα σε

σταθερές βάσεις εξαιτίας της χαμηλής συγκέντρωσης κάτι που καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση τους σε κτίρια χωρίς κινούμενα μέρη ή σύνθετη τοποθέτηση. Ένα άλλο όφελος της χαμηλής τιμής συγκέντρωσης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία δεν είναι κατασκευασμένα για τέτοιες εφαρμογές καθώς και ένα παθητικό σύστημα ψύξης ώστε να διατηρήσει την απόδοση των ηλιακών κυττάρων [5].

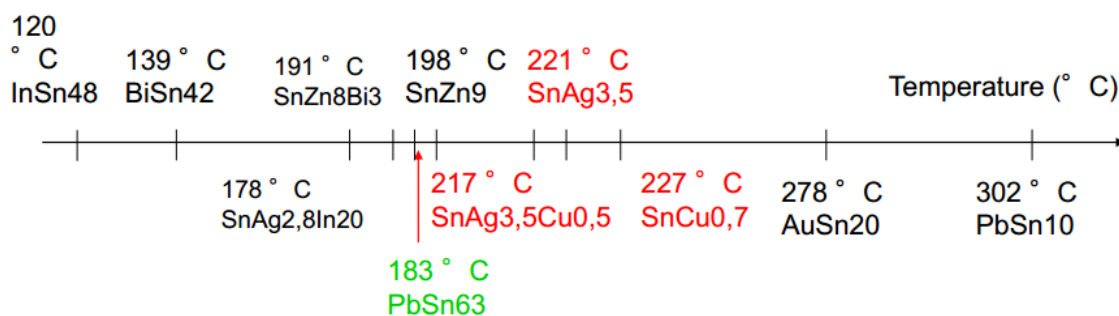
Το σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει στα συγκεκριμένα συστήματα είναι η αντοχή των ωμικών συνδέσεων σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και σε συστηματικούς κύκλους θέρμανσης-ψύξης λόγω των μεταβολών στην θερμοκρασία του. Η παρούσα τεχνολογία διασύνδεσης περιλαμβάνει επίπεδους αγωγούς χαλκού που επικαλύπτονται με το κράμα συγκολλήσεως, οι οποίοι ενεργούν ως ηλεκτρόδια που μεταφέρουν το παραγόμενο ρεύμα που παράγεται από τον ημιαγωγό. Τα κράματα συγκολλήσεως παρέχουν ηλεκτρική, θερμική και μηχανική διασύνδεση μεταξύ του ηλιακού κυττάρου πυριτίου και του επίπεδου αγωγού χαλκού που τα συνδέει.

Τα τελευταία χρόνια το κίνητρο για την ανάπτυξη κραμάτων συγκολλήσεως φιλικών προς το περιβάλλον είναι να αφαιρεθεί ο μόλυβδος από τις ηλεκτρονικές εφαρμογές λόγω της τεκμηριωμένης τοξικότητάς του. Επίσης, δεν είναι καθόλου πρακτικό να ανακυκλώνεται ο μόλυβδος όπως γίνεται σε άλλους κλάδους της βιομηχανίας επειδή τα ποσά είναι μικρά σε σύγκριση με το μέγεθος άλλων συστημάτων. Ενώ τα ηλεκτρονικά απόβλητα συχνά τίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής στις ΗΠΑ, τα εν λόγω απόβλητα αποτεφρώνονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλες ποσότητες ατμών μολύβδου στην ατμόσφαιρα που θέτουν σε άμεσο κίνδυνο τους πολίτες.

Για το λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) θέσπισε νομοθεσία για τα απόβλητα από τον Ηλεκτρικό και Ηλεκτρονικό Εξοπλισμό (Waste from the Electrical and Electronic Equipment WEEE) και οδηγίες στον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (RoHS) το 2003 [6]. Τα τέσσερα βαρέα μέταλλα (μόλυβδος, κάδμιο, υδράργυρος και χρώμιο) είχαν απαγορευτεί σε νέες εφαρμογές ηλεκτρονικού εξοπλισμού στην ΕΕ από την 1η Ιουλίου του 2006 με μερικές εξαιρέσεις οι οποίες δεν είναι μόνιμες και θα επανεξεταστούν. Βασικότερη αντικατάσταση είναι στα μεταλλικά κράματα συγκολλήσεων όπου θα πρέπει να έχουν βρεθεί αποδεκτοί αντικαταστάτες μέχρι το 2014.

Σύμφωνα με τις παραπάνω οδηγίες η φωτοβολταϊκή βιομηχανία (PV) βρίσκεται στη μετάβασή της από το χρησιμοποιούμενο κράμα συγκολλήσεως PbSn63 σε φιλικές προς το περιβάλλον (lead-free) κολλήσεις στην τεχνολογία διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Εξαιτίας των μεγάλων διαφορών

που υπάρχουν στο συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ των μεταλλικών επαφών σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και στον επίπεδο αγωγό χαλκού αναπτύσσονται μηχανικές τάσεις στο ηλιακό κύτταρο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του με αποτέλεσμα τη θραύση του. Στην εικόνα 1.2 φαίνονται τα πιθανά κράματα σαν αντικαταστάτες της παραδοσιακής ύλης συγκολλήσεως [7].



Εικόνα 1.2 Μεταλλικά κράματα που θα αντικαταστήσουν της παραδοσιακής ύλης συγκολλήσεως PbSn63.

1.2 Σκοπός της διατριβής

Ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν στο αρχικό στάδιο η ανάπτυξη μεθόδου για την κατασκευή ωμικών συνδέσεων με κράματα φιλικά προς το περιβάλλον καθώς και η περαιτέρω μελέτη τους μέσα από μετρήσεις ρεύματος τάσης σε πραγματικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η κατασκευή των ωμικών συνδέσεων ήταν καθοριστικής σημασίας γιατί όλα τα δείγματα στην παρούσα εργασία μετρήθηκαν με κράματα lead-free. Τα δυαδικά ευτηκτικά κράματα που δοκιμάστηκαν ήταν Sn96.5 – Ag3.5 και Bi52-Sn48 για τα οποία βρέθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες προθέρμανσης του δείγματος, θερμοκρασίας συγκόλλησης και χρονικής διάρκειας κατασκευής ανθεκτικών ωμικών συνδέσεων σε φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας και υψηλής απόδοσης. Βασικός στόχος ήταν η αποφυγή δημιουργίας μηχανικών τάσεων που θα προκαλούσε μικρορωγμές στα προς μέτρηση δείγματα με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσής τους αλλά και της παραγόμενης ισχύος. Για την περαιτέρω μελέτη των ωμικών συνδέσεων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των δειγμάτων σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι 16X. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις αφορούσαν την αντοχή του κράματος

συγκόλλησης σε επαναλαμβανόμενες πραγματικές συνθήκες λειτουργίας αλλά και απότομων θερμοκρασιακών αλλαγών.

Στο δεύτερο μέρος της παρούσης εργασίας σκοπός ήταν η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός ημι-διαφανών φωτοβολταϊκών στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλη επιφάνειας και υψηλής απόδοσης. Βασική ιδέα ήταν τα ημι-διαφάνη ηλιακά κύτταρα να κατασκευαστούν με τη χρήση δέσμης laser CO₂ σε βιομηχανικά συμβατικά ηλιακά κύτταρα υψηλής απόδοσης. Βασικός στόχος ήταν να αποφευχθεί η δημιουργία ειδικού σχεδιασμού των μπροστά επαφών για αυτό και επιλέχθηκε ο σχηματισμός δυσδιάστατου πλέγματος ελλείψεων. Για την αποφυγή θραύσης των δειγμάτων από την πίεση της δέσμης laser επινοήθηκε και κατασκευάστηκε μεταλλική βάση που συγκρατεί το προς κοπή δείγμα και βοηθάει στην εκτόνωση της δέσμης στο πίσω μέρος του ηλιακού κυττάρου.

1.3 Δομή της διατριβής

Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται μια γενική περιγραφή καθώς και οι βασικοί στόχοι της διδακτορικής διατριβής. Στο κεφάλαιο 2 αναφέρονται οι βασικές αρχές της φυσικής των ημιαγωγών αρχίζοντας από τη λειτουργία ενός ημιαγωγού μέχρι το διαχωρισμό τους σε ενδογενείς και ημιαγωγούς προσμίξεων. Στη συνέχεια περιγράφεται η αρχή λειτουργίας μιας επαφής p-n υπό ορθή και ανάστροφη πόλωση. Σε επόμενο στάδιο περιγράφεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και αναφέρεται η εξίσωση που περιγράφει το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου. Έπειτα υπολογίζονται τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη για τον χαρακτηρισμό ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ρεύμα βραχυκύκλωσης, τάση ανοικτού κυκλώματος, παραγώγιμη ισχύς και τέλος η απόδοσή του. Στη συνέχεια δίνεται έμφαση στην εξάρτηση της απόδοσης από την ακτινοβολία καθώς και το πως επηρεάζονται από τη συγκέντρωση τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Τέλος αναφέρονται οι βασικές ωμικές επαφές σε ένα ηλιακό κύτταρο καθώς και των πως επηρεάζουν οι παρασιτικές αντιστάσεις την απόδοση.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στις πειραματικές διατάξεις αλλά και μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Αναλύεται αρχικά η λογική της μέτρησης ρεύματος-τάσης καθώς επίσης και η διάταξη που πραγματοποιήθηκαν οι ηλεκτρικές μετρήσεις με το μηχάνημα (source-measure unit) της εταιρείας KEITHLEY. Στο

δεύτερο μέρος περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής αλλά και λειτουργίας του συστήματος ωμικών συνδέσεων και στο τρίτο μέρος αναφέρονται οι αρχές λειτουργίας του συστήματος κοπής λειζερ CO₂ με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι κατασκευές των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στις δύο τελευταίες ενότητες παρουσιάζονται οι διατάξεις και τα όργανα μέτρησης θερμοκρασίας καθώς επίσης και το σύστημα μέτρησης με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας κάνοντας λεπτομερή αναφορά στα επιμέρους τμήματα της διάταξης (φακοί Fresnel, δεξαμενές θερμότητας).

Στα κεφάλαια 4 και 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιήθηκε κατασκευή και χαρακτηρισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων περιβαλλοντικά φιλικών ωμικών συνδέσεων μεταξύ των επίπεδων αγωγών αργύρου (bus bars) ηλιακών κυττάρων πυριτίου και επίπεδων αγωγών χαλκού (flat wires or tabbing ribbons) που επικαλύπτονται από τα φιλικά προς το περιβάλλον κράματα συγκολλήσεως Sn96.5-Ag3.5 και Bi58-Sn42. Στο πρώτο στάδιο έγινε ο καθορισμός των ιδανικότερων συνθηκών συγκολλήσεως για κάθε ένα από τα δύο διαφορετικά κράματα και στη συνέχεια ο χαρακτηρισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων με συστηματικές μετρήσεις των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) για διάφορες τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας όπως επίσης και σε ηλεκτρικές μετρήσεις για συγκεντρώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας έως 16 ήλιους (16X) με την χρησιμοποίηση κυλινδρικών φακών Fresnel.

Στο κεφάλαιο 5 αναφέρεται αναλυτικά ο σχεδιασμός, η κατασκευή και ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός διαφανών ηλιακών κυττάρων πυριτίου μεγάλης επιφάνειας, μικρού πάχους και υψηλής απόδοσης. Δίνονται λεπτομέρειες της κατασκευής τους μέσω του σύγχρονου μηχανήματος κοπής Bystar 4020 της εταιρείας Bystronic καθώς και το ποσό της διαπερατότητας που επιτεύχθηκε μέσω των κοπών με laser. Τέλος, για τον χαρακτηρισμό τους πραγματοποιήθηκαν ωμικές συνδέσεις φιλικές προς το περιβάλλον και καταγράφηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης για να βρεθεί η απόδοσή τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα συμπεράσματα της παρούσης διδακτορικής διατριβής πάνω στις ωμικές συνδέσεις, τις μετρήσεις των κραμάτων σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και στην κατασκευή των ημι-διαφανών ηλιακών κυττάρων. Κλείνοντας αναφέρονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα οι οποίες είναι απαραίτητες για τις κατασκευές που περιγράφηκαν.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- [1] K. A. M. Yamaguchi, and Y. Ohshita, in Proc. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference 2007, Milan, Italy, 2007, p. pp. 3543.
- [2] J. Nilsson, in Department of Architecture and Built Environment, Lund University, 2005.
- [3] S. R. a. N.Guarlento, Building Intergrated Photovoltaics / A Handbook, Birkhauser Verlag AG, 2009.
- [4] Y. Tripanagnostopoulos, in Concentrating Photovoltaic Optics and Power Workshop, Marburg, 2007.
- [5] M. F. J. Piszczor, O'Neill, M.J., & Fraas, L.M., in Proceedings of the 23rd Photovoltaic Specialists Conference, Louisville, KY, 1993.
- [6] EC, http://europa.eu.int/eur-lex/pri/en/oj/dat/2003/l_037/l_03720030213en00190023.pdf (2003)
- [7] K.Suganuma, Lead free soldering in electronics, Marcel Dekker Inc.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Ως ημιαγωγός θεωρείται ένα υλικό το οποίο έχει ενεργειακό χάσμα κατά πολύ μικρότερο από το χάσμα ενός μονωτή δηλαδή της τάξης του 1eV. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες πλησίον του απολύτου μηδενός ($T=0$ K), οι ημιαγωγοί είναι κακοί αγωγοί καθώς όλα τα ηλεκτρόνια βρίσκονται στη ζώνη σθένους και δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας. Αντίθετα, σε συνήθεις θερμοκρασίες η κατάσταση είναι διαφορετική καθώς οι πληθυσμοί των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας αλλάζουν. Επειδή η στάθμη Fermi, E_F βρίσκεται περίπου στο μέσο του χάσματος σε έναν ημιαγωγό και επειδή το χάσμα του είναι μικρό τα ηλεκτρόνια διεγείρονται θερμικά και μεταβαίνουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Για αυτά τα ηλεκτρόνια υπάρχουν πολλές κοντινές ενεργειακές καταστάσεις που είναι κενές έτσι μια μικρή εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού μπορεί εύκολα να αυξήσει την ενέργεια τους προκαλώντας ένα μέτριο ρεύμα. Επειδή η θερμική διέγερση δια μέσου ενός στενού χάσματος είναι πιο πιθανή σε υψηλές θερμοκρασίες, η αγωγιμότητα των ημιαγωγών εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία και αυξάνεται απότομα σε συνάρτηση με την αύξησή της.

2.2 Ενδογενείς Ημιαγωγοί

Σε έναν ημιαγωγό υπάρχουν και αρνητικοί και θετικοί φορείς στους οποίους οφείλεται η αγωγιμότητα. Όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη

αγωγιμότητας, αφήνει πίσω του μια οπή. Η οπή αυτή η οποία είναι θέση από όπου λείπει ένα ηλεκτρόνιο εμφανίζεται σαν θετικό φορτίο. Η οπή δρα σαν φορέας φορτίου, αφού ένα ηλεκτρόνιο σθένους από ένα γειτονικό δεσμό μπορεί να μεταφερθεί σε αυτή την οπή γεμίζοντάς την και αφήνοντας πίσω του μια άλλη οπή στην αρχική του θέση. Έτσι λοιπόν η οπή μετακινείται μέσα στη ζώνη σθένους. Σε ένα καθαρό κρύσταλλο ο οποίος περιέχει μόνο ένα στοιχείο ή μια ένωση, υπάρχει ίσος αριθμός ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και οπών. Τέτοιοι συνδυασμοί φορτίων ονομάζονται ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής και ένας αμιγής ημιαγωγός που περιλαμβάνει τέτοια ζεύγη λέγεται ενδογενής ημιαγωγός.

Συγκεκριμένα, σε ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο σε θερμοκρασία απολύτου μηδενός δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια καθώς όλα εμπλέκονται στη σύναψη ομοιοπολικών δεσμών με αποτέλεσμα η ζώνη σθένους να είναι πλήρης, ενώ η ζώνη αγωγιμότητας παραμένει κενή και χωρίζεται από τη ζώνη σθένους με τη μεσολάβηση του ενεργειακού χάσματος. Στην παρούσα κατάσταση το υλικό δεν μπορεί να άγει ούτε ρεύμα αλλά ούτε και θερμότητα. Για να ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί αγωγής τα ηλεκτρόνια πρέπει να διεγερθούν από ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση με αυτή που αντιστοιχεί στο ενεργειακό χάσμα (E_g). Έτσι λοιπόν, όταν η θερμοκρασία ενός ημιαγωγού αυξάνει τα ηλεκτρόνια αποκτούν κινητική ενέργεια και ορισμένα από αυτά καταφέρνουν να υπερπηδήσουν το ενεργειακό φράγμα και να καταλάβουν καταστάσεις στην ζώνη αγωγιμότητας όπου πλέον μπορούν να άγουν ρεύμα και θερμότητα καθώς κινούνται. Στην ζώνη σθένους δημιουργήθηκαν κάποια κενά από την μετανάστευση των ηλεκτρονίων τα οποία αποκαλούνται οπές και έχουν και αυτά τη δυνατότητα να μετακινούνται και να άγουν. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του υλικού, τόσο μεγαλύτερο είναι και το πλήθος των οπών και των ηλεκτρονίων που μπορούν να μετακινούνται γεγονός που συνεπάγεται και μεγαλύτερη αγωγιμότητα.

Καθώς υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και οπές) σε έναν ενδογενή ημιαγωγό [1], η έκφραση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι:

$$s = n|e|m_e + p|e|m_h \quad (2.1)$$

όπου,

n : ο αριθμός των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας ανά μονάδα όγκου

p : ο αριθμός των οπών ανά μονάδα όγκου

μ_e : η ευκινησία αγωγιμότητας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας η οποία αποτελεί μια ένδειξη της συχνότητας των σκεδάσεων και οι μονάδες της είναι τετραγωνικά μέτρα ανά volt – δευτερόλεπτο ($\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

μ_h : η ευκινησία των οπών

$|e|$: η απόλυτη τιμή του ηλεκτρικού φορτίου του ηλεκτρονίου (1.602×10^{-19} Cb)

Όμως, επειδή στους ενδογενείς ημιαγωγούς, κάθε ηλεκτρόνιο που διεγείρεται αφήνει πίσω του μία οπή στη ζώνη σθένους, δηλαδή ισχύει $n = p$, τότε η σχέση (2.1) γίνεται:

$$s = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h \quad \text{P} \quad s = p|e|(\mu_e + \mu_h) \quad (2.2)$$

Κάθε διεγερμένο ηλεκτρόνιο στην ζώνη αγωγιμότητας αφήνει πίσω του στην ζώνη σθένους μια οπή. Άρα, η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας σε έναν ενδογενή ημιαγωγό (ή αλλιώς, η ενδογενής αγωγιμότητα ενός ημιαγωγίμου κρυστάλλου), καθώς και η συγκέντρωση των οπών στην ζώνη σθένους, υπολογίζονται από την κατανομή:

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \left(m_e^* \times m_h^* \right)^{3/4} \exp \left(-\frac{E_g}{2k_B T} \right) \quad (2.3)$$

όπου,

m_e^* : η ενεργός μάζα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας

m_h^* : η ενεργός μάζα της οπής

T : η απόλυτος θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

k_B : η σταθερά του Boltzmann

h : η σταθερά του Planck

E_g : το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού

Στα στερεά, η κατανομή των ηλεκτρονίων στις διάφορες ενεργειακές στάθμες περιγράφεται από την στατιστική Fermi–Dirac. Η οποία περιγράφει την πιθανότητα η ενεργειακή στάθμη E να καταληφθεί σε ένα ιδανικό αέριο ηλεκτρονίων που βρίσκεται, σε θερμοκρασία T :

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu}{K_B T}\right) + 1} \quad (2.4)$$

όπου,

E : η ενέργεια της ενεργειακής στάθμης

μ : το χημικό δυναμικό που ρυθμίζει την συγκέντρωση των ηλεκτρονίων

K_B : η σταθερά του Boltzmann

T : η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

Σε θερμοκρασία απόλυτου μηδενός ($T=0$ K), το χημικό δυναμικό είναι ίσο με την ενέργεια Fermi ($\mu = E_F$) και η σχέση 2.4 γίνεται:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{K_B T}\right) + 1} \quad (2.5)$$

Η ενέργεια Fermi σε θερμοκρασία απόλυτου μηδενός, είναι η τελευταία ενεργειακά, , ενεργειακή στάθμη. Στα μέταλλα η E_F εντοπίζεται ενεργειακά μέσα στην ζώνη αγωγιμότητας, ενώ στους αγωγούς και μονωτές εντοπίζεται στην περιοχή του ενεργειακού χάσματος. Για τους μονωτές λοιπόν ισχύει:

$$E_F = (E_c + E_v) / 2 \quad (2.6)$$

όπου,

E_c : η ενέργεια του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας

E_v : η ενέργεια της κορυφής της ζώνης σθένους

Για τους ενδογενείς ημιαγωγούς ισχύει:

$$E_F = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} K_B T \ln(m_h^* / m_e^*) \quad (2.7)$$

όπου,

m_e^* : η ενεργός μάζα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας

m_h^* : η ενεργός μάζα των οπών

T : η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

K_B : η σταθερά Boltzmann

E_g : το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού

ενώ σε θερμοκρασία απολύτου μηδενός ($T=0$ K) η σχέση (2.6) για τους ενδογενείς ημιαγωγούς γίνεται:

$$E_F = E_g / 2 = (E_c - E_v) / 2 \quad (2.8)$$

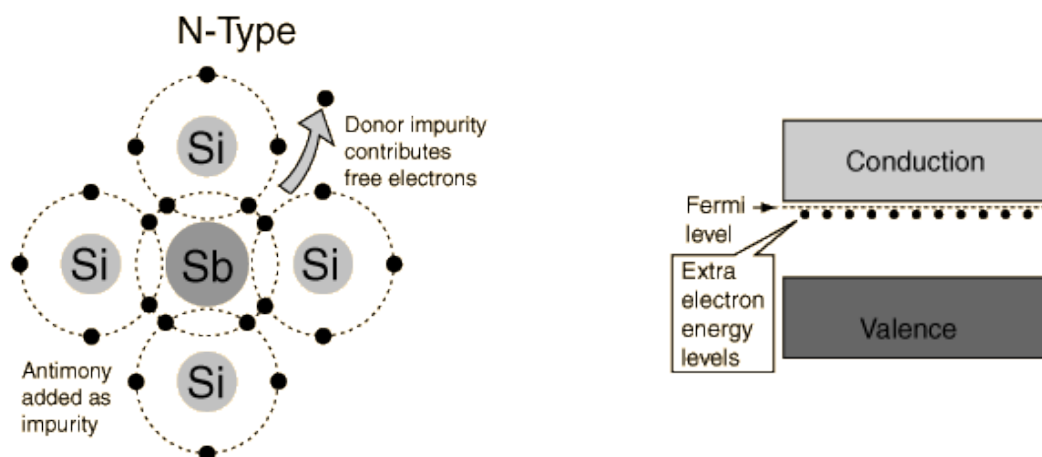
2.3 Ημιαγωγοί Προσμίξεων (Εξωγενείς ημιαγωγοί)

Σε ένα ημιαγωγό υλικό μπορούν να εισαχθούν ηθελημένα προσμίξεις για να τροποποιήσουν τις ηλεκτρικές του ιδιότητες ή αθέλητα ως μολυσματικά στοιχεία και ακαθαρσίες της κρυσταλλικής δομής. Οι ηθελημένες προσμίξεις αντικατάστασης είναι ηλεκτρονικά ενεργές σε αντίθεση με τις ακαθαρσίες. Τα άτομα προσμίξεων ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες τους δότες και τους δέκτες. Ένας δότης έχει ένα περισσότερο ηλεκτρόνιο από το άτομο που πρόκειται να αντικαταστήσει στον κρύσταλλο, ενώ ένας δέκτης έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο.

2.3.1 Ημιαγωγοί Δοτών (n-type)

Ένας ημιαγωγός τύπου n έχει περίσσια ηλεκτρονίων αγωγιμότητας. Οι ημιαγωγοί αυτοί με επιπλέον ηλεκτρόνια από τους ενδογενείς λέγονται n-τύπου και οι προσμίξεις αντίστοιχα εμπλουτιστές n-τύπου. Στην περίπτωση του πυριτίου, τα άτομά του έχουν το καθένα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Έτσι λοιπόν με την αντικατάσταση ενός τετρασθενούς ατόμου Si από ένα πεντασθενές επιτυγχάνεται ο εμπλουτισμός του πλέγματος με ένα

επιπλέον ηλεκτρόνιο το οποίο δεν συμμετέχει στην σύναψη δεσμού και είναι χαλαρά συνδεδεμένο με το μητρικό άτομο εμπλουτισμού λόγω της αυξημένης θωράκισής του από τον πυρήνα την οποία του προσφέρουν τα ηλεκτρόνια των εσώτατων στιβάδων και τα γειτονικά άτομα του ημιαγωγού που φιλοξενεί την πρόσμιξη. Ένα τέτοιο άτομο δρα ως δότης ηλεκτρονίου για το κρυσταλλικό πλέγμα και η ενέργεια που απαιτείται για την αποδέσμευσή του λέγεται ενέργεια ιονισμού του ατόμου-δότη.



Εικόνα 2.2
Ημιαγωγός τύπου n(n-type)

Το άτομο δότης μπορεί να προσεγγισθεί με το υπόδειγμα του υδρογονοειδούς ατόμου σύμφωνα με το οποίο για τα παραπάνω μεγέθη ισχύουν οι σχέσεις:

$$E_d = \frac{e^4 m_e^*}{8\epsilon_r^2 \epsilon_0^2 h^2} = \frac{13.6 m_e^*}{\epsilon_r^2 m_e} eV \quad (2.9)$$

όπου m_e^* η ενεργός μάζα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας στον κρύσταλλο και ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά του κρυστάλλου

Συνεχίζοντας με ενεργειακούς όρους, οι προσμίξεις δοτών τοποθετούνται στο ενεργειακό διάγραμμα του ημιαγωγού σε μια στάθμη δοτών λίγα μόλις meV (περίπου 50 meV για το Si και 10 meV για το Ge) χαμηλότερα από το κάτω άκρο της ζώνης αγωγιμότητας (Εικόνα 2.2). Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διέγερση τους και την ουσιαστική συμβολή τους στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου με την απαίτηση μικρού ποσού

ενέργειας που μπορεί να παρασχεθεί από θερμικές διεργασίες (η μέση θερμική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου σε θερμοκρασία δωματίου είναι 25 meV).

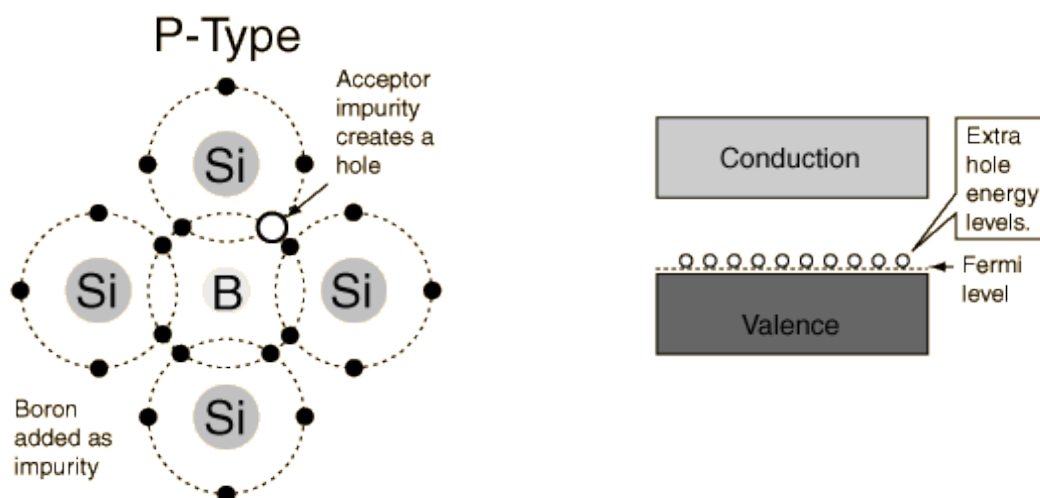
2.3.2 Ημιαγωγοί Δεκτών (p-type)

Αν ένας ημιαγωγός πυριτίου είναι εμπλουτισμένος με άτομα από την τρίτη ομάδα του περιοδικού πίνακα, όπως είναι το ίνδιο και το αλουμίνιο που έχουν τρία ηλεκτρόνια σθένους, τότε η πλειονότητα των φορέων αγωγιμότητας θα είναι τα θετικά φορτία. Συγκεκριμένα το άτομο της πρόσμιξης κατά την εισαγωγή του στο πλέγμα λαμβάνει τη θέση του κέντρου ενός τετραέδρου το οποίο στις κορυφές του έχει τέσσερα μητρικά άτομα συνάπτοντας έτσι τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς. Το επιπλέον ηλεκτρόνιο που απαιτείται για να γίνει κάτι τέτοιο παρέχεται από το μητρικό άτομο με αποτέλεσμα την δημιουργία οπής. Έτσι λοιπόν αυξάνεται η συγκέντρωση των οπών του ημιαγωγίου πλέγματος. Για τις οπές ορίζονται τα μεγέθη αντίστοιχα όπως πριν για τα ηλεκτρόνια:

$$E_r = \frac{e^4 m_h^*}{8 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2 h^2} = \frac{13.6 m_h^*}{\epsilon_r m_e} eV \quad (2.10)$$

όπου m_h^* η ενεργός μάζα των οπών στον κρύσταλλο

ϵ η διηλεκτρική σταθερά του κρυστάλλου



Εικόνα 2.3
Ημιαγωγός τύπου p (p-type).

Ένας ημιαγωγός με περίσσεια οπών λέγεται ημιαγωγός p-τύπου και αντίστοιχα οι προσμίξεις εμπλουτιστές p-τύπου. Από ενεργειακή άποψη, η στάθμη των δοτών βρίσκεται λίγα μόλις meV υψηλότερα από τη ζώνη σθένους (περίπου 60 meV για το Si και 10 meV για το Ge), ενώ η στάθμη Fermi μετατοπίζεται σε μικρότερες τιμές του ενεργειακού χάσματος (Εικόνα 2.3).

2.4 Η Επαφή p-n

Η βασική αρχή λειτουργίας των ημιαγωγικών διατάξεων βασίζεται στον έλεγχο της αγωγιμότητάς τους με τεχνικές προκαθορισμού της συγκέντρωσης των προσμίξεων εμπλουτισμού. Η συγκέντρωση αυτή μπορεί να μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή του ημιαγωγικού υλικού. Μία τέτοια συμπεριφορά παρατηρείται στο σχηματισμό της επαφής (junction) p-n. Ο σχηματισμός της επαφής p-n πραγματοποιείται όταν έρθουν σε επαφή οι δύο διαφορετικού τύπου ημιαγωγοί (τύπος-n και τύπος-p). Στις μέρες μας έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι κατασκευής επαφών για την καλύτερη ανάπτυξη φιλμ υψηλής καθαρότητας. Οι δύο κυριότερες μέθοδοι είναι η χημική εναπόθεση (CVD) και η μοριακή επιταξία (MBE). Με αυτές τις μεθόδους το υλικό κατασκευάζεται ανά ατομικό επίπεδο έτσι, ώστε να έχουμε έλεγχο στη στοιχειομετρία των συστατικών και η κάθε περιοχή να αρχίζει να σχηματίζεται τη στιγμή που σταματάει η ανάπτυξη της προηγούμενης.

Όταν φέρουμε σε επαφή τους δύο τύπους ημιαγωγών πυριτίου (Εικόνα 2.4) τότε ηλεκτρόνια αγωγιμότητας από τον n-type ημιαγωγό θα περάσουν την ομοεπαφή για να συμπληρώσουν την εξωτερική στοιβάδα των ατόμων πυριτίων του p-type ημιαγωγού που τους λείπει ένα ηλεκτρόνιο και οπές από τον p-type ημιαγωγό θα περάσουν στον n-type ημιαγωγό όπου θα έχουν την δυνατότητα να ενωθούν με ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Ως αποτέλεσμα της μετακίνησης των φορέων αγωγιμότητας δημιουργείται διπολικό στρώμα (ίσων και αντίθετων φορτίων) στην περιοχή της διεπιφάνειας, πάχους μερικών μικρομέτρων (μm), όπου υπάρχει έλλειψη φορέων αγωγιμότητας. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης φορτίου (depletion zone). Το πάχος της είναι αντιστρόφως ανάλογο της συγκέντρωσης των προσμίξεων:

$$N_a l_p = N_d l_n \quad (2.11)$$

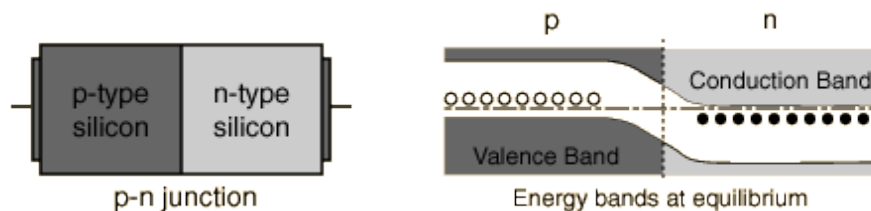
όπου l_p το μήκος στην περιοχή απογύμνωσης φορτίου στο ημιαγωγό p-type,

l_n το μήκος στην περιοχή απογύμνωσης φορτίου στο ημιαγωγό n-type,

N_a η συγκέντρωση δεκτών στην περιοχή τύπου p

N_d η συγκέντρωση δοτών στην περιοχή τύπου n.

Εξηγώντας την επαφή p-n με ενεργειακούς όρους παρατηρούμε ότι λόγω διαφορετικών συγκεντρώσεων των ηλεκτρονίων και των οπών στις περιοχές n και p αντίστοιχα παρατηρούνται φαινόμενα διάχυσης ηλεκτρονίων από την n στην p περιοχή και αντίστροφα οπών από την p στην n έως ότου επέλθει ισορροπία στο σύστημα. Αυτή η ισορροπία καθορίζεται από τις ενέργειες Fermi των δύο περιοχών που πριν την επαφή βρίσκονταν σε διαφορετικές στάθμες. Έτσι οι ενέργειες Fermi υφίσταται μια σχετική μετατόπιση έως ότου ευθυγραμμιστούν σε μία κοινή στάθμη οπότε το σύστημα περιέχεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας (Εικόνα 2.4). Πρέπει να τονίσουμε ότι στους n-τύπου ημιαγωγούς η E_F βρίσκεται λίγα meV κάτω από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας ενώ στους p-τύπου ημιαγωγούς λίγα meV πάνω από την κορυφή της ζώνης σθένους.



Εικόνα 2.4
Ενεργειακές στάθμες στην επαφή p-n.

Ηλεκτρικό πεδίο υπάρχει μόνο στην περιοχή απογύμνωσης φορτίου, το οποίο δημιουργεί ένα φράγμα δυναμικού Φ που εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση των φορέων διαμέσου της επαφής. Αποτέλεσμα της δράσης αυτού του πεδίου που θέτει ενεργειακό φραγμό στην περαιτέρω διάχυση των φορέων είναι η καμπύλωση των ενεργειακών ζωνών στην περιοχή απογύμνωσης. Εκτός της περιοχής απογύμνωσης φορτίου, το ηλεκτρικό πεδίο ισούται με μηδέν, αφού ο αριθμός των αρνητικών φορτίων είναι ίσος με τον αριθμό των

θετικών φορτίων και η διαφορά δυναμικού ισούται με μηδέν εξαιτίας αυτής της ουδετερότητας φορτίου.

Η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου $E(x)$ κατά μήκος της επαφής p-n υπολογίζεται [2] ολοκληρώνοντας την εξίσωση Poisson

$$\tilde{N}^2 V = - r(x) / \epsilon_0 \epsilon \quad (2.12)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα φορτίου

ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού

ϵ είναι η διηλεκτρική σταθερά του υλικού του ημιαγωγού.

Για την περιοχή τύπου-n ισχύει ότι

$$0 \leq x \leq l_n \text{ και } \rho(x) = eN_d \quad (2.13)$$

Για την περιοχή τύπου-p ισχύει ότι

$$-l_p \leq x \leq 0 \text{ και } \rho(x) = -eN_a \quad (2.14)$$

όπου $\rho(x)$ είναι η πυκνότητα φορτίου

l είναι το μήκος διεξόδου της ζώνης απογύμνωσης στην κάθε περιοχή

N είναι οι συγκεντρώσεις των αντίστοιχων προσμίξεων ($d = \text{donor}$ και $a = \text{acceptor}$).

Για την περιοχή τύπου-n, η εξίσωση Poisson γίνεται

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = - \frac{r(x)}{\epsilon_0 \epsilon} = - \frac{eN_d}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (2.15)$$

Για την περιοχή τύπου-p, η ίδια εξίσωση γίνεται

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon} = - \frac{eN_a}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (2.16)$$

Ως αποτέλεσμα της σχέσης ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού $E(x) = -dV/dx$

ισχύουν για τα αντίστοιχα τμήματα p και n της διεπαφής οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$E(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon_0\varepsilon}(x+l_p) \quad \text{για } -l_p \leq x \leq 0 \quad (2.17)$$

$$E(x) = -\frac{eN_d}{\varepsilon_0\varepsilon}(l_n-x) \quad \text{για } 0 \leq x \leq l_n \quad (2.18)$$

Η γραφική παράσταση του ηλεκτρικού πεδίου ως συνάρτηση της απόστασης εντός της περιοχής απογύμνωσης φορτίου αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα διότι η σχέση που συνδέει το ηλεκτρικό πεδίο με την απόσταση είναι γραμμική. Στο σημείο $x = 0$, η $E(x)$ εμφανίζει συνέχεια που έχει ως αποτέλεσμα την σχέση

$$N_a l_p = N_d l_n \quad (2.19)$$

Η τιμή του δυναμικού Φ της διεπαφής (V_{bi}) λαμβάνεται από τα επιμέρους δυναμικά V_1 και V_2 , τα οποία προκύπτουν από την επίλυση της εξίσωσης Poisson για την κάθε περιοχή ξεχωριστά:

$$V(l_n) - V(x) = \frac{eN_d}{2\varepsilon_0\varepsilon}(x-l_n)^2 \quad \text{για } 0 \leq x \leq l_n \quad (2.20)$$

όπου για $x = 0$ και $V(l_n) = V_1$ ισχύει ότι

$$V(1) - V(0) = \frac{\rho_n l_n^2}{2\varepsilon_0\varepsilon} \quad (2.21)$$

$$V(x) - V(-l_p) = \frac{eN_a}{2\varepsilon_0\varepsilon}(x+l_p)^2 \quad \text{για } -l_p \leq x \leq 0 \quad (2.22)$$

όπου για $x = 0$ και $V(-l_p) = V_2$ έχουμε ότι

$$V(2) - V(0) = -\frac{\rho_p l_p^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon} \quad (2.23)$$

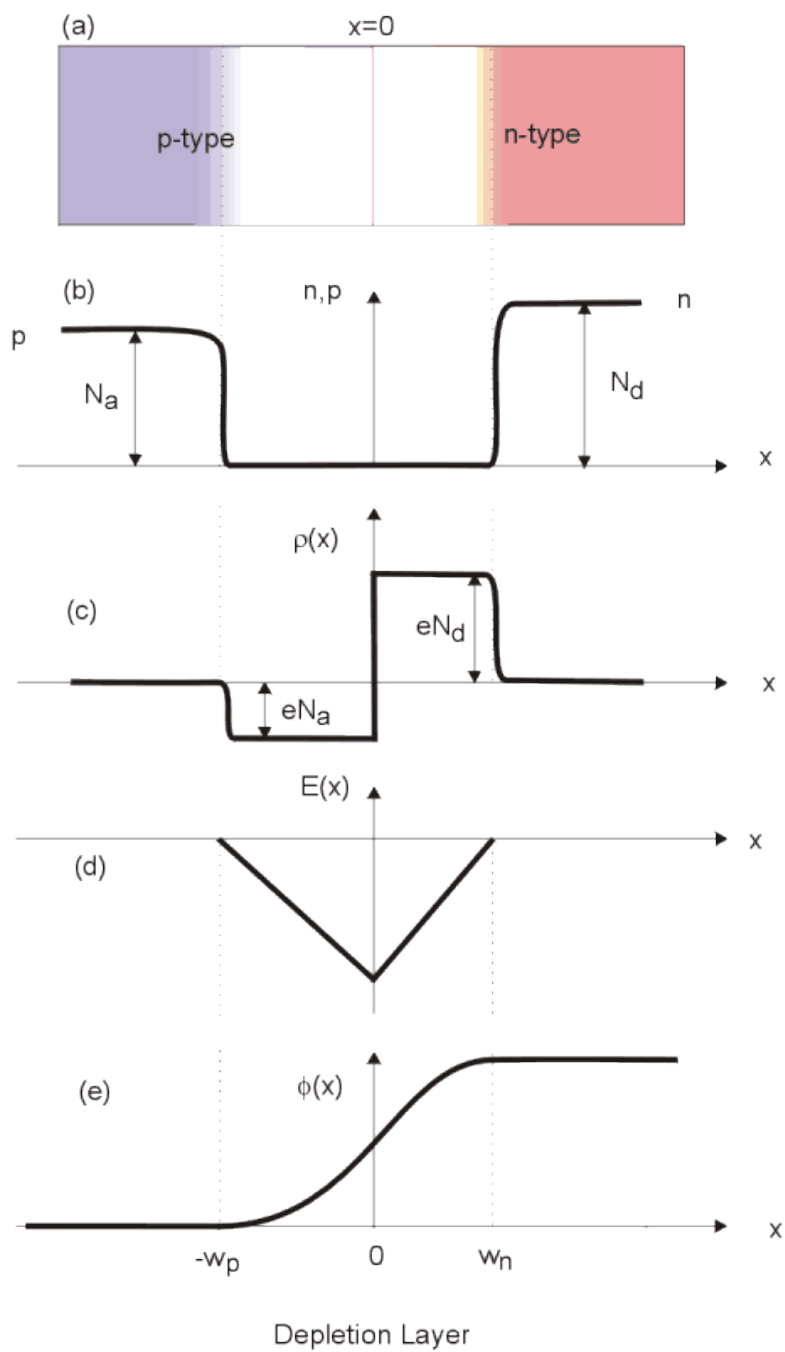
Τελικά, το συνολικό δυναμικό Φ θα ισούται με

$$F = V(2) - V(0) - e[V(1) - V(0)] \quad (2.24)$$

$$F = \frac{eN_d l_n^2 + eN_a l_p^2}{2e_0 e}$$

Ενώ η συνολική ενέργεια θα ισούται με

$$D = -eF \quad (2.25)$$



Εικόνα 2.5

- b) Συγκεντρώσεις δεκτών και δοτών ως συναρτήσεις της απόστασης
 c) Πυκνότητα φορτίου ως συνάρτηση της απόστασης
 d) Ηλεκτρικό πεδίο ως συνάρτηση της απόστασης
 e) Δυναμικό Φ ως συνάρτηση της απόστασης

2.4.1 Η επαφή p-n απουσία πόλωσης

Η απουσία εξωτερικής πόλωσης είναι μία κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Το ρεύμα ηλεκτρονίων από την περιοχή n στην περιοχή p είναι

$$I_{np}(0) = I_0 \exp(-D/k_B T) \quad (2.26)$$

Επίσης, υπάρχει και ένα ρεύμα αντίθετης φοράς $I_{pn}(0)$ που οφείλεται στα ηλεκτρόνια που διεγείρονται πάνω από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας στην p περιοχή και που είναι ανεξάρτητο της Δ μιας και αυτά τα ηλεκτρόνια κινούνται προς χαμηλότερες ενέργειες. Στην κατάσταση δυναμικής ισορροπίας για τα δύο ρεύματα ισχύει $I_{np}(0) = -I_{pn}(0)$, δηλαδή το συνολικό ρεύμα των ηλεκτρονίων είναι μηδενικό.

2.4.2 Η επαφή p-n υπό ορθή πόλωση

Εφαρμόζοντας δυναμικό, υπό ορθή πόλωση, δηλαδή θετικό δυναμικό στην πλευρά p και αρνητικό δυναμικό στην πλευρά n, το ενεργειακό φράγμα Δ ελαττώνεται κατά eV έτσι, ώστε η σχετική θέση των ενεργειακών ζωνών να μετατοπίζεται κατά eV. Συγκεκριμένα, ισχύει ότι

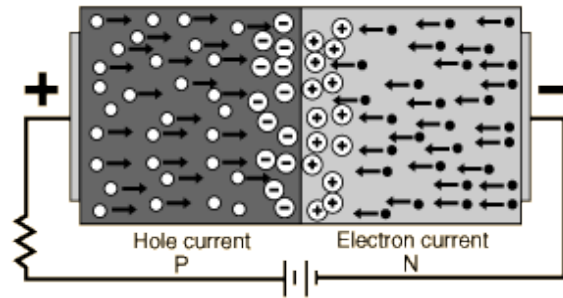
$$I_{np}(V) = I_0 \exp(- (D - eV)/k_B T) \quad (2.27)$$

Από την άλλη πλευρά, το ρεύμα I_{pn} παραμένει αμετάβλητο και ισχύει

$$I_{pn}(V) = I_{pn}(0) \quad (2.28)$$

Το συνολικό ρεύμα ηλεκτρονίων είναι

$$I_e = I_{np}(V) + I_{pn}(V) = I_{np}(0) \left[\exp(eV/k_B T) - 1 \right] \quad (2.29)$$

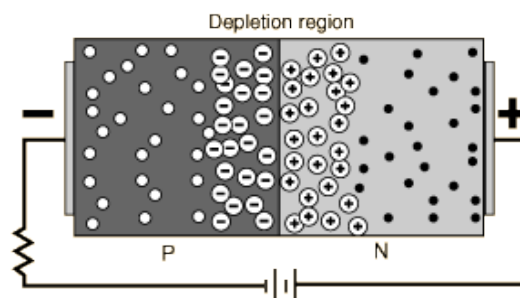


Εικόνα 2.6
Η επαφή p-n υπό ορθή πόλωση.

Το συνολικό ρεύμα των ηλεκτρονίων ακολουθεί νόμο εκθετικής αύξησης ως προς το εφαρμοζόμενο ορθό δυναμικό. Όταν η τάση V ξεπεράσει το δυναμικό φραγμού V_{bi} , οι φορείς πλειονότητας μπορούν άνετα να διασχίσουν την διεπαφή, ενώ η αύξηση της τάσης συνοδεύεται από την αύξηση της έντασης του ρεύματος. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση V είναι μικρότερη του δυναμικού φραγμού τότε οι φορείς πλειονότητας υπόκεινται σε μεγάλη αντίσταση με αποτέλεσμα μικρές τιμές ρεύματος. Η κρίσιμη τιμή της τάσης που είναι ικανή να υπερνικήσει τον φραγμό κυμαίνεται από 0.5Volt έως 0.7Volt.

2.4.3 Η επαφή p-n υπό ανάστροφη πόλωση

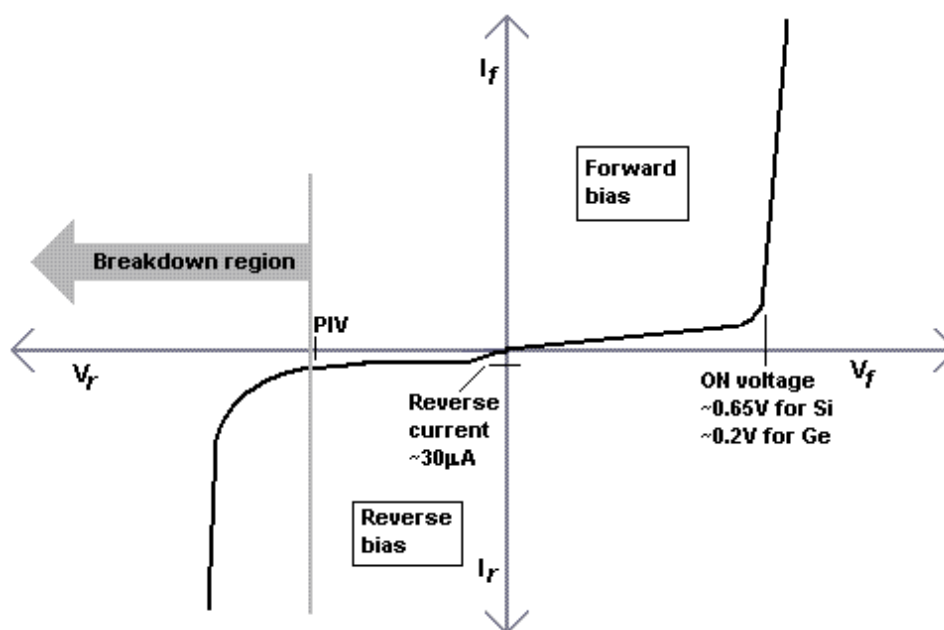
Η εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού ανάστροφης πόλωσης οδηγεί σε συνολικό ρεύμα αντίθετης φοράς το οποίο έχει πολύ μικρή τιμή (της τάξης των mA) έως ένα κρίσιμο όριο πόλωσης ($\approx 25\text{Volt}$) οπότε και το ανάστροφο ρεύμα αρχίζει να αυξάνει ραγδαία οδηγώντας τη διάταξη σε κατάρρευση. Ο ενεργειακός φραγμός Δ αυξάνει κατά eV με αποτέλεσμα οι σχετικές θέσεις των ενεργειακών ζωνών της κατάστασης ισορροπίας να απομακρύνονται κατά eV.



Εικόνα 2.7
Η επαφή p-n υπό ανάστροφη πόλωση.

Οι φορείς πλειονότητας απομακρύνονται από την διεπαφή λόγω πολικότητας έτσι, ώστε να αυξάνει και το μήκος της ζώνης απογύμνωσης. Από την άλλη πλευρά, οι φορείς μειονότητας δεν συναντούν κανένα φραγμό, αλλά διευκολύνεται η διέλευσή τους μέσω της διεπαφής, με αποτέλεσμα τη ροή του ανάστροφου ρεύματος που λέγεται ρεύμα διαρροής. Με τον όρο "φορείς αγωγιμότητας" εννοούμε και τα ηλεκτρόνια και τις οπές. Εξαιτίας τους το συνολικό ρεύμα των φορέων αγωγιμότητας κατά μήκος της διεπαφής είναι $I = I_e + I_h$. Η συμπεριφορά του ρεύματος των οπών στις διάφορες καταστάσεις πόλωσης είναι ίδια με αυτή του ρεύματος των ηλεκτρονίων.

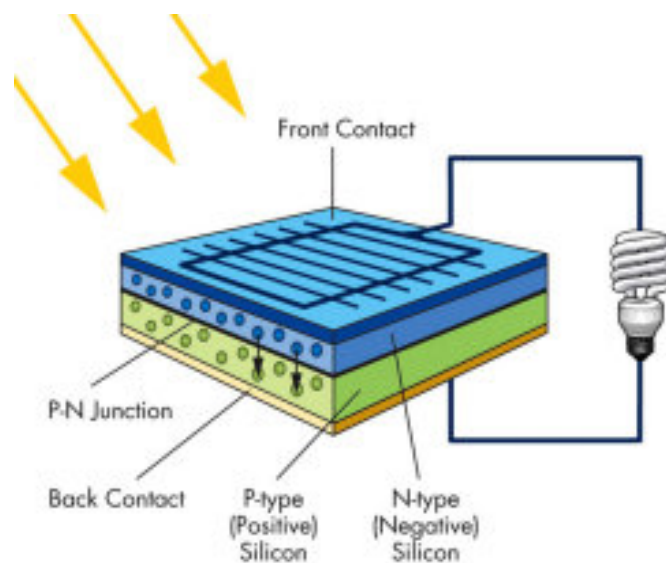
Η επαφή p-n είναι μία ημιαγώγιμη διάταξη η οποία λειτουργεί ως ανορθωτής. Έτσι κατά την εφαρμογή θετικού δυναμικού στην επαφή το ρεύμα είναι σχετικώς μεγάλο προς την θετική φορά n – p , ενώ κατά την εφαρμογή αρνητικού δυναμικού, το ρεύμα είναι πολύ μικρό κατά την αντίθετη φορά. Έτσι αν μία εναλλασσόμενη τάση εφαρμοστεί κατά μήκος της επαφής p-n, το ρεύμα ρέει κυρίως μόνο κατά μία διεύθυνση δηλαδή η επαφή p-n ανορθώνει το ρεύμα. Στην εικόνα 2.8 απεικονίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας επαφής p-n που δείχνει την ανορθωτική ιδιότητα της επαφής.



Εικόνα 2.8
Η χαρακτηριστική καμπύλη για επαφή p-n.

2.5 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Εκτός από την δημιουργία φορέων αγωγιμότητας λόγω θερμικής διέγερσης σε έναν ημιαγωγό είναι δυνατόν να έχουμε και φωτοδιέγερση. Έτσι όταν προσπίπτει φως σε μία επαφή p-n, χωρίς την εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού, γνωρίζουμε από το φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας ότι η απορρόφηση ενός φωτονίου δημιουργεί ένα ηλεκτρόνιο και μία οπή δηλαδή διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους, το οποίο διαμέσου του ενεργειακού χάσματος μεταφέρεται στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή. Πριν το φωτισμό υπήρχαν φορτία εκατέρωθεν της επαφής, θετικά στη περιοχή n και αρνητικά στη περιοχή p, δημιουργώντας την περιοχή απογύμνωσης και το φράγμα δυναμικού. Μετά την απορρόφηση των φωτονίων οι δημιουργούμενοι φορείς αγωγιμότητας, εντός της περιοχής απογύμνωσης φορτίου, διαχωρίζονται λόγω της ύπαρξης του ηλεκτρικού πεδίου. Η κίνηση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και των οπών έχει ως συνέπεια την εμφάνιση ενός δυναμικού θετικής φοράς στα άκρα της επαφής το οποίο είναι αντίθετο του δημιουργούμενου πεδίου στην επαφή.



Εικόνα 2.9
Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σχηματικά.

Η εμφάνιση του δυναμικού αυτού θετικής φοράς κατά μήκος της φωτισμένης επαφής ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο και χαρακτηρίζει την μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Μεγάλες επιφάνειες επαφών p-n ημιαγωγών προσμίξεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Μια

τέτοια ηλεκτρονική διάταξη ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο ή ηλιακό κύτταρο. Άνω του 95% των παγκοσμίως παραγόμενων ηλιακών κυττάρων βασίζονται στο πυρίτιο (Si), υλικό που υπάρχει στη φύση σε τεράστια αποθέματα, κάτι που καθιστά τις εν λόγω διατάξεις περιβαλλοντικά φιλικές.

2.6 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Ένα ιδανικό ηλιακό κύτταρο μπορεί να αντιπροσωπευθεί από μια πηγή που συνδέεται παράλληλα με μια δίοδο. Έτσι λοιπόν, η εξίσωση μίας πραγματικής διόδου περιγράφεται από την εξίσωση Shockley για τα ηλιακά κύτταρα όπως φαίνεται παρακάτω.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right) \quad (2.30)$$

όπου,

V : η τάση στα άκρα του κυττάρου

q : το ηλεκτρικό φορτίο

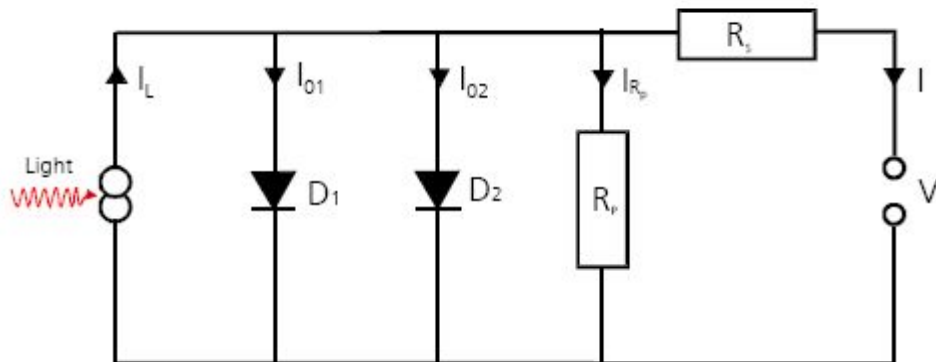
k_B : η σταθερά του Boltzmann

T : η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

I_0 : το ρεύμα κόρου

Το I_0 χρησιμεύει και ως μια υπενθύμιση ότι ένα ηλιακό κύτταρο στο σκοτάδι συμπεριφέρεται ως μία απλή δίοδος. Στα πραγματικά ηλιακά κύτταρα σημειώνεται απώλεια ισχύος λόγω των αντιστάσεων των ωμικών επαφών καθώς και διαρροών ρευμάτων περιμετρικά της διάταξης. Από ηλεκτρονικής άποψης αυτά τα φαινόμενα μπορούν να εξισωθούν με δύο παρασιτικές αντιστάσεις, η μία παράλληλα (R_{sh}) και η άλλη σε σειρά (R_s) με το κύτταρο, οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση των ηλιακών κυττάρων. Η παράλληλη αντίσταση οφείλεται σε διαρροές του ρεύματος στο σώμα του κυττάρου, περιμετρικά της διάταξης και μεταξύ επαφών διαφορετικής πολικότητας. Συγκεκριμένα, η τιμή της αντίστασης αυτής καθορίζεται από τα ρεύματα διαρροής στις άκρες του ηλιακού κυττάρου και από ανωμαλίες στη ένωση p-n. Τέτοιες ανωμαλίες μπορεί να είναι για παράδειγμα κάποια ασυνέχεια στην ένωση p-n, η οποία δημιουργήθηκε κατά τη διάχυση του n-type ή από άτομα μη ηθελημένων προσμίξεων δηλαδή διαφορετικών των δοτών ή δεκτών που εμποδίζουν τη διάχυση σε συγκεκριμένα σημεία. Το υλικό της βάσης μπορεί επίσης να δημιουργήσει

ηλεκτρική επαφή με τα fingers σε μερικά σημεία, δημιουργώντας επομένως ένα βραχύκλωμα. Αντίθετα στην αντίσταση σε σειρά συνεισφέρουν τρεις βασικές συνιστώσες η αντίσταση επαφής μετάλλου-ημιαγωγού, η ωμική αντίσταση στις μεταλλικές επαφές και η ωμική αντίσταση στο υλικό του ημιαγωγού.



Εικόνα 2.10

Ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου με το μοντέλο των δύο διόδων

Στην πράξη ένα πραγματικό ηλιακό κύτταρο διαφέρει από ένα ιδανικό. Για να περιγραφεί καλύτερα ένα πραγματικό ηλιακό κύτταρο χρησιμοποιείται το μοντέλο των δύο διόδων. Στην εικόνα 2.10 φαίνεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου που περιγράφεται με το υπόδειγμα των δύο διόδων. Η απλή εκθετική σχέση μεταξύ της τάσης και της πυκνότητας ρεύματος δεν παρατηρείται σχεδόν ποθενά σε χαμηλές τάσεις σε ένωση p-n πραγματικού ηλιακού κυττάρου. Για συμβατικές διόδους, αυτό έχει πολύ μικρή σημασία, αλλά για ηλιακά κύτταρα η λειτουργική εξάρτηση σε αυτό το εύρος τάσης είναι πολύ σημαντική. Ο παράγοντας πλήρωσης και επομένως η απόδοση επηρεάζονται σημαντικά από αυτό. Εξαιτίας των παρασιτικών αντιστάσεων, η εξίσωση της διόδου μετατρέπεται σε:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{(V+IR_s)/n_1V} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{(V+IR_s)/n_2V} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2.31)$$

2.7 Ρεύμα σκότους

Η τάση στα άκρα του κυττάρου, παρουσία φορτίου, επάγει στο συνολικό κύκλωμα ένα ρεύμα αντίθετης φοράς από αυτή του φωτορεύματος που μειώνει το συνολικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό καλείται ρεύμα σκότους, I_{dark} . Τα περισσότερα ηλιακά κύτταρα στο σκοτάδι συμπεριφέρονται ως δίοδοι, επιτρέποντας πολύ μεγαλύτερα ρεύματα υπό ορθή πόλωση ($V > 0$) σε σχέση με τις τιμές της ανάστροφης ($V < 0$). Αυτή η ανορθωτική συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική για τα ηλιακά κύτταρα καθώς απαιτείται μια ασύμμετρη διεπαφή για να συντελεστεί διαχωρισμός φορτίων. Για μια ιδανική δίοδο το ρεύμα σκότους, I_{dark} δίδεται από τη σχέση:

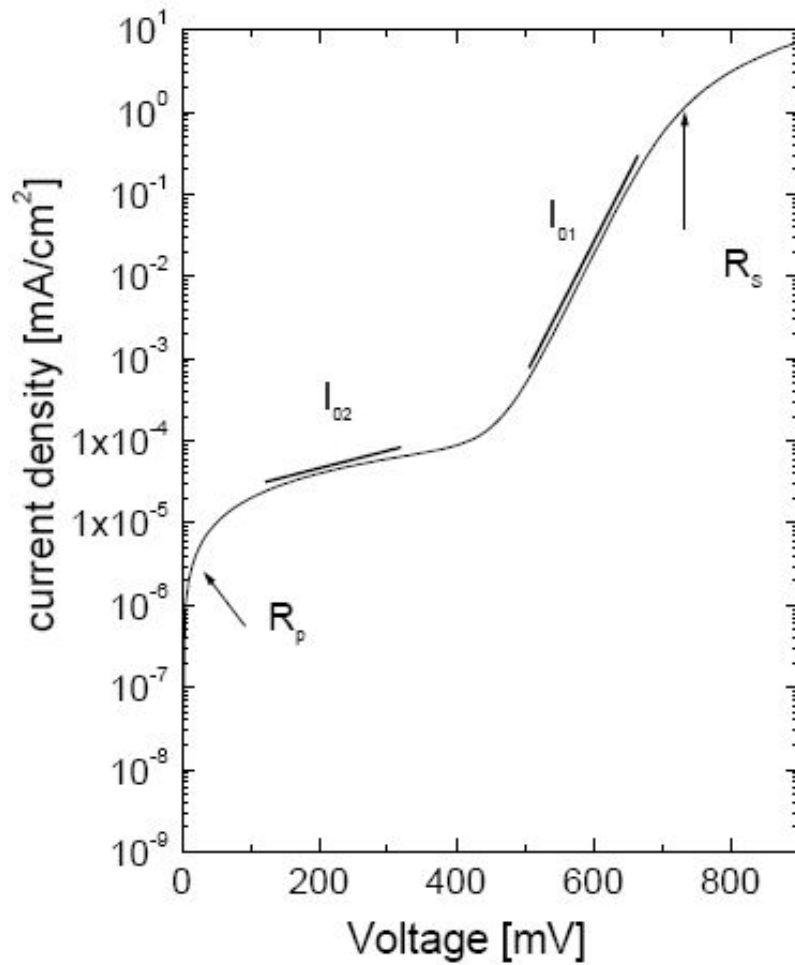
$$I_{\text{dark}}(V) = I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right) \quad (2.32)$$

όπου:

I_0 : το ρεύμα κόρου

k_B : η σταθερά του Boltzmann

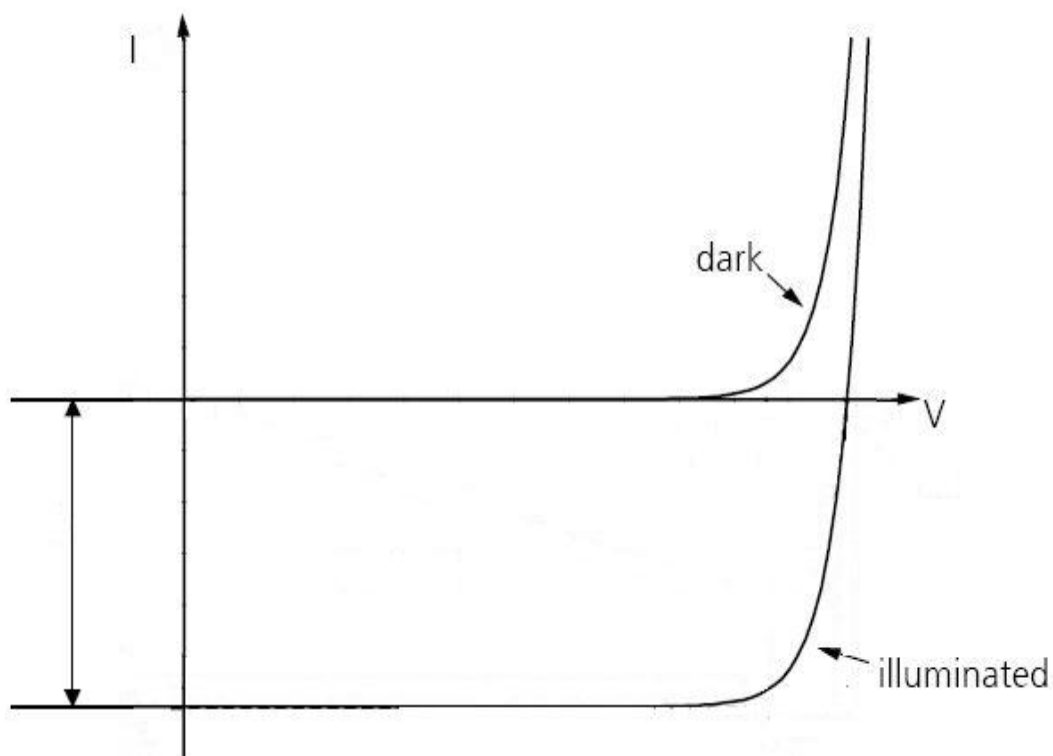
Από μία τυπική χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης σε συνθήκες σκότους μπορούν να προσδιοριστούν η παράλληλη αντίσταση (R_p), τα I_{01} και I_{02} , και η αντίσταση σε σειρά (R_s). Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.11 στην περιοχή έναρξης από το 0 έως σχεδόν 150mV οι δύο πρώτοι όροι στην εξίσωση 2.31 είναι αμελητέοι και το σκοτεινό ρεύμα καθορίζεται κυρίως από την παράλληλη αντίσταση R_p . Στην περιοχή από 200mV έως 400mV το σκοτεινό ρεύμα μπορεί να προσδιοριστεί από τον δεύτερο όρο του μοντέλου διπλής δίοδου. Στην κλίμακα 400mV έως 600mV το σκοτεινό ρεύμα εξαρτάται από τον πρώτο όρο της εξίσωσης 2.31. Αν η εξάρτηση είναι σύμφωνα με την τιμή $n=1$, τότε το ρεύμα κόρου I_{01} , μπορεί να καθοριστεί από αυτό. Τέλος, στην περιοχή από το 600mV και πάνω η αντίσταση σε σειρά έχει μια σημαντική επιρροή στη χαρακτηριστική.



Εικόνα 2.11

Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ηλιακού κυττάρου σε συνθήκες σκότους

Η συνολική I-V χαρακτηριστική του κυττάρου μπορεί να προσεγγιστεί σαν το άθροισμα του φωτορεύματος I_{SC} και του I_{dark} (εικόνα 2.12). Η σύμβαση προσήμου στα φωτοβολταϊκά είναι τέτοια ώστε το φωτόρευμα να είναι θετικό, σε αντίθεση με τη συνήθη σύμβαση των ηλεκτρικών συσκευών όπου το ρεύμα σκότους θεωρείται θετικό.



Εικόνα 2.12

Χαρακτηριστική I-Vόπου φαίνεται το φωτόρευμα και το ρεύμα σκότους ενός ηλιακού κυττάρου.

Έτσι με αυτή τη σύμβαση προσήμου το συνολικό ρεύμα του κυττάρου δίδεται από τη σχέση:

$$I(V) = I_{ph} - I_{dark}(V) \quad (2.33)$$

η οποία για μια ιδανική δίοδο μετατρέπεται στην:

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right) \quad (2.34)$$

όπου:

I_0 : το ρεύμα κόρου

k_B : η σταθερά του Boltzmann

2.8 Τάση ανοικτού κυκλώματος και ρεύμα βραχυκύκλωσης

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος $V=V_{OC}$. Αυτή η κατάσταση ισοδυναμεί με αλληλοεξουδετέρωση των δύο αντιθέτων ρευμάτων. Έτσι, για την ιδανική δίοδο προκύπτει:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \frac{\ddot{o}}{\emptyset} \quad (2.35)$$

Από την I-V χαρακτηριστική προκύπτει το συμπέρασμα ότι το κύτταρο παράγει ισχύ ($P=V \times I > 0$) όταν $0 < V < V_{OC}$. Για $V < 0$ η συσκευή λειτουργεί ως φωτοανιχνευτής και καταναλώνει ενέργεια για να παράγει φωτόρευμα ανεξάρτητο του φωτός αλλά εξαρτημένο της πόλωσης. Τέλος, για $V > V_{OC}$ η συσκευή και πάλι καταναλώνει ενέργεια.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης όπως υπονοεί η ονομασία, είναι το ρεύμα που διαρρέει το ηλιακό κύτταρο όταν είναι βραχυκλωμένο, π.χ. δεν εφαρμόζεται καμία τάση στο κύτταρο. Αυτό το ρεύμα ορίζεται ανωτέρω στη σχέση 2.30. Από την εξίσωση (2.30) βρίσκουμε ότι

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (2.36)$$

π.χ. το ρεύμα βραχύκλωσης είναι ίσο με την ποσότητα ρεύματος απόλυτου φωτός.

2.9 Κβαντική απόδοση

Όπως αναφέρθηκε, το φωτόρευμα που παράγεται από ένα ηλιακό κύτταρο υπό συνθήκες φωτισμού και βραχυκυκλώσεως εξαρτάται από το προσπίπτον φως. Το φυσικό μέγεθος που συνδέει το I_{SC} με το προσπίπτον φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η κβαντική απόδοση του κυττάρου, QE. Η $QE(E)$ εκφράζει την πιθανότητα ένα φωτόνιο ενέργειας E να παράγει ένα ηλεκτρόνιο στο εξωτερικό κύκλωμα. Έτσι ισχύει:

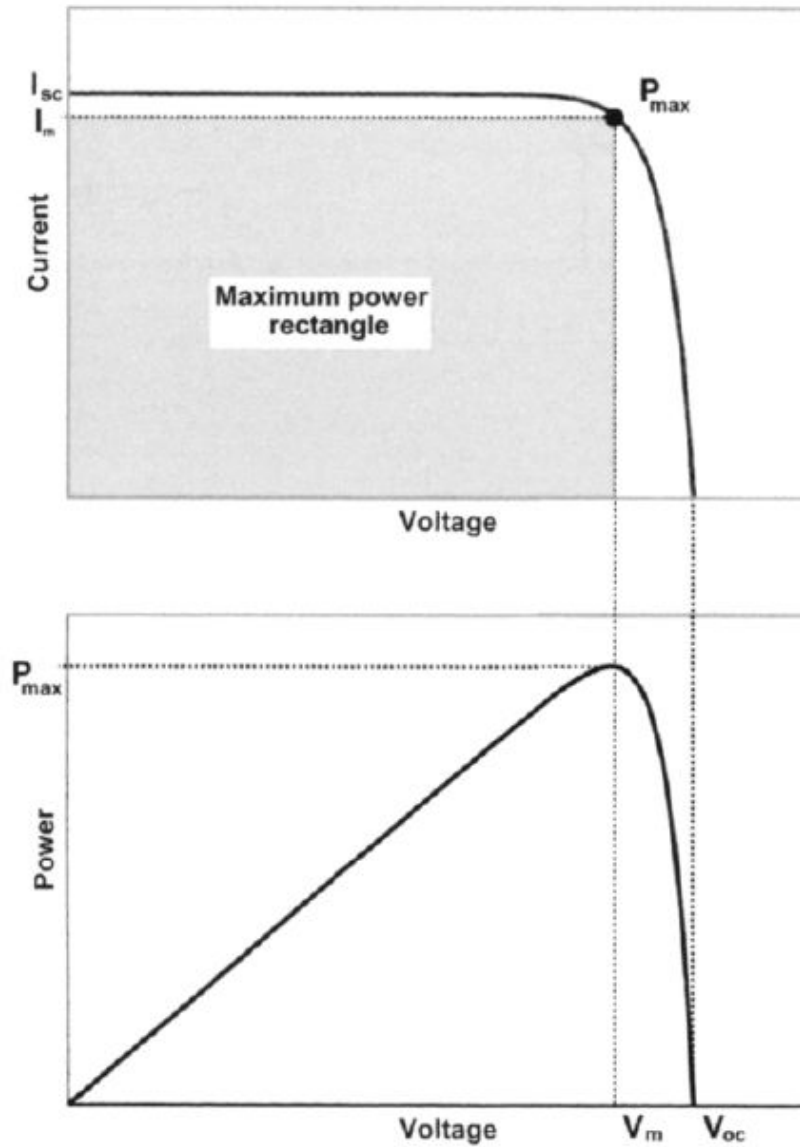
$$I_{SC} = q \phi_s(E) QE(E) dE \quad (2.37)$$

όπου:

b_s : φασματική πυκνότητα της φωτεινής δέσμης, δηλαδή ο αριθμός φωτονίων με ενέργειες από E έως $E+dE$ που προσπίπτουν ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου στο ηλιακό κύτταρο. Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση, και επιβεβαιώνεται στο παρακάτω διάγραμμα, το προκύπτον ρεύμα εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Έτσι, αύξηση της b_s σημαίνει και ταυτόχρονη αύξηση του I_{sc} .

Η QE εξαρτάται από τον συντελεστή απορρόφησης του υλικού, την απόδοση με την οποία συντελείται ο διαχωρισμός των φορτίων, και την απόδοση συλλογής φορτίων από αυτό, αλλά είναι ανεξάρτητη από το προσπίπτον φάσμα. Αυτή η ανεξαρτησία την καθιστά ποσότητα κομβικής σημασίας για την περιγραφή της απόδοσης ενός κυττάρου υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.

2.10 Απόδοση ηλιακού κυττάρου



Εικόνα 2.13

Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης(πάνω) και ισχύος-τάσης (κάτω) ηλιακού κυττάρου

Όπως προαναφέρθηκε το καθεστώς λειτουργίας των ηλιακών κυττάρων, κατά το οποίο παράγουν ενέργεια, είναι $0 < V < V_{oc}$. Η ισχύς δίδεται από τη σχέση:

$$P = I' V \quad (2.38)$$

Η P γίνεται μέγιστη στο σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος του κυττάρου. Αυτό εμφανίζεται για κάποιο ζεύγος τιμών V_m , I_m . Επομένως η αντίσταση φορτίου που παρουσιάζει το κύτταρο σε κατάσταση μέγιστης απόδοσης καθορίζεται από το λόγο V_m/I_m .

Ο παράγοντας πλήρωσης (FF: Fill Factor) ορίζεται ως ο λόγος:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad (2.39)$$

και είναι το μέτρο 'τετραγωνικότητας' της χαρακτηριστικής I-V.

Η απόδοση η του κυττάρου ορίζεται ως η απόδοση η οποία παρέχεται στο σημείο μέγιστης ισχύος δια της πυκνότητας ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας P_s σε εμβαδό περιοχής S :

$$h = \frac{I_m V_m}{P_s} \quad (2.40)$$

Μπορούμε να συσχετίσουμε την απόδοση και τον παράγοντα πλήρωσης με τον εξής τύπο:

$$h = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{P_s} \quad (2.41)$$

όπου οι παράμετροι V_{oc} , I_{sc} , FF και η χαρακτηρίζουν πλήρως την απόδοση ενός ηλιακού κυττάρου. Ο καθορισμός αυτών των παραμέτρων γίνεται σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού, οι οποίες ονομάζονται Πρότυπες Συνθήκες Μετρήσεων (Standard Test Conditions) και περιλαμβάνουν

- (1) φάσμα αέριας μάζας 1.5
- (2) ένταση ισχύος εισόδου 1000 W/m^2
- (3) θερμοκρασία $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.11 Εξάρτηση της απόδοσης από την ακτινοβολία

Υποθέτουμε ότι το ρεύμα βραχύκλωσης I_{SC} είναι ανάλογο με την ένταση της ακτινοβολίας. Επίσης αντικαθιστούμε την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} στον τύπο για την απόδοση με

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC}}{I_0} \quad (2.42)$$

Επομένως ο τύπος για την απόδοση γίνεται

$$h = I_{SC} \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC}}{I_0} / P_{light} \quad (2.43)$$

όπου P_{light} είναι η ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Η εξάρτηση από τη θερμοκρασία του παράγοντα πλήρωσης μπορεί να αγνοηθεί εδώ και μετά από κάποια μεθόδευση βρίσκουμε ότι για την αλλαγή της σχετικής απόδοσης έχουμε ότι

$$\frac{Dh}{h} = \frac{\ln n}{\ln(I_{SC} / I_0)} \quad (2.44)$$

όπου n είναι ο παράγοντας της αέριας μάζας της ακτινοβολίας του φωτός [$n=1$ αντιστοιχεί σε ένταση ενός ήλιου, $n=0.5$ αντιστοιχεί σε ένταση μισού ήλιου].

Εισάγοντας V_{oc} βρίσκουμε για την αλλαγή σχετικής απόδοσης

$$\frac{Dh}{h} = \frac{kT}{q} \frac{\ln n}{V_{oc}} \quad (2.45)$$

Με την τιμή για πυρίτιο

$$\frac{kT}{q} \frac{\ln n}{V_{oc}} \gg \sim 0.04$$

Και βρίσκουμε ως εμπειρικό κανόνα

$$\frac{Dh}{h} [\%] \gg 4' \ln n \quad (2.46)$$

Επομένως η απόδοση ενός ηλιακού κυττάρου πυριτίου μειώνεται , για παράδειγμα μια μείωση της απόδοσης σχεδόν 3% αντιστοιχεί στο μισό της έντασης της ακτινοβολίας[3].

2.12 Επίδραση της συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ηλιακού κυττάρου.

Σε χαμηλές τιμές συγκεντρώσεων ηλιακής ακτινοβολίας ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά από τη γνωστή θεωρία για επαφή p-n όπως περιγράφεται στην αρχή του κεφαλαίου. Σε συνθήκες χαμηλής συγκέντρωσης ακτινοβολίας τα ποσοστά επανασύνδεσης των φορέων μειονότητας είναι γραμμικά και οι πυκνότητες ρεύματος εξαρτώνται [4]

α) από το ρεύμα σκότους I_{dark} που εξαρτάται από την τάση και είναι ανεξάρτητο από την πόλωση

β) από το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} που εξαρτάται από την πυκνότητα ροής και ενεργεί στην αντίθετη κατεύθυνση.

$$I(V) = I_{sc} - I_{dark}(V) \quad (2.47)$$

Αντικαθιστώντας το ρεύμα σκότους η παραπάνω εξίσωση έχει τη συγκεκριμένη μορφή

$$I(V) = I_{sc} - I_0 \frac{\exp(qV/mk_B T) - 1}{\exp(qV/mk_B T)} \quad (2.48)$$

Τώρα εάν η συνεχής ροή του φωτός b_s αυξάνεται κατά έναν παράγοντα X μέσω της συγκέντρωσής του, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} θα αυξηθεί σε μια πρώτη προσέγγιση κατά τον ίδιο παράγοντα

$$I_{sc} (X b_s) \gg X_{sc} (b_s) \quad (2.49)$$

αλλά αφήνει το ρεύμα σκότους ανεπηρέαστο. Αυτό σημαίνει ότι σε οποιαδήποτε δεδομένη πόλωση κάτω από την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} το ρεύμα αυξάνεται με το X . Έτσι λοιπόν αντικαθιστώντας I_{sc} με $X I_{sc}$ στην εξίσωση 2.48 βλέπουμε ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος γίνεται

$$V_{oc} (X) = \frac{mk_B T}{q} \ln \frac{\alpha X I_{sc}}{I_0} + 1 \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}} \gg V_{oc} (1) + \frac{mk_B T}{q} \ln X \quad (2.50)$$

Κατά συνέπεια η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνεται λογαριθμικά με το X και εάν ο παράγοντας πλήρωσης παραμένει ο ίδιος η ισχύς που παράγεται από το ηλιακό κύτταρο πρέπει να αυξηθεί κατά έναν παράγοντα

$$X \frac{\alpha}{e} 1 + \frac{mk_B T}{q V_{oc} (1)} \ln X \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}} \quad (2.51)$$

και η απόδοση κατά έναν παράγοντα

$$\frac{\alpha}{e} 1 + \frac{mk_B T}{q V_{oc} (1)} \ln X \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}} \quad (2.52)$$

2.13 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση

Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός ηλιακού κυττάρου καθορίζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, από τα χαρακτηριστικά του πλαισίου στο οποίο είναι τοποθετημένο, από την ένταση του φωτός που προσπίπτει στο πλαίσιο και από άλλες μεταβλητές όπως είναι η ταχύτητα του αέρα. Το ρεύμα κόρου I_0 αυξάνεται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με την εξίσωση

$$I_0 = BT^g \exp\left\{-\frac{E_{g0}}{kT}\right\} \quad (2.53)$$

Όπου

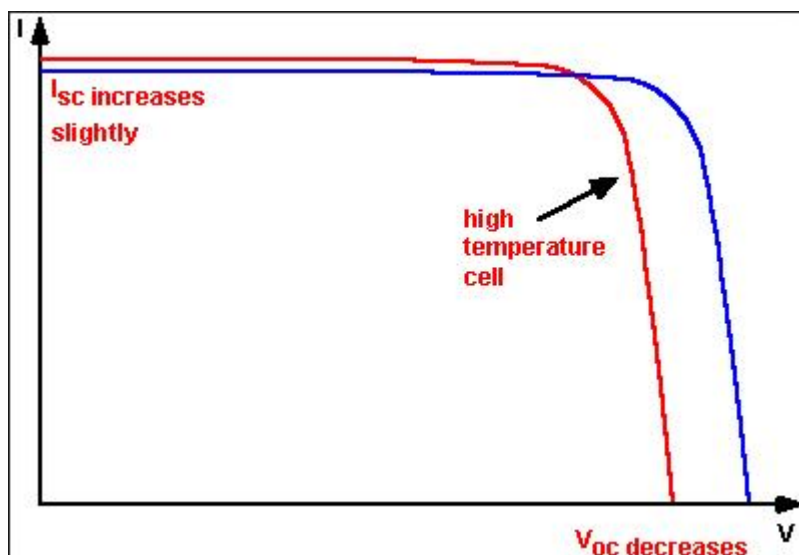
το B είναι συντελεστής ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία

E_{g0} το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού ($T=0$) από τον οποίο κατασκευάστηκε το κύτταρο
 γ περιλαμβάνει τις εξαρτήσεις της θερμοκρασίας των υπόλοιπων παραμέτρων που καθορίζουν το I_0 .

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) αυξάνεται με τη θερμοκρασία, μέχρι το ενεργειακό χάσμα (E_g) ελαττωθεί και περισσότερα φωτόνια έχουν αρκετή ενέργεια για να δημιουργήσουν ζεύγη ηλεκτρονίου - οπής. Ωστόσο, αυτό είναι μια μικρή επίδραση. Για το πυρίτιο ισχύει ότι:

$$\frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT} \gg +0.0006 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (2.54)$$

Η κύρια επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας για τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου είναι μια μείωση στην τάση ανοιχτού κυκλώματος, στον παράγοντα πλήρωσης και ως εκ τούτου στην παραγωγή ενέργειας από το κύτταρο [5]. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στο παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 2.14

Επίδραση της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη ενός ηλιακού κυττάρου.

Η εξάρτηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του παράγοντα πλήρωσης από την θερμοκρασία για το πυρίτιο προσεγγίζεται [6, 7] από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{-\frac{q}{k} \left(V_{g0} - V_{oc} + g \left(\frac{kT}{q} \right) \right)}{T} \gg -2mV / ^\circ C \quad (2.55)$$

$$\frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} \gg -0.003 ^\circ C^{-1} \quad (2.56)$$

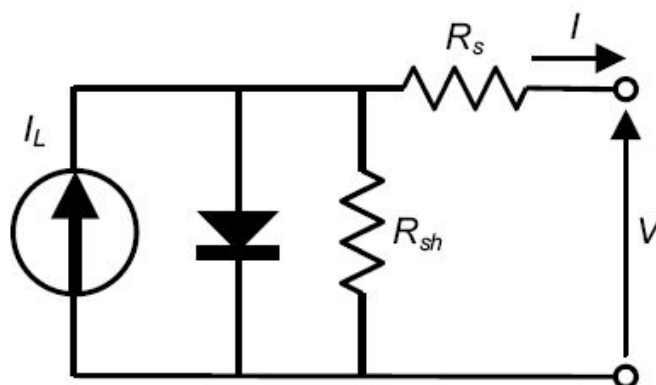
$$\frac{1}{FF} \frac{d(FF)}{dT} \gg \frac{1}{6} \frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{1}{T} \gg -0.0015 ^\circ C^{-1} \quad (2.57)$$

Για το πυρίτιο η επίδραση της θερμοκρασίας στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι η ακόλουθη:

$$\frac{1}{P_{mp}} \frac{dP_{mp}}{dT} \gg - (0.004 : 0.005) ^\circ C^{-1} \quad (2.58)$$

2.14 Επίδραση των παρασιτικών αντιστάσεων στην απόδοση

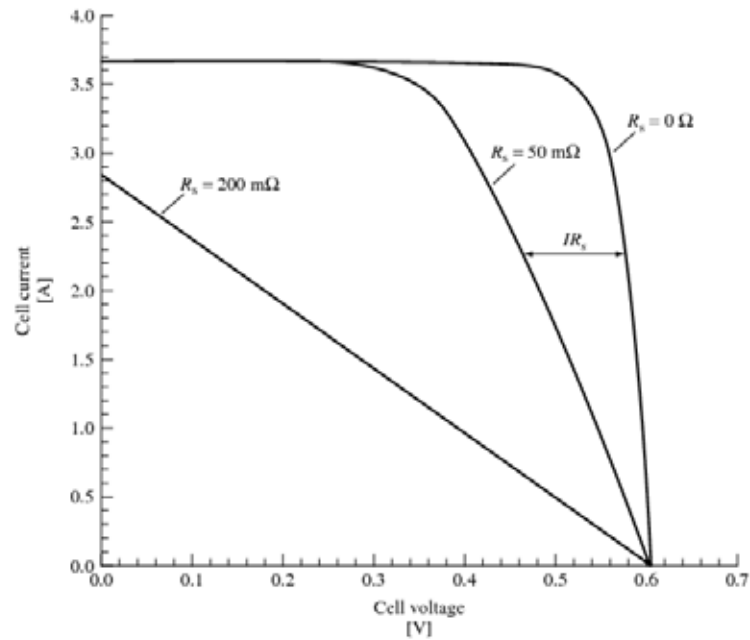
Τα ηλιακά κύτταρα γενικά έχουν μία αντίσταση σε σειρά και μία παράλληλη όπως φαίνεται στην εικόνα 2.15. Και οι δύο τύποι παρασιτικών αντιστάσεων επιδρούν στον παράγοντα πλήρωσης και τον μειώνουν αισθητά.



Εικόνα 2.15

Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού κυττάρου με εμφανείς τις αντιστάσεις σε σειρά και παράλληλα

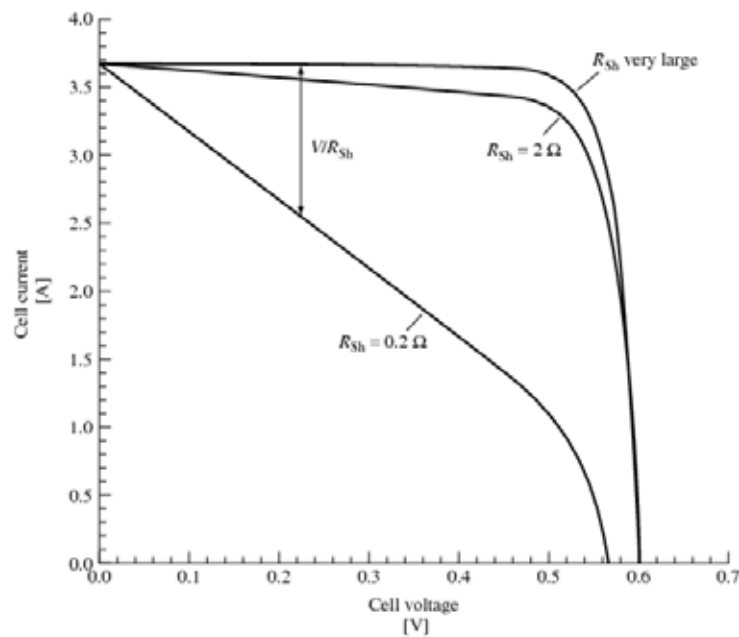
Οι σημαντικότεροι παράγοντες που συνεισφέρουν στην αντίσταση σε σειρά (R_s) είναι η αντίσταση του σώματος (bulk) του ημιαγωγού στην βάση (base) και στον εκπομπό (emitter), των μεταλλικών επαφών και των διασυνδέσεων μεταξύ δύο ηλιακών κυττάρων και της αντίστασης επαφής μεταξύ των μεταλλικών επαφών και του ημιαγωγού. Η επίδραση της αντίστασης σειράς παρουσιάζεται στην εικόνα 2.16.



Εικόνα 2.16

Επίδραση της αντίστασης σε σειρά στη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ενός ηλιακού κυττάρου

Η παράλληλη αντίσταση (R_{sh}) οφείλεται στη μη-ιδανική επαφή p-n. Γενικά προκύπτει από τη διαρροή ρεύματος μέσω του κυττάρου, γύρω από τις άκρες της ηλεκτρονικής διάταξης και μεταξύ των επαφών διαφορετικής πολικότητας. Σχηματικά η επίδραση της παράλληλης αντίστασης παρουσιάζεται στην εικόνα 2.17.



Εικόνα 2.17

Επίδραση της παράλληλης αντίστασης στη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ενός ηλιακού κυττάρου

Έτσι λοιπόν με την παρουσία και των δύο παρασιτικών αντιστάσεων (σε σειρά και παράλληλα), η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ενός ηλιακού κυττάρου (για το μοντέλο της μίας διόδου) δίνεται από την εξίσωση 2.59

$$I = I_L - I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.59)$$

2.15 Ωμικές αντιστάσεις ενός ηλιακού κυττάρου

Οι αντιστάσεις σε σειρά σε ένα ηλιακό κύτταρο[8] είναι οι εξής:

R_{bc} η επαφή μετάλλου-ημιαγωγού στη συνολική κάτω επιφάνεια

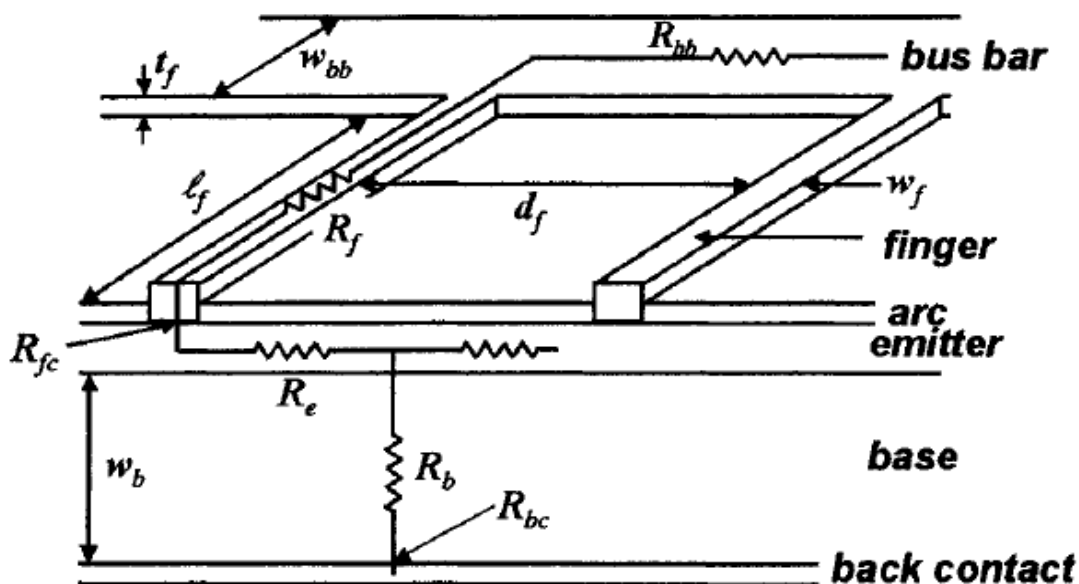
R_b η αντίσταση του υλικού της βάσης

R_e η αντίσταση του εκπομπού μεταξύ δύο fingers

R_{fc} η επαφή μετάλλου-ημιαγωγού στην μπροστά επαφή

R_f η αντίσταση του finger

R_{bb} η αντίσταση του busbar σε επαφή με το flat wire



Εικόνα 2.18

Αντιστάσεις σε σειρά σε ένα ηλιακό κύτταρο

Η συνολική αντίσταση σε σειρά ενός ηλιακού κυττάρου υπολογίζεται αθροίζοντας τις τιμές των επιμέρους αντιστάσεων όπως περιγράφονται παραπάνω λαμβάνοντας υπόψη κάποιες σημαντικές παραδοχές. Συγκεκριμένα η αντίσταση R_{bc} είναι η αντίσταση της επαφής μετάλλου-ημιαγωγού σε όλη την κάτω επιφάνεια και η R_b είναι η αντίσταση του υλικού της βάσης του ημιαγωγού οι οποίες μπορούν να αγνοηθούν σε όλες τις πρακτικές περιπτώσεις. Αν το υλικό επαφής και το πλάτος του δακτύλου είναι επιλεγμένα σωστά, τότε R_{fc} που αντιστοιχεί στην αντίσταση της επαφής μετάλλου-ημιαγωγού κάτω από ένα finger δεν έχει καμία σημαντική συνεισφορά. Οι αντιστάσεις R_e (αντίσταση στον εκπομπό μεταξύ των δύο fingers), R_f (αντίσταση ενός grid line) και κυρίως R_{bb} (αντίσταση του busbar μαζί με το flat wire) κυρίως καθορίζουν την τιμή της αντίστασης σε σειρά. Στον πίνακα 2.1 φαίνονται αναλυτικά οι εξισώσεις που δίνουν τις αντιστάσεις σε ένα ηλιακό κύτταρο.

| Component of resistance | Notation | Expression |
|---|----------|---|
| Emitter resistance | R_e | $R_e = \frac{R_{sp}d_f}{7\ell_f}$ |
| Resistance of the base | R_b | $R_b = AW_b\rho_b$ |
| Contact resistance: front contact | R_{fc} | $R_{fc} = \frac{\sqrt{R_{sp}\rho_{cf}}}{\ell_f} \coth\left(W_f\sqrt{\frac{R_{sp}}{\rho_{cf}}}\right)$ |
| Contact resistance: rear contact | R_{bc} | $R_{bc} = A\rho_{cr}$ |
| Resistance of the finger contact | R_f | $R_f = \frac{\ell_f\rho_m}{3t_fW_f}$ |
| Resistance of the collecting busbar (per unit length) | R_{bb} | $R_{bb} = \frac{\rho_m}{3t_fW_{bb}}$ |

Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των αντιστάσεων σε σειρά σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου [8].

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- [1] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [2] E.Skuras, Παραδόσεις μαθήματος Ημιαγώγιμα-Διηλεκτρικά (2004)
- [3] A. Goetzberger, Knobloch, J., Voss, B., Crystalline Silicon Solar Cells, John Wiley & Sons, Chichester, 1998.
- [4] J. Nelson, The Physics of Solar Cells, Imperial College Press, London, 2003.
- [5] E. Radziemka, Renewable Energy 28 (2003) 1.
- [6] K. Emery, Burdick, J., Caiyem, Y., Dunlavy, D., Field, H., Kroposki, B. & Moriarty, T., in Proceedings of the 25th IEEE PV specialists conference, Washington, 1996, p. 1275.
- [7] D. L. King, Kratochvil, J.A., and Boyson, W.E, in Proc.26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, CA, 1997, p. 1183.
- [8] T. Markvart, L. Castaner, Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation, Elsevier 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Στο τρίτο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής περιγράφεται αναλυτικά το πειραματικό μέρος της εργασίας. Οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, τα μηχανήματα κατασκευής των δειγμάτων καθώς και πρόσθετα μέρη των διατάξεων που αφορούσαν μετρήσεις θερμοκρασίας ή απαγωγή της από κάποιο δείγμα ή φακοί συγκέντρωσης του ηλιακού φωτός.

Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου περιγράφεται αναλυτικά η διάταξη μετρήσεων και εξαγωγής γραφικών ρεύματος-τάσης που αποτελούν το πιο σημαντικό κομμάτι στο χαρακτηρισμό φωτοβολταϊκών στοιχείων. Φαίνεται γραφικά ο τρόπος σύνδεσης του δείγματος με το source-measure unit και δίνονται λεπτομέρειες του τρόπου ρύθμισης της συσκευής για ασφαλείς μετρήσεις. Στο δεύτερο μέρος περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής αλλά και λειτουργίας του συστήματος ωμικών συνδέσεων και στο τρίτο μέρος αναφέρονται οι αρχές λειτουργίας του συστήματος κοπής λειζερ CO₂ με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι κατασκευές των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών στοιχείων δύο και τριών μεταλλικών επαφών.

Στις τελευταίες ενότητες παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις μέτρησης της θερμοκρασίας των ηλιακών κυττάρων, καθώς και η διάταξη μετρήσεων με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας κάνοντας λεπτομερή αναφορά στα επιμέρους τμήματά της (φακοί Fresnel, δεξαμενές θερμότητας).

3.2 Σύστημα μετρήσεων

Τα περισσότερα προβλήματα στη μέτρηση των ηλιακών κυττάρων σχετίζονται με την υψηλή χωρητικότητα που δημιουργείται στην επαφή p-n λόγω της ορθής πόλωσης. Συγκρινόμενη με την ανάστροφη πόλωση, η ορθή πόλωση παρουσιάζει το φαινόμενο της χωρητικότητας σε μεγαλύτερο βαθμό επειδή οι φορείς αγωγιμότητας είναι πιο κοντά μεταξύ τους. Έτσι λοιπόν όσο το μέγεθος του ηλιακού κυττάρου και η περιοχή της επαφής p-n μεγαλώνουν, τόσο το πρόβλημα γίνεται εντονότερο.

Η μεθοδολογία της μέτρησης στηρίζεται στη λογική της χρησιμοποίησης μιας πηγής (τάσης ή ρεύματος) και ενός μετρητή (τάσης ή ρεύματος) [1]. Υπάρχουν 2 διαφορετικοί τρόποι μέτρησης. Ο πρώτος περιλαμβάνει μια πηγή τάσης και ένα μετρητή ρεύματος στην οποία η πηγή που εμπεριέχει μια σύνθετη αντίσταση μπορεί γρήγορα να οδηγήσει ένα ηλιακό κύτταρο στο σημείο μέγιστης λειτουργίας, παρά τη δαπάνη που απαιτείται για να αλλάξει την τάση σε μια επαφή p-n. Εντούτοις, η πηγή μπορεί να γίνει ασταθής με τα χωρητικά φορτία, τα οποία μπορούν να απαιτήσουν περαιτέρω ρυθμίσεις στη μεθοδολογία της μέτρησης. Η εναλλακτική λύση, είναι το ρεύμα σαν πηγή και η τάση σαν μετρούμενο μέγεθος. Ο χρόνος για τη διαδικασία της μέτρησης είναι μεγαλύτερος γιατί στα χαμηλά ρεύματα παίρνει πολύ χρόνο να μειωθεί η χωρητικότητα των κυττάρων και επιπλέον μπορεί να δημιουργηθεί ένας μικρός θόρυβος στις μετρήσεις στα υψηλότερα ρεύματα [2].

Με τα ηλιακά κύτταρα τελευταίας γενιάς που παράγουν ρεύματα μεγαλύτερα από 8A τα προβλήματα που συζητήθηκαν μπορούν να είναι αξεπέραστα και να απαιτήσουν μια διαφορετική λύση. Στη παρούσα εργασία για να παραχθεί μια I-V χαρακτηριστική καμπύλη από την οποία θα υπολογιστούν τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ηλιακού κυττάρου εφαρμόζεται ένα ρεύμα με τη μορφή σάρωσης (sweep) αποτελούμενο από πολυάριθμα βήματα μετρώντας παράλληλα την προκύπτουσα τάση στα άκρα του δείγματος. Αυτός είναι ουσιαστικά και ο τρόπος μέτρησης ο οποίος προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ηλιακού κυττάρου όταν αυτό εκτίθεται στο φως. Το φαινόμενο της χωρητικότητας είναι το βασικό πρόβλημα κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας μέτρησης επειδή όπως προαναφέραμε εμποδίζει να πραγματοποιηθούν γρήγορα οι μετρήσεις ρεύματος – τάσης (I-V) και μετέπειτα επειδή μπορεί να εμφανίσει κάποιο μικρό θόρυβο στην γραφική παράσταση. Όλα τα παραπάνω μπορούν να μετριαστούν με τη χρησιμοποίηση μιας συσκευής ηλεκτρικών μετρήσεων (source-measure unit) η οποία μπορεί να ρυθμιστεί σαν πηγή ρεύματος ή τάσης με ταυτόχρονη μέτρηση ρεύματος, τάσης και αντίστασης. Η συσκευή ηλεκτρικών μετρήσεων

που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι της εταιρείας Keithley και τα βασικά της χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 3.1.



Εικόνα 3.1 Source-measure unit Keithley 2611A

| Function | Capabilities |
|---------------------------|---|
| <i>Source DC Voltage</i> | 1 μ V to 202V |
| <i>Source DC Current</i> | 1pA to 1.515A (10A maximum in pulse mode) |
| <i>Measure DC Voltage</i> | 1 μ V to 204V |
| <i>Measure DC Current</i> | 1pA to 1.53A (10A maximum in pulse mode) |

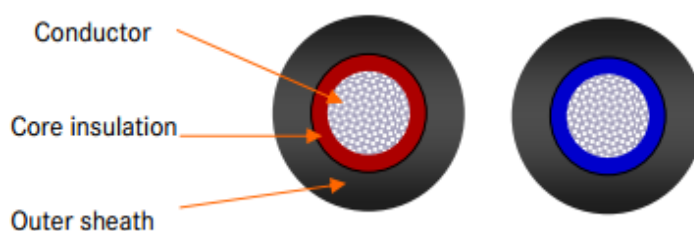
Πίνακας 3.1 Βασικά χαρακτηριστικά του Keithley 2611A

Το Keithley 2611A Sourcemeter αποτελείται από δύο βασικά εργαστηριακά όργανα. Ένα υψηλής ακρίβειας βολτόμετρο/αμπερόμετρο και ένα υψηλής ακρίβειας και σταθερότητας τροφοδοτικό συνεχούς τάσης και ρεύματος με την ιδιομορφία ότι μπορεί να δώσει και παλμικό ρεύμα μέχρι την μέγιστη τιμή των 10A [3]. Η τελευταία του ιδιότητα ήταν αυτή που πρόσφερε μετρούμενα ρεύματα από ηλιακά κύτταρα με μέγιστη τιμή 9.9A. Ανάλογα με τον προγραμματισμό του και το τι συνδέεται στην έξοδό του (φορτίο ή πηγή) μπορεί να λειτουργήσει σαν όργανο τεσσάρων καταστάσεων. Είτε σαν πηγή ενέργειας (τάση και ρεύμα) είτε σαν φορτίο (τάση και ρεύμα).

Ένα επίσης σημαντικό πρόβλημα κατά τη διάρκεια της μέτρησης είναι το φαινόμενο της αυτεπαγωγής που δημιουργείται από τα καλώδια που συνδέουν την συσκευή με το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να μετριαστεί πρώτον με ένα σύστημα καλωδίων που μειώνει το εμβαδόν της περιοχής που δημιουργούν τα καλώδια, το οποίο στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν μεγάλο, επειδή το προς μέτρηση κύκλωμα (στην περίπτωση μας ένα ηλιακό κύτταρο) δεν ήταν κοντά στην πηγή ρεύματος. Δεύτερον, με τη

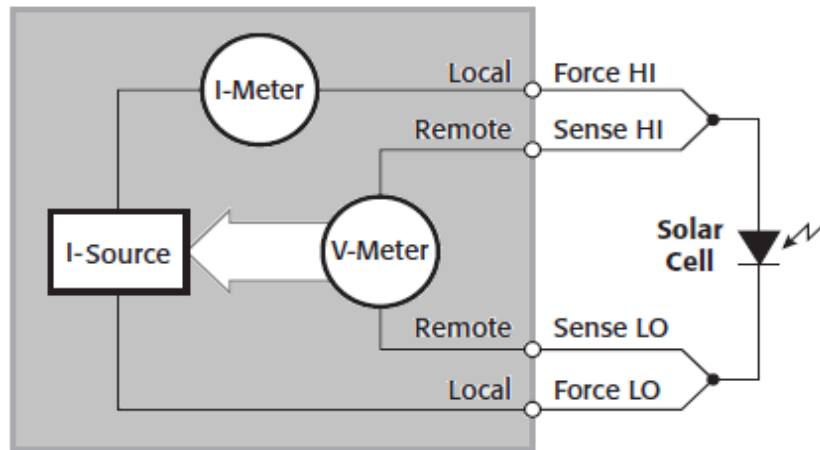
χρησιμοποίηση κατάλληλων καλωδίων ανάλογα με τη φύση των μετρήσεων αν είναι δηλαδή εξωτερικού ή εσωτερικού χώρου. Τρίτον, με το στρίψιμο ενός ζευγαριού καλωδίων και συγκεκριμένα με το ζευγάρι των ακροδεκτών για τα source HI και source LO, που αντιστοιχούν στο ρεύμα της πηγής [4].

Οι μετρήσεις I-V πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τέσσερα μονοαξονικά καλώδια (Εικόνα 3.2) με ειδική μόνωση για μετρήσεις σε φυσικό φωτισμό. Όπως φαίνεται και από την εικόνα το σήμα μεταφέρεται επί του κεντρικού αγωγού, η εσωτερική ασπίδα (κόκκινο χρώμα) χρησιμοποιείται ως προστατευτικό για το σήμα και η εξωτερική επένδυση (μαύρο χρώμα) χρησιμοποιείται για ασφάλεια του χρήστη από υψηλές τάσεις που μπορούν να εφαρμοστούν αλλά και σαν γενικότερη προφύλαξη των αγωγών του σήματος από τις καιρικές συνθήκες. Σημαντικό στοιχείο των μετρήσεων είναι η ύπαρξη τεσσάρων καλωδίων τα οποία είναι αναγκαία για να επιτευχθεί μέτρηση χωρίς σφάλματα.



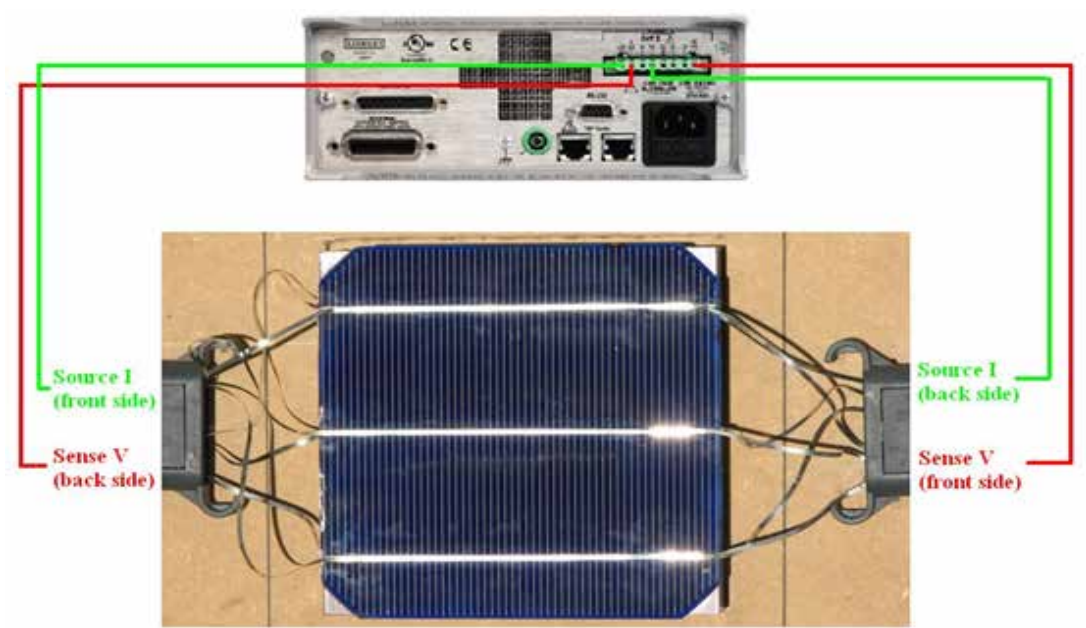
Εικόνα 3.2 Μονοαξονικά καλώδια σύνδεσης του δείγματος με το Keithley για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε φυσικό φωτισμό

Η σύνδεση τεσσάρων σημείων γίνεται για την εξάλειψη της αντίστασης των καλωδίων η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων. Με τη μέθοδο αυτή, μια πηγή ρεύματος συνδέεται στο ηλιακό κύτταρο χρησιμοποιώντας ένα ζεύγος ακροδεκτών (source HI και source LO), και η πτώση τάσεως στα άκρα του κυττάρου μετράται μέσω ενός δευτέρου ζεύγους καλωδίων (HI Sense και LO Sense). Τα καλώδια που αντιστοιχούν στους ακροδέκτες μέτρησης (sence) διασφαλίζουν ότι η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του στοιχείου είναι η πραγματική μετρούμενη τιμή εξόδου και αντισταθμίζει την αντίσταση των καλωδίων όπως μπορεί εύκολα να φανεί από το αναλυτικό διάγραμμα της εικόνας 3.3.



Εικόνα 3.3 Αναλυτικό διάγραμμα της συνδεσμολογίας τεσσάρων σημείων

Στην εικόνα 3.4 φαίνεται η συνδεσμολογία για την μέτρηση της χαρακτηριστικής I-V χρησιμοποιώντας το μοντέλο 2611A της Keithley που περιγράφηκε παραπάνω. Οι συνδέσεις που έχουν γίνει στο κύτταρο για να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα της μέτρησης λόγω και της αντίστασης των μεταλλικών συρμάτων καταλήγουν στις δύο εισόδους του μηχανήματος Source-Sense. Όλες οι μετρήσεις έγιναν υπό φυσικό φωτισμό.



Εικόνα 3.4 Συνδεσμολογία για την μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης σε 3BB μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου

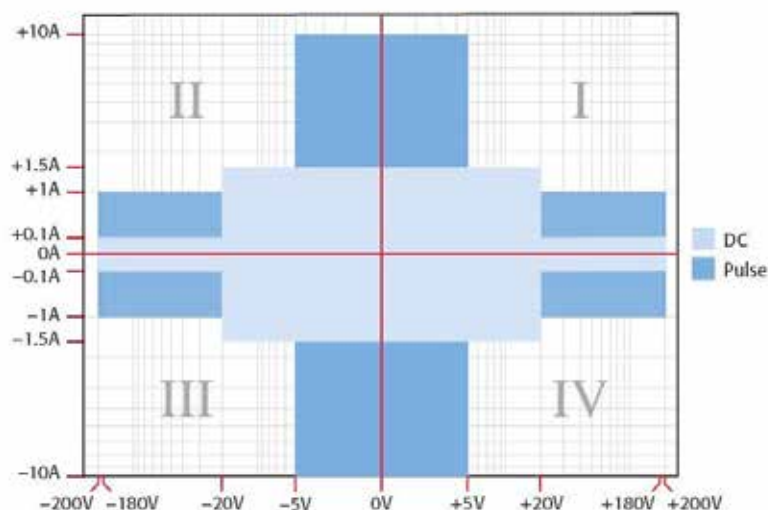
Ένα από τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης ηλεκτρονικής συσκευής είναι το ήδη εγκατεστημένο λογισμικό το οποίο δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω τοπικού δικτύου Lan. Η εφαρμογή TSP Express που χρησιμοποιήθηκε για

την καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V επιτρέπει την αυτόματη ενεργοποίηση της μεθόδου ηλεκτρικών μετρήσεων τεσσάρων σημείων όπως επίσης και την σάρωση του παλμικού ρεύματος μεταξύ προκαθορισμένων τιμών που επιλέγει ο χρήστης.

Συγκεντρωτικά ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ο παρακάτω :

- SMU Keithley 2611A
- Μονοαξονικά καλώδια
- Συσκευή μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας

Γενικά ένα Source-Measure-Unit επιταχύνει την μέτρηση της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης αφού συνδυάζει πηγές και μετρητές ρεύματος και τάσης μεγάλης ακρίβειας και υψηλής ταχύτητας. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5 η πηγή του οργάνου υποστηρίζει τη λειτουργία τεσσάρων - τεταρτημόριων δηλαδή του επιτρέπει να λειτουργήσει σαν μεταβλητή δεξαμενή (ή φορτίο) για ένα ηλιακό κύτταρο [2]. Με τη λειτουργία αυτή, εάν η τάση παραγωγής είναι θετική, το ρεύμα μπορεί να ρεύσει και στις δύο φορές από το ΗΙ τερματικό ενώ η προγραμματιζόμενη τάση να παραμένει σταθερή. Αντιθέτως, ένα θετικό ρεύμα μπορεί να προγραμματιστεί σε μια θετική ή μια αρνητική πηγή τάσης. Συνακόλουθα, μπορεί να μεταστραφεί αυτόματα από πηγή τάσης σε πηγή ρεύματος όταν το φορτίο απαιτεί περισσότερη τάση ή ρεύμα από μία μέγιστη τιμή.



Εικόνα 3.5 Διάγραμμα λειτουργίας τεσσάρων τεταρτημορίων για το source-measure unit 2611A της Keithley

Σε περίπτωση μέτρησης φωτοβολταϊκού στοιχείου με ρεύμα βραχυκύκλωσης μεγαλύτερο από 10A ο προγραμματισμός των συγκεκριμένων ηλεκτρονικών συσκευών επιτρέπει σε περισσότερες από μια πηγές ηλεκτρικού ρεύματος να συνδεθούν παράλληλα με το φορτίο και το ηλεκτρικό ρεύμα που κάθε πηγή παράγει να προστίθεται ξεχωριστά στο κύτταρο. Σύμφωνα με την συνδεσμολογία των παράλληλων πηγών, οι I-V μετρήσεις αρχίζουν με όλες τις πηγές να προγραμματίζονται σε μηδενικό ρεύμα, ώστε να διευκολυνθεί η μέτρηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος ενός ηλιακού κυττάρου υπό συνθήκες φυσικού φωτισμού. Στη συνέχεια της μέτρησης μπορούν να προγραμματιστούν σαν μια συστοιχία πηγών που τα ρεύματά τους αθροίζονται για να μπορέσουν να φθάσουν στο ζητούμενο μέγιστο. Όταν η πρώτη πηγή φθάνει στην τελική τιμή ρεύματος που μπορεί, η επόμενη πηγή στο σύστημα συνεχίζει να προσθέτει το ρεύμα στη σειρά, και ούτω καθεξής. Όλες οι ενεργές πηγές πρέπει να συνδεθούν σύμφωνα με την πολικότητα του ρεύματος του ηλιακού κυττάρου και παράλληλα μεταξύ τους.

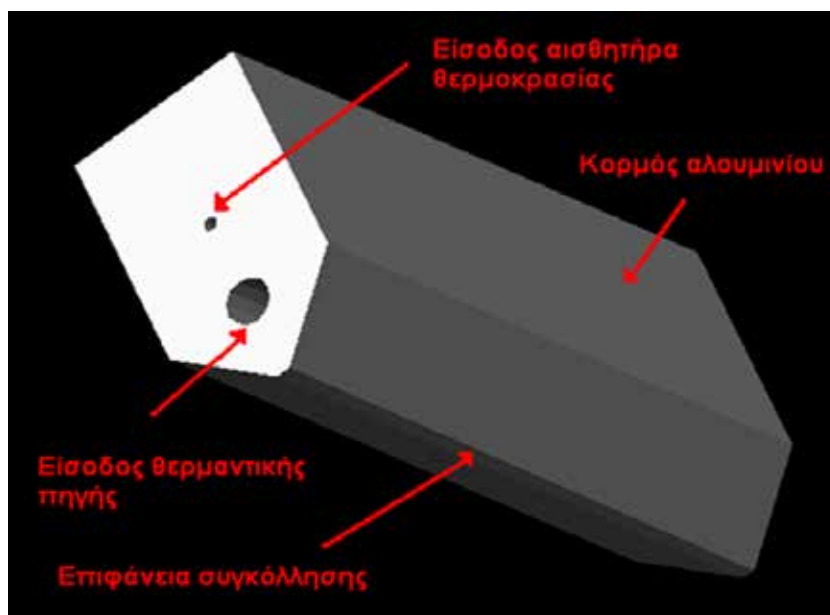
Συμπερασματικά, η μέθοδος στην οποία ρυθμίζεται η ηλεκτρονική συσκευή ως πηγή ρεύματος και μετρητής τάσης είναι αναπόφευκτη, αν και θα πρέπει να υπάρξει ένας συμβιβασμός όσον αφορά στο μικρό θόρυβο που μπορεί να εμφανιστεί και την ταχύτητα στις μετρήσεις. Ακόμα κι έτσι όμως, η κατάλληλη ρύθμιση του οργάνου μπορεί να μειώσει το χρόνο του πειράματος και να περιορίσει πιθανές ασυμμετρίες στη γραφική παράσταση. Επιπλέον, αυτός ο τύπος οργάνου επιτρέπει τη γρήγορη μέτρηση της τάσης και της σάρωσης του ρεύματος.

3.3 Σύστημα κατασκευής ωμικών συνδέσεων

Το μηχανικό σύστημα κατασκευής ωμικών συνδέσεων βασίζεται στις ίδιες αρχές με εκείνα που χρησιμοποιούν οι βιομηχανίες συναρμολόγησης φωτοβολταϊκών πλαισίων (modules) για την σύνδεση των ηλιακών κυττάρων. Έχει την δυνατότητα εφαρμογής θερμοκρασιών συγκόλλησης έως 450 °C που διατηρούνται σταθερές με ακρίβεια ± 1 °C καθ' όλη την διάρκεια της συγκόλλησης. Το σύστημα αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη : α) μία κεραμική θερμαντική εστία της εταιρίας Schott η οποία χρησιμοποιείται στο αρχικό στάδιο για την θέρμανση του φωτοβολταϊκού στοιχείου όπως θα περιγραφεί και παρακάτω β) μία θερμαντική πηγή και γ) από την κεντρική μονάδα ελέγχου[5].

Η θερμαντική πηγή αποτελείται από καθαρό Al (αλουμίνιο) με σημείο τήξης $T_m = 660$ °C . Στην εικόνα 3.6 αποδίδεται σε μορφή μηχανολογικού σχεδίου η θερμαντική πηγή. Το συνολικό βάρος της θερμαντικής πηγής ανέρχεται στα 960 gr. Στην θερμαντική

πηγή προσαρμίζονται ο αισθητήρας θερμοκρασίας (pico Pt100) και η πηγή θερμότητας (300 watt heater cartridge).



Εικόνα 3.6 Τρισδιάστατο σχέδιο της θερμαντικής πηγής για το σύστημα κατασκευής ωμικών συνδέσεων

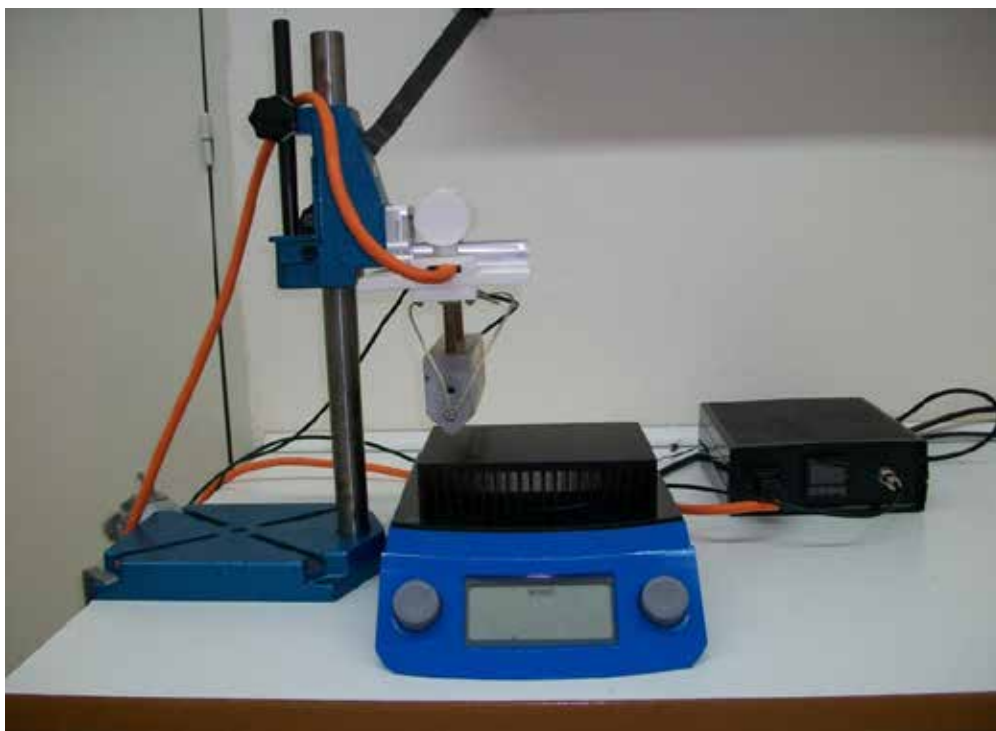
Η επιλογή του υλικού της θερμαντικής πηγής έγινε με βάση την απόδοσή του και ταυτόχρονα το κόστος αυτού. Επίσης, σημαντικός παράγοντας του προς χρήση μετάλλου είναι η θερμική αγωγιμότητα συναρτήσει της πυκνότητάς του. Η χρήση του αργύρου απορρίφθηκε λόγω της ύπαρξης αργύρου στα κράματα των κολλήσεων για την δημιουργία των ωμικών επαφών διότι υπάρχει ο κίνδυνος συσσωμάτωσης. Ο σίδηρος παρουσιάζει πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα ($80 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$), με αποτέλεσμα την μικρή απόδοση της θερμαντικής πηγής. Μεταξύ του χαλκού και του αλουμινίου αν και είναι εμφανής η διαφορά στις τιμές θερμικής αγωγιμότητας ($\kappa_{\text{χαλκού}}=401 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ & $\kappa_{\text{αλουμινίου}}=237 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$), η πυκνότητα των δύο μετάλλων είναι διαφορετική. Πιο συγκεκριμένα $\rho_{\text{Cu}} / \rho_{\text{Al}} = 8.96 / 2.70 = 3.32$. Που σημαίνει ότι, στον ίδιο όγκο υλικού ο χαλκός θα έχει μάζα 3,32 μεγαλύτερη αυτή του αλουμινίου, πράγμα όχι επιθυμητό για μία τέτοια κατασκευή. Επίσης, στην επιφάνεια του αλουμινίου παρατηρείται η δημιουργία μετά από αρκετό χρονικό διάστημα, οξειδίου Al_2O_3 πάχους 1~3 μm με διάφανο χρώμα που έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($\kappa = 35 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$), ενώ στην επιφάνεια του χαλκού παρατηρείται η δημιουργία οξειδίων $\text{CuO-Cu}_2\text{O}$ πάχους 1~3 μm με πράσινο χρώμα με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($\kappa = 90\text{-}390 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$).

Η κεντρική μονάδα ελέγχου αποτελείται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας της θερμοκρασίας Omron E5CN-R2TU 1/16 DIN Temperature controller 220V (Εικόνα 3.7) , την IEC power connector για την θερμαντική πηγή, τη μονάδα DIN 4- Pins για τον αισθητήρα και τέλος την είσοδο IEC power connector για παροχή 220V.



Εικόνα 3.7 Κεντρική μονάδα επεξεργασίας της θερμοκρασίας Omron E5CN-R2TU 1/16 DIN Temperature controller

Η διαδικασία λειτουργίας του συστήματος αρχίζει με την ενεργοποίηση του PID controller ο οποίος χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα της τάξης των 20 λεπτών για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας στην θερμαντική πηγή. Στη συνέχεια ενεργοποιείται η θερμαντική εστία (pre-heat) στην οποία τοποθετείται το ηλιακό κύτταρο που θα πραγματοποιηθούν οι ωμικές συνδέσεις και σταθεροποιείται στην επιλεγόμενη θερμοκρασία. Με τη μεταλλική λαβή φέρνουμε σε επαφή την θερμαντική εστία με το δείγμα ρυθμίζοντας χειροκίνητα το χρόνο και την δύναμη που θα ασκηθεί ανάλογα με τις συνθήκες της κόλλησης που πραγματοποιείται. Στην εικόνα 3.8 φαίνεται μια συνολική εικόνα του συστήματος καθώς και της χειροκίνητης λαβής που το οδηγεί ομαλά σε επαφή με την επιφάνεια του δείγματος.



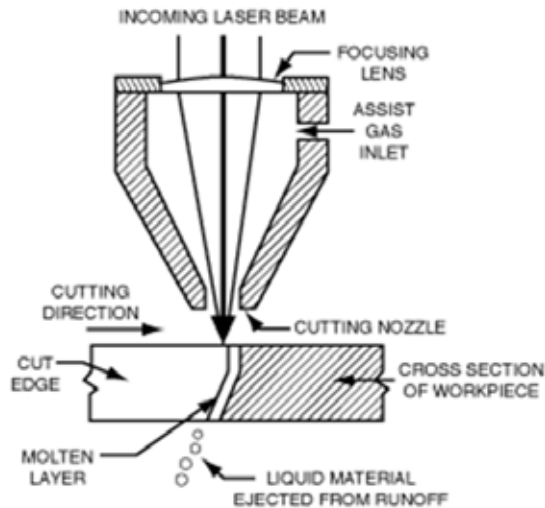
Εικόνα 3.8 Σύστημα κατασκευής ωμικών συνδέσεων. Διακρίνονται α) η θερμαντική πηγή προσαρμοσμένη σε μεταλλική λαβή ώστε να σχηματίζει ορθή γωνία με το ηλιακό κύτταρο, β) η θερμαντική εστία που χρησιμεύει για το pre-heating του κυττάρου και γ) η κεντρική μονάδα ελέγχου.

3.4 Σύστημα κοπής λέιζερ

Το σύστημα κοπής περιλαμβάνει ένα λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) υψηλής ισχύος. Ο συγκεκριμένος τύπος είναι ο ισχυρότερος τύπος βιομηχανικού λέιζερ που είναι προς το παρόν διαθέσιμος και χρησιμοποιείται κυρίως για την κοπή και τη διάτρηση μετάλλων. Το μεγάλο μήκος κύματος του λέιζερ CO_2 , με τιμή στα 10.6 μm , απορροφάται από τα περισσότερα στερεά με αποτέλεσμα να παρέχει τη δυνατότητα σε αυτού του τύπου τα λέιζερ να μπορούν να επεξεργαστούν μια ευρεία ποικιλία υλικών. Τα συγκεκριμένα λέιζερ ειδικεύονται στη διάνοιξη μικρών οπών χωρίς η διαδικασία να χρειάζεται να επαναληφθεί αρκετές φορές και κυρίως σε μικρό χρονικό διάστημα [6].

Ένα λέιζερ CO_2 ανήκει στην κατηγορία των λέιζερς αερίου. Αυτό σημαίνει ότι λειτουργεί με ενεργοποίηση ενός αερίου μίγματος που αποτελείται από διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, υδρογόνο και ήλιο. Στην μία άκρη του σωλήνα με το αέριο μείγμα υπάρχει ένα αντανακλαστικό κάτοπτρο που οδηγεί τη δέσμη σε ένα συγκεντρωτικό φακό και αυτός με τη σειρά του στην έξοδο της κεφαλής κοπής του μηχανήματος [7]. Για να επιτευχθεί όσο το

δυνατόν καλύτερη ποιότητα στις κοπές μετάλλων με αυτόν τον τύπο λέιζερ πίσω από τη δέσμη υπάρχει συνεχόμενη ροή κάποιου αερίου για να απομακρύνει τα εναπομείναντα κομμάτια υλικού που προκλήθηκαν από πιθανή τήξη του. Ανάλογα με την εφαρμογή οξυγόνο, άζωτο ή πεπιεσμένος αέρας ρέει από την σχισμή του λέιζερ. Στις κοπές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πίσω από τη δέσμη υπήρχε ρυθμιζόμενη ροή αερίου αζώτου.



Εικόνα 3.9 Η κεφαλή του συστήματος κοπής ενός CO₂ λέιζερ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το σύγχρονο σύστημα κοπής laser Bystar 4020 της εταιρείας Bystronic που ευρίσκεται στις εγκαταστάσεις της Μεταλλεμπορικής Α.Ε. με έδρα την Πάτρα και είναι εξοπλισμένο με ένα 6 kW CO₂ λέιζερ. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος Bystar 4020 είναι τα ακόλουθα : α) position accuracy ± 0.1 mm, β) repeatability ± 0.05 mm και γ) edge detection precision ± 0.5 mm [8]. Στο συγκεκριμένο σύστημα κοπής υπήρχε η δυνατότητα εισόδου αρχείου Autocad στο οποίο σχεδιάστηκαν οι κοπές των δειγμάτων με αποτέλεσμα την αυτοματοποίηση της διαδικασίας και το μικρό χρόνο διεκπεραίωσής τους. Οι ανωτέρω παράμετροι σε συνδυασμό με την 0.3 mm διατομή της δέσμης laser του συστήματος καθιστούν δυνατή την ακριβή τοποθέτηση και κοπή των ελλείψεων των περιοδικών πλεγμάτων που δοκιμάστηκαν σε μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου που περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 της παρούσης διατριβής.



Εικόνα 3.10 Το μοντέλο Bystar 4020 της εταιρείας Bystronic

3.5 Μετρήσεις θερμοκρασίας

Για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας των ηλιακών κυττάρων χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί αισθητήρες ανάλογα με το είδος και τις ανάγκες της μέτρησης. Η θερμοκρασία των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών στοιχείων μετρήθηκε με IR φορητό μετρητή θερμοκρασίας, ενώ για τη μελέτη της αύξησης της θερμοκρασίας στις φιλικές προς το περιβάλλον ωμικές συνδέσεις χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της θερμογραφίας καθώς και αυτοκόλλητοι αισθητήρες θερμοκρασίας (Platinum Resistance Temperature Detectors) Pt-100 σε επαφή με την πίσω πλευρά των ηλιακών κυττάρων για real-time μετρήσεις καθ' όλη την διάρκεια που η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία προσέπιπτε στην επιφάνειά τους.

Για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας των ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων λόγω της ευαισθησίας των δειγμάτων και της πυκνής κατανομής των ελλείψεων (που απαιτείται για την ομοιόμορφη διέλευση του φυσικού φωτός) χρησιμοποιήθηκε ο φορητός IR μετρητής θερμοκρασίας. Ο μετρητής που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Fluke με εύρος θερμοκρασιών από -30°C μέχρι 500°C και με ακρίβεια $\pm 1^{\circ}\text{C}$ μέχρι τους 30°C και $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ για μεγαλύτερες θερμοκρασίες (εικόνα 3.11)



Εικόνα 3.11 Το φορητό IR θερμόμετρο της εταιρείας FLUKE

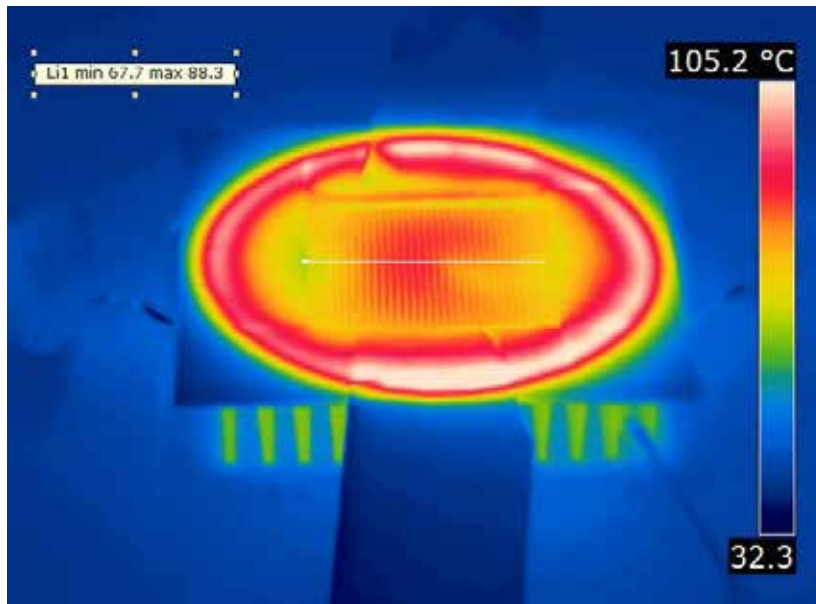
Η μέθοδος της θερμογραφίας που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να χαρακτηριστεί σαν «passive thermography» αφού η εξωτερική πηγή διέγερσης θερμοκρασίας ήταν ο ήλιος. Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε η φορητή κάμερα ευαίσθητη στην περιχή μεγάλων κύματος (Long Wave Infrared) Flir T360, η οποία είναι ευαίσθητη στην περιοχή μεγάλων μηκών κύματος με θερμοκρασιακή ευαισθησία κάτω από 60mK. Η κάμερα έχει ένα φασματικό εύρος από 7,5 έως 13 μm και συνοδεύεται από αισθητήρες μέτρησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της υγρασίας. Ο οπτικός φακός που προσαρμόστηκε σε αυτή την κάμερα έχει 18 χιλιοστά εστιακό μήκος με $25^{\circ} \times 19^{\circ}$ FOV (οπτικό πεδίο) και 1,36 mRad IFOV (στιγμιαίο οπτικό πεδίο).



Εικόνα 3.12 Φορητή υπέρυθρη κάμερα (Long Wave Infrared) Flir T360

Η μέθοδος παθητικής θερμογραφίας (passive thermography) (ή steady state) αποτελεί μέχρι σήμερα το βασικό εργαλείο για εύρεση ατελειών ή αστοχιών σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή στοιχείο καθώς και για την μέτρηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ενός φωτισμένου ηλιακού κυττάρου [9]. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη έρευνα για τη χρήση της μεθόδου lock-in thermography στον χαρακτηρισμό πλαισίων και κυττάρων κυρίως για τον εντοπισμό μικρορωγμών σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, των προβλημάτων από την αντίσταση σε σειρά, των hot spots κλπ [10, 11].

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας λαμβάνει χώρα χωρίς να επηρεάζεται το δείγμα ή η πειραματική διαδικασία γιατί πραγματοποιείται από απόσταση. Δεύτερον, η θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί κατά τη διάρκεια της μέτρησης σε πραγματικούς χρόνους κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα δύσκολο λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στα ηλιακά κύτταρα από την συγκέντρωση της ακτινοβολίας. Επίσης, η μέτρηση μπορεί να απεικονισθεί σε εικόνα για τον ακριβή προσδιορισμό της κατανομής της θερμοκρασίας στις διάφορες περιοχές της επιφάνειας του δείγματος καθώς και σε γράφημα θερμοκρασίας ως συνάρτηση της απόστασης (profile line).



Εικόνα 3.13 Παράδειγμα μέτρησης με την κάμερα (Long Wave Infrared) Flir T360. Η συγκεκριμένη μέτρηση είναι από δείγμα που δέχεται συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία.

3.6 Συστήματα φακών Fresnel – ηλιακών κυττάρων

Για τις ηλεκτρικές μετρήσεις που απαιτείται συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο συστήματα που συνδυάζουν φακούς Fresnel με ηλιακά κύτταρα τοποθετημένα σε δεξαμενές απαγωγής θερμότητας. Η λογική τους ήταν ακριβώς η ίδια, δηλαδή ένας συγκεντρωτικός φακός Fresnel σχήματος κύκλου ευθυγραμμίζεται και τοποθετείται παράλληλα με την επιφάνεια του προς μέτρηση φωτοβολταϊκού στοιχείου στο οποίο θέλουμε να εφαρμόσουμε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία έως 10X (όπου X η ακτινοβολία ενός ηλίου). Σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με συγκέντρωση ακτινοβολίας 16X που ήταν η μέγιστη τιμή που μετρήθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή.



Εικόνα 3.14 Σύστημα μετρήσεων με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας

Τα βασικά μέρη κάθε συστήματος είναι : α) η ενιαία κατασκευή στήριξης του φακού και του δείγματος με την δεξαμενή απαγωγής θερμότητας, β) το συρόμενο πέτασμα στο οποίο προσαρμόζεται ο φακός Fresnel και γ) και οι επίσης συρόμενοι οδηγοί τοποθέτησης του πετάσματος σε διαφορετικές υψομετρικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δείγματος για να επιτευχθούν οι τιμές της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας που απαιτούνται για τις

μετρήσεις. Βασικό στοιχείο για το σύστημα μετρήσεων υπό συγκέντρωση ακτινοβολίας είναι η παρουσία δεξαμενής απαγωγής θερμότητας επί της οποίας στηρίζεται το ηλιακό κύτταρο για να επιτυγχάνεται επαρκής απαγωγή θερμότητας και μικροί ρυθμοί αύξησης της θερμοκρασίας του [12]. Για το λόγο αυτό στη βάση του συστήματος σχεδιάστηκε ειδική θήκη στην οποία προσαρμόστηκε η δεξαμενή απαγωγής θερμότητας (heatsink) ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητά της όταν αυξάνεται η κλίση ολόκληρης της κατασκευής για να επιτευχθεί κατακόρυφη πρόσπτωση του φυσικού φωτός επί της επιφάνειας του φακού Fresnel. Τέλος, στον σχεδιασμό του συστήματος υπάρχει πρόβλεψη για την στήριξη των καλωδίων που συνδέουν την ηλεκτρονική συσκευή μετρήσεων (source-measure unit) με τους ακροδέκτες ρεύματος-τάσης του ηλιακού κυττάρου για την αποφυγή μετακίνησής τους κατά τη διάρκεια της μέτρησης η οποία θα προξενούσε καταστροφή του δείγματος. Η μόνη διαφορά ανάμεσα στα δύο συστήματα είναι το μέγεθός τους το οποίο αιτιολογείται αν ληφθεί υπόψη ότι χρησιμοποιήθηκαν δύο φακοί Fresnel διαφορετικής διαμέτρου.

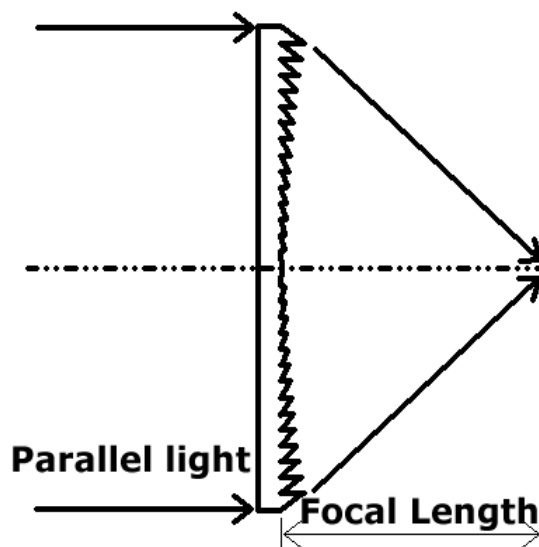


Εικόνα 3.15 Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου τοποθετημένο σε ψύκτρα στο σύστημα συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας.

3.6.1 Φακοί Fresnel

Ένας φακός Fresnel αντικαθιστά την καμπύλη επιφάνεια ενός συμβατικού φακού με μια σειρά ομόκεντρων αυλακιών που χαράσσονται στην επιφάνεια ενός λεπτού στρώματος υάλου ή πολυμερικού υλικού. Η λεπτή και ελαφριά κατασκευή τους και η εξαιρετική ικανότητα συγκέντρωσης φωτός τους καθιστούν χρήσιμους σε διαφορετικές εφαρμογές. Οι αύλακες δρουν ως μεμονωμένες επιφάνειες διάθλασης, σαν μικροσκοπικά πρίσματα όταν φαίνονται σε εγκάρσια τομή. Επειδή ο φακός είναι λεπτός, πολύ λίγο φως χάνεται λόγω

απορρόφησης [13]. Οι φακοί Fresnel χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές που απαιτείται συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 3.16 Τρόπος λειτουργίας ενός φακού Fresnel

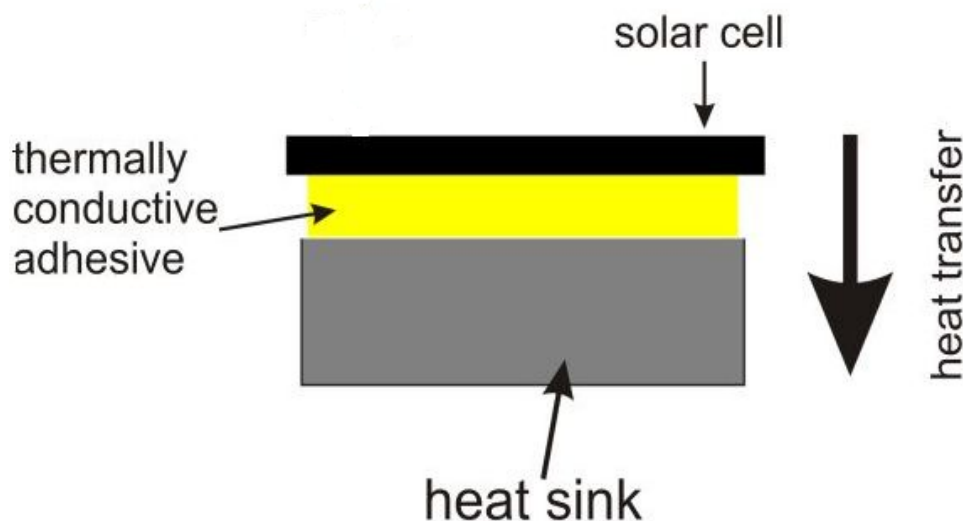
Για τα δύο συστήματα συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί φακοί Fresnel, της εταιρίας Edmund Optics, με διαμέτρους 15 και 18 ίντσες αντίστοιχα. Τα βασικά τους χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 3.4

| | | |
|---|----------------------|----------------------|
| Groove Density (grooves/inch) | 50 | 50 |
| Diameter (inches) | 15.0 | 18.25 |
| Effective Diameter (inches) | 15.0 | 18.25 |
| Effective Focal Length EFL (inches) | 30.00 | 24.00 |
| Center Thickness CT (inches) | 0.13 | 0.13 |
| Focal Length Tolerance (%) | ±5 | ±5 |
| Dimensional Tolerance (inches) | ±0.05 | ±0.05 |
| Thickness Tolerance (%) | ±40 | ±40 |
| Transmission (%) | 92 (from 400-1100nm) | 92 (from 400-1100nm) |
| Index of Refraction n_d | 1.49 | 1.49 |
| Operating Temperature (°C) | 80 (Maximum) | 80 (Maximum) |

Πίνακας 3.4 Βασικά χαρακτηριστικά των φακών Fresnel της εταιρείας Edmund Optics

3.6.2 Συστήματα Παθητικής Απαγωγής Θερμότητας

Ο λόγος που χρησιμοποιείται ένα σύστημα απαγωγής θερμότητας σε συνδυασμό με ένα ηλιακό κύτταρο που δέχεται συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία είναι για να παρεμποδίσει την αύξηση της θερμοκρασίας του και συνεπώς να εξασφαλίσει υψηλή απόδοσή του. Το αρχικό βήμα είναι να οδηγήσει την θερμότητα στο σύστημα ψύξης και αυτό με τη σειρά του μακριά από το δέκτη [14]. Δεδομένου ότι οι δύο επιφάνειες που έρχονται σε επαφή, δηλαδή, το πίσω μέρος του ηλιακού κυττάρου με την επίπεδη επιφάνεια του heatsink, είναι μεταλλικές είναι απαραίτητο να εισαχθεί κάποιο ενδιάμεσο στρώμα για να επιτρέψει μια επαρκή ροή θερμότητας μεταξύ αυτών των δύο επιφανειών. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι μια θερμοαπαγωγική κόλλα η οποία επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας με γρήγορους ρυθμούς προς το σύστημα ψύξης. Στην εικόνα 3.17 φαίνεται η διατομή της διάταξης που μόλις περιγράφηκε. Επίσης φαίνεται η μεταφορά της θερμότητας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στην ψύκτρα μέσω της θερμοαπαγωγικής κόλλας που τοποθετήθηκε.



Εικόνα 3.17 Μεταφορά θερμότητας από το ηλιακό κύτταρο στην δεξαμενή θερμότητας μέσω θερμοαπαγωγικής κόλλας.

Το υλικό που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη διαδικασία είναι μια θερμικά αγωγή κόλλα η οποία χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε ψύκτρες δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα που εξασφαλίζει ηλεκτρική μόνωση. Είναι της εταιρείας Loctite με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0.815 W/mK , συντελεστή θερμικής διαστολής $1.1 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ και εύρος θερμοκρασιών από -55°C έως 150°C . Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα που διαθέτει επιτρέπει την άριστη διάχυση θερμότητας ευαίσθητων ηλεκτρονικών διατάξεων όπως ένα ηλιακό κύτταρο σε συνθήκες συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Το μικρό πάχος της επίστρωσης της θερμοαπαγωγικής κόλλας μεταξύ του ηλιακού κυττάρου και της δεξαμενής θερμότητας δημιουργεί ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των δύο μερών ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει τη θερμική αγωγιμότητα. Τέλος, οι δεξαμενές θερμότητας της εταιρείας Aavid Thermalloy που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο. Οι διαστάσεις τους επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση ηλιακών κυττάρων πυριτίου διαστάσεων $12.5 \times 12.5 \text{ cm}^2$ και $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- [1] A. N. Series. Measuring Photovoltaic Cell I-V Characteristics with the Model 2420 SourceMeter Instrument.
- [2] J. Niemann, "Better Solar Cell Testing: The Key to Faster Development and Production," *Keithley Instruments*, 2004.
- [3] Technical Data, *KEITHLEY Source-measure Unit 2611*, 2008
- [4] W. Goeke, Labs Demands for Greater Measurement Flexibility Require Cabling Systems Capable of Accommodating Multiple Measurement Types, 2009
- [5] K.Tsevas, "Σύστημα δημιουργίας ωμικών συνδέσεων σε φωτοβολταϊκά στοιχεία," Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2009.
- [6] A.Ostendorf, "Lasers in Energy Device Manufacturing," 2008.
- [7] J. C. Ion, "Chapter 3 - Lasers," in *Laser Processing of Engineering Materials*, ed Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005, pp. 41-103.
- [8] Bystar Technical Data, 2011
- [9] J.A.Tsanakas , P.N.Botsaris, "Passive and active thermographic assessment as a tool for condition-based performance monitoring of photovoltaic modules," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 133, 2011.
- [10] O. Breitenstein, "Local efficiency analysis of solar cells based on lock-in thermography," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 107, pp. 381-389, 2012.
- [11] Otwin Breitenstein , Hilmar Straube, "Lock-In Thermography Investigation of Solar Modules," in *26th EU PVSEC*, Hamburg, 2011, pp. 1451-1453.
- [12] A. Royne, *et al.*, "Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 86, pp. 451-483, 2005.
- [13] R.M.Swanson, "Photovoltaic Concentrators," in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, S. H. A.Luque Ed., John Wiley & Sons, 2003, pp. 450-503.
- [14] G.Martinelli, M.Stefancich, "Solar Cell Cooling," in *Concentrator Photovoltaics*, V. A. A.Luque Ed., ed Berlin: Springer, 2007, pp. 133-149.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΙΛΙΚΩΝ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΩΜΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΣΕ ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων περιβαλλοντικά φιλικών ωμικών συνδέσεων μεταξύ των ράβδων συλλογής ηλεκτρικού ρεύματος (bus bars) ηλιακών κυττάρων πυριτίου και επίπεδων αγωγών χαλκού (flat wires ή tabbing ribbons). Οι επίπεδοι αγωγοί χαλκού επικαλύπτονται από φιλικά προς το περιβάλλον κράματα συγκολλήσεως. Η μελέτη επικεντρώθηκε : α) στις συνθήκες συγκόλλησης μεταξύ των επίπεδων αγωγών χαλκού με τους κεντρικούς αγωγούς αργύρου των ηλιακών κυττάρων και β) στις μετρήσεις των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης. Αρχικά καθορίστηκαν οι ιδανικότερες συνθήκες συγκολλήσεως για δύο διαφορετικά κράματα. Επακολούθησε η μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των ηλιακών κυττάρων με τις ανωτέρω φιλικές προς το περιβάλλον ωμικές συνδέσεις. Συγκεκριμένα τα κύτταρα υποβλήθηκαν σε συστηματικές μετρήσεις των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) αφ' ενός για τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας έως $1000 \text{ Watt} / \text{m}^2$ και αφ' ετέρου για συγκεντρώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας έως 16X με την χρησιμοποίηση φακών Fresnel. Παράλληλα μελετήθηκε η επίδραση της παθητικής απαγωγής θερμότητας στην

αύξηση της θερμοκρασίας των κυττάρων υπό την επίδραση συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα δύο περιβαλλοντικώς φιλικά κράματα συγκολλησεως που μελετήθηκαν είναι τα εξής:

α) Sn(96.5%) / Ag(3.5%)

β) Bi(58%) / Sn(42%)

Για την κατασκευή των ωμικών συνδέσεων χρησιμοποιήθηκε σύστημα συγκόλλησης το οποίο έχει την δυνατότητα εφαρμογής θερμοκρασιών έως 450 °C που διατηρούνται σταθερές με ακρίβεια ± 1 °C καθ' όλη την διάρκεια της συγκόλλησης καθώς και φιλικές προς το περιβάλλον (RoHS compliant) conductive pastes της εταιρείας ALFA. Οι ωμικές συνδέσεις πραγματοποιήθηκαν σε ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής απόδοσης (17.1%) με εμβαδά επιφανείας 125x125 mm² και 156 x156 mm². Για την καταγραφή των χαρακτηριστικών I-V χρησιμοποιήθηκε το Source Measure Unit (SMU) 2611A της αμερικανικής εταιρείας Keithley.

4.2 Μεταλλικά κράματα συγκολλήσεων φιλικά προς το περιβάλλον

Η φωτοβολταϊκή βιομηχανία (PV), όσον αφορά στην τεχνολογία των ωμικών συνδέσεων μεταξύ ηλιακών κυττάρων, ευρίσκεται στο μεταβατικό στάδιο από το παραδοσιακά χρησιμοποιούμενο κράμα συγκολλησεως Sn(36%)Pb2%Ag στα χωρίς μόλυβδο κράματα [1]. Οι τρέχουσες μελέτες της βιομηχανίας μικροηλεκτρονικής, οι οποίες έχουν ως αντικείμενο τις χωρίς μόλυβδο συγκολλήσεις παρέχουν τις γνώσεις αλλά και τις ιδέες στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών συστημάτων όσον αφορά στο κράμα που θα χρησιμοποιηθεί για αυτές τις εφαρμογές. Βέβαια, η κλίμακα κατασκευής είναι διαφορετική στα φωτοβολταϊκά συστήματα σε σύγκριση με τα κυκλώματα της μικροηλεκτρονικής κάτι που αναλύεται παρακάτω [2]. Τα κράματα συγκολλησεως που περιέχουν μόλυβδο, ιδιαίτερα εκείνα με το συνδυασμό κασσιτέρου-μόλυβδου, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην ηλεκτρονική βιομηχανία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό οφείλεται πρωτίστως στο συνδυασμό της μεγάλης διάρκειας ζωής, της μικρής δαπάνης, των καλών συγκολλητικών ιδιοτήτων, της θερμοκρασίας τήξης, των κατάλληλων φυσικών, μηχανικών και μεταλλουργικών ιδιοτήτων καθώς και της αντίστασης σε θερμική κούραση. Εντούτοις, η ανησυχία για την τοξικότητα του μολύβδου έχει οδηγήσει στην αλλαγή της νομοθεσίας για τον περιορισμό και τελικά την απαγόρευση της χρήσης του [3]. Κατά συνέπεια, η χρήση του μολύβδου στα μη

συγκολλητικά υλικά όπως είναι η βενζίνη και το χρώμα έχει απαγορευθεί εδώ και πολλά χρόνια. Πιο πρόσφατα, κράματα συγκολλησεως που περιέχουν μόλυβδο έχουν απαγορευθεί για χρήση στους σωλήνες ύδρευσης πόσιμου νερού, στα δοχεία και στα αυτοκίνητα όπου χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές για την επισκευή τους.

Στο παρελθόν, διάφορα δυαδικά ευτηκτικά κράματα έχουν προταθεί για να αντικαταστήσουν το ευτηκτικό κασσιτέρου-μολύβδου, όπως είναι για παράδειγμα τα κράματα Sn-Bi, Sn-In, και Sn-Ag, τα οποία έχουν όλα χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ηλεκτρονικής. Παρόλα αυτά πρέπει να τοποθετηθεί το κατάλληλο υλικό στην κατάλληλη θέση διότι τα κράματα συγκολλησεως σε ένα ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό κύκλωμα δρουν ως ηλεκτρικές συνδέσεις που παράλληλα προσδίδουν και μηχανικές ιδιότητες στο σύστημα [4].

Μεταξύ των διάφορων υποψηφίων, το κράμα κασσίτερος-άργυρος είναι το ισχυρότερο για να γίνει η κύρια αμόλυβδη ύλη συγκολλησεως διότι αυτό το κράμα είναι εξαιρετικά σταθερό και θεωρείται ικανό να ανταποκριθεί στα συνολικά αναγνωρισμένα πρότυπα. Εντούτοις, οι συνθέσεις που δοκιμάζονται έχουν μικρές διαφορές με τις κυριότερες να είναι οι ευτηκτικές συνθέσεις Sn-3.5%Ag και Sn-3.5%Ag-0.7%Cu [5]. Ένα εμπόδιο για το συγκεκριμένο κράμα είναι ότι αυξάνεται η θερμοκρασία τήξης και απαιτεί μια αντίστοιχη άνοδο στη θερμοκρασία συγκόλλησης[6-8]. Το ευτηκτικό κράμα Sn-Pb έχει σημείο τήξης 183 °C η οποία είναι αρκετά ικανοποιητική για διάφορες κατασκευές και συγκεκριμένα για εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αντίστοιχα, το σημείο τήξης του κράματος Sn-Ag είναι 221 °C, δηλαδή 38 °C υψηλότερο από τη συμβατική ύλη συγκολλησεως. Κατά συνέπεια, μια τέτοια θερμοκρασία μπορεί να μην είναι κατάλληλη για όλες τις εφαρμογές.

Η προσθήκη του βισμούθιου στα κράματα συγκολλησεως χαμηλώνει το σημείο τήξης και βελτιώνει τη ροή τους, κάτι που το κάνει μια πολύ ελκυστική επιλογή. Τα κράματα κασσιτέρου-βισμούθιου (Sn-Bi) έχουν σημείο τήξης 139 °C και είναι ελκυστικά ως ύλη συγκολλησεως επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές σε θερμοκρασίες κάτω από 200 °C. Παρόλα αυτά η έλλειψη ολκιμότητας αποτελεί ένα εμπόδιο, όπως επίσης και τα προβλήματα συμβατότητας με διάφορα μέταλλα, αλλά είναι δυνατό να βελτιωθεί μέσω της χρήσης πρόσθετων ουσιών στο κράμα όπως είναι ο άργυρος. Συμπερασματικά, αποτελεί μια καλή επιλογή για εφαρμογές με χαμηλό σημείο τήξης οι οποίες αφορούν ένα ευρύ φάσμα προϊόντων.

Ένα άλλο κράμα συγκολλησεως είναι του κασσιτέρου-ψευδαργύρου-βισμούθιου (Sn-Zn-Bi), το οποίο έχει σημείο τήξης 189 °C, και χαρακτηριστικά που είναι εξαιρετικά κοντά στην τρέχουσα ύλη συγκολλησεως Sn-Pb. Μια από τις σοβαρές ανησυχίες στην ύλη συγκολλησεως κραμάτων Sn-Zn [9] είναι η φτωχή αντίσταση στη διάβρωση ως αποτέλεσμα

της χαρακτηριστικής οξειδωσης του Zn. Στην σημερινή αναλογία αυτό το κράμα περιέχει βισμούθιο σε ένα ποσοστό γύρω στο 3%, αλλά η βέλτιστη σύνθεση πρέπει να επανεξεταστεί και πιθανώς το ποσοστό του βισμούθιου να μειωθεί. Δύο τέτοια παραδείγματα είναι το ευτηκτικό κράμα Sn-9%Zn με πολύ μικρή ποσότητα πρόσθετων ουσιών καθώς και το Sn-7%Zn το οποίο περιέχει 10 ppm αλουμινίου [6]. Ένα από τα χαρακτηριστικά προϊόντα που χρησιμοποιήθηκε το τελευταίο κράμα είναι οι οθόνες LCD από την εταιρεία Fujitsu.

Η λογική τιμή του κράματος κασσιτέρου-χαλκού Sn-Cu το κάνει ιδανικό κράμα για εφαρμογές συγκόλλησης. Εντούτοις, υπάρχουν αμφιβολίες λόγω κάποιων προβλημάτων όπως η θερμική κούραση, που το κάνει μια λιγότερο επιθυμητή επιλογή για κολλήσεις που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία. Κάποιες από τις τεχνικές βελτίωσης της αξιοπιστίας του κράματος περιλαμβάνουν αλλαγές στη σύνθεσή του με την προσθήκη ενός τρίτου στοιχείου όπως άργυρο, χρυσό ή νικέλιο. Η θερμοκρασία τήξης αυτού του κράματος είναι 227 °C και δεν θα προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στη θερμοκρασία συγκόλλησης έναντι της συμβατικής ευτηκτικής ύλης συγκολλησεως Sn-Pb. Εντούτοις, λόγω των ανησυχιών για τα προβλήματα στη θερμική αντίσταση καθώς επίσης και της συμβατότητας με τα μέρη που είναι καλυμμένα με μόλυβδο, απαιτούνται περαιτέρω βελτιώσεις.

| Μεταλλικό Κράμα | Σύσταση (%) | Σημείο Τήξης (°C) | Είδος |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Bi-Sn | 58Bi – 42Sn | 138 | Eutectic |
| Sn-Ag | 96.5Sn – 3.5Ag | 221 | Eutectic |
| Sn-Ag-Cu | 95.8Sn – 3.5Ag – 0.7Cu | 216 | Eutectic |
| Sn-Zn | 91Sn – 9Zn | 199 | Eutectic |
| Sn-Cu | 99Sn – 1Cu | 227 | Eutectic |

Πίνακας 4.1 Τα κυριότερα lead – free κράματα ως πιθανοί αντικαταστάτες της υπάρχουσας ύλης συγκολλησεως Sn(62%)/Pb(36%)/Ag(2%)

4.3 Βασικά χαρακτηριστικά του νέου κράματος συγκόλλησης

Ένα φιλικό προς το περιβάλλον συγκολλητικό κράμα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες βασικές προϋποθέσεις. Αρχικά, θα πρέπει, η διαδικασία παραγωγής του νέου ευτηκτικού κράματος να είναι παρόμοια με το κράμα συγκολλήσεως κασσιτέρου-μολύβδου χωρίς σημαντικές αλλαγές και το κόστος του υλικού να μην είναι υψηλότερο. Η ροή της νέας ύλης συγκολλήσεως πρέπει να είναι καλύτερη ή ισοδύναμη με αυτή του κράματος Sn-Pb όπως επίσης και το σημείο τήξης θα πρέπει να είναι χαμηλότερο από εκείνο της υπάρχουσας προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος των θερμικών τάσεων ή του θερμικού σοκ που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η νέα ύλη συγκολλήσεως πρέπει να είναι σε θέση να δημιουργεί ποιοτικές και αξιόπιστες ωμικές συνδέσεις οι οποίες παράλληλα θα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής ενώ ταυτόχρονα θα αντέχουν στη διάβρωση και την οξείδωση [10]. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω το νέο κράμα θα πρέπει πρώτον να είναι αξιόπιστο στον ίδιο, τουλάχιστον, βαθμό με το Sn-Pb όσον αφορά στην ποιότητα των ωμικών συνδέσεων και στην χρονική διάρκεια ζωής τους και δεύτερον να είναι κατάλληλο για μαζική παραγωγή σε εφαρμογές συγκόλλησης.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκαν εκτενώς και χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή ωμικών συνδέσεων σε ηλιακά κύτταρα πυριτίου οι παρακάτω συνδυασμοί κασσιτέρου-αργύρου και κασσιτέρου-βισμούθιου : α) Sn(96,5%)/Ag(3,5%) με θερμοκρασία τήξης 221 °C (δηλαδή 38 °C υψηλότερη από τη αντίστοιχη θερμοκρασία του Sn(62%)/Pb(36%)/Ag(2%) και β) Bi(58%)/Sn(42%) με σημείο τήξης 139 °C.

4.4 Pb-free ωμικές συνδέσεις στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών

Σήμερα οι βιομηχανίες κατασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων χρησιμοποιούν επίπεδους αγωγούς χαλκού οι οποίοι επικαλύπτονται από ένα λεπτό στρώμα εύτηκτου κράματος κασσιτέρου-μολύβδου με αναλογία Sn(63%)/Pb(37%) και θερμοκρασία τήξης 183 °C. Λόγω των οδηγιών WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) και RoHS (Risk of Hazardous Substances) της Ευρωπαϊκής Ένωσης που απαγορεύουν την χρήση κραμάτων συγκόλλησης (solder alloys) κασσιτέρου-μολύβδου σε ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό [11], έχει αναπτυχθεί τα δύο τελευταία έτη συστηματική ερευνητική

δραστηριότητα για την επιλογή του καταλληλότερου, περιβαλλοντικά φιλικού, κράματος που θα αντικαταστήσει το Sn(63%)/Pb(37%).

Ο ευρωπαϊκός οργανισμός EU Directive RoHS και ο αντίστοιχος κινέζικος China RoHS αλλά και πολλοί άλλοι διεθνείς οργανισμοί απαιτούν την μείωση των κολλήσεων που περιέχουν μόλυβδο τουλάχιστον στο μισό [12]. Ως εναλλακτικές λύσεις προτείνουν τις κολλήσεις ψευδαργύρου με βισμούθιο ή τις κολλήσεις ψευδαργύρου με άργυρο. Παρόλα αυτά η χρησιμοποίησή τους στην παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων συναντά πολλές τεχνικές δυσκολίες. Ένα από αυτά τα προβλήματα είναι η θερμοκρασία τήξης των νέων κραμάτων. Συγκεκριμένα το κράμα κασσιτέρου-αργύρου έχει θερμοκρασία τήξης 38 βαθμούς Κελσίου υψηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης των μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενων κολλήσεων. Αυτό αυξάνει τις μηχανικές τάσεις στα ηλιακά κύτταρα κατά τη διάρκεια της σύνδεσής τους. Στην δεύτερη περίπτωση δηλαδή στην περίπτωση του βισμούθιου το πρόβλημα είναι διαφορετικό. Η θερμοκρασία τήξης του συγκεκριμένου κράματος είναι γύρω στους 140 βαθμούς. Η συγκεκριμένη ιδιότητα του κράματος είναι ευνοϊκή για τις μηχανικές τάσεις που δημιουργούνται στο cell οι οποίες θα είναι πολύ χαμηλές αλλά είναι μειονέκτημα το πόσο ανθεκτικές θα είναι [13]. Αυτό εξηγείται καλύτερα αν λάβουμε υπόψη τις δυσμενείς συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να λειτουργούν και οι οποίες μπορεί να αναπτύξουν θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης του μετάλλου. Αυτό θα επιταγχύνει τη γήρανση των επαφών.

Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα κράματα συγκολλήσεων που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος στην τεχνολογία κατασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων διαφέρουν από εκείνα που χρησιμοποιούνται στη μικροηλεκτρονική. Το κράμα συγκολλήσεως των κυττάρων σε ένα πλαίσιο κατασκευάζεται ως ένα συνεχές στρώμα μεταλλικής επικάλυψης επί ενός επιμήκους επίπεδου καλωδίου χαλκού. Αυτός ο τύπος κατασκευής δείχνει ότι διαφέρουν οι κολλήσεις που πραγματοποιούνται στις ηλεκτρονικές συσκευές από τα ηλιακά κύτταρα δεδομένου ότι στα τελευταία οι επίπεδοι αγωγοί είναι μεγάλης κλίμακας και με μεγάλες διαφορές στις διαστάσεις τους (ύψος, πλάτος). Οι χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους σε ένα ηλιακό κύτταρο και στα κράματα συγκολλήσεως στη μικροηλεκτρονική είναι περίπου 155 χιλιοστά και 0.2-1 χιλιοστά αντίστοιχα [2]. Έτσι λοιπόν η μεγάλη κλίμακα του κράματος συγκολλήσεως στα φωτοβολταϊκά για τις ωμικές συνδέσεις, επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με αυτό που ισχύει στη μικροκλίμακα σε κολλήσεις στη μικροηλεκτρονική.

Οι λύσεις που προτείνονται στην παρούσα εργασία επικεντρώνονται στο κατασκευαστικό μέρος των ωμικών συνδέσεων με τα συγκεκριμένα κράματα και στους

διαφορετικούς τρόπους συνδεσμολογίας τους πάνω σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο. Κατασκευαστικά μια λύση που προτείνεται είναι η χρησιμοποίηση αγωγίμης πάστας η οποία θα επιδράσει κυρίως στη μείωση των μηχανικών τάσεων που προκαλούν τις ρωγμές [14, 15]. Οι μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται οφείλονται στο διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής του επίπεδου καλωδίου με το μεταλλικό αγωγό του ηλιακού κυττάρου. Επιπλέον λόγω της σύστασής της βελτιώνει τη ροή του κράματος κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και παρέχει καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες στη σύνδεση.

Επίσης, προτείνονται διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης μεταξύ των μεταλλικών αγωγών και του κυττάρου, κυρίως σε κράματα με χαμηλό σημείο τήξης, που είναι πιθανό να αστοχήσουν λόγω των συνθηκών λειτουργίας. Ένας τρόπος που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ένα διπλό επίπεδο μεταλλικό καλώδιο το οποίο είναι κολλημένο μαζί πριν την τοποθέτηση του πάνω στο bus bar και μόνο το κάτω μέρος του είναι κολλημένο πάνω στο ηλιακό κύτταρο. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης έχει ακριβώς τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αφού έχει την ίδια επιφάνεια κόλλησης πάνω στο μέταλλο αλλά τώρα ενεργούν δύο αγωγοί για καλύτερη διαχείριση των υψηλών ρευμάτων και μεγαλύτερη αντοχή. Τέλος, προτείνεται η συνδεσμολογία με οκτώ και δώδεκα ωμικές συνδέσεις σε 2 και 3 busbars αντίστοιχα. Και σε αυτή την περίπτωση οι υψηλές τιμές ρεύματος μοιράζονται ειδικά στα φωτοβολταϊκά στοιχεία μεγάλης επιφάνειας $156 \times 156 \text{ mm}^2$ που παράγουν υψηλά ρεύματα με τιμή πάνω από 8 A με αποτέλεσμα να αντιστοιχεί ρεύμα 4 A σε κάθε επίπεδο αγωγό.

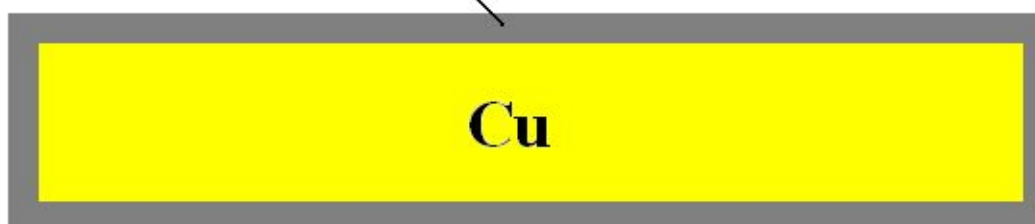
4.5 Κατασκευή ωμικών συνδέσεων

Όπως προαναφέρθηκε τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται ως αντικαταστάτες του μολύβδου είναι το βισμούθιο και ο άργυρος που χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή τοξικότητα και θεωρούνται φιλικά προς το περιβάλλον μέταλλα. Οι επίπεδοι αγωγοί ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από υψηλής καθαρότητας χαλκό των τύπων Cu-ETP1 και Cu-OF1. Το πλάτος τους κυμαίνεται από 2 έως 2,5 mm και το πάχος από 0,15 έως 0,20 mm. Το πάχος των συγκολλητικών κραμάτων με τα οποία επικαλύπτονται οι επίπεδοι αγωγοί χαλκού κυμαίνεται από 10-15 μm [16].

Lead-free alloy

Sn96.5/Ag3.5 or Bi58/Sn42

Thickness : 10-15 μm



Tabbing Ribbon

Thickness : 0.15mm

Width : 2mm

Εικόνα 4.3 Επίπεδος αγωγός χαλκού με επικάλυψη φιλικού προς το περιβάλλον κράματος.

Η αγωγήμη κόλλα [17] που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η OM-338 της εταιρείας ALFA. Αποτελείται από πολυμερική μήτρα με σωματίδια από το φιλικό προς το περιβάλλον αγωγήμο κράμα Sn3%Ag0.5%Cu με διαστάσεις από 25-45 μm . Οι ωμικές συνδέσεις [18] έγιναν επί μονο-κρυσταλλικών ηλιακών κυττάρων πυριτίου υψηλής απόδοσης με εμβαδά επιφανείας 125 x 125 mm² και 156 x 156 mm², με πάχος 200 \pm 40 μm και σε δείγματα με 2bus και 3bus bars.

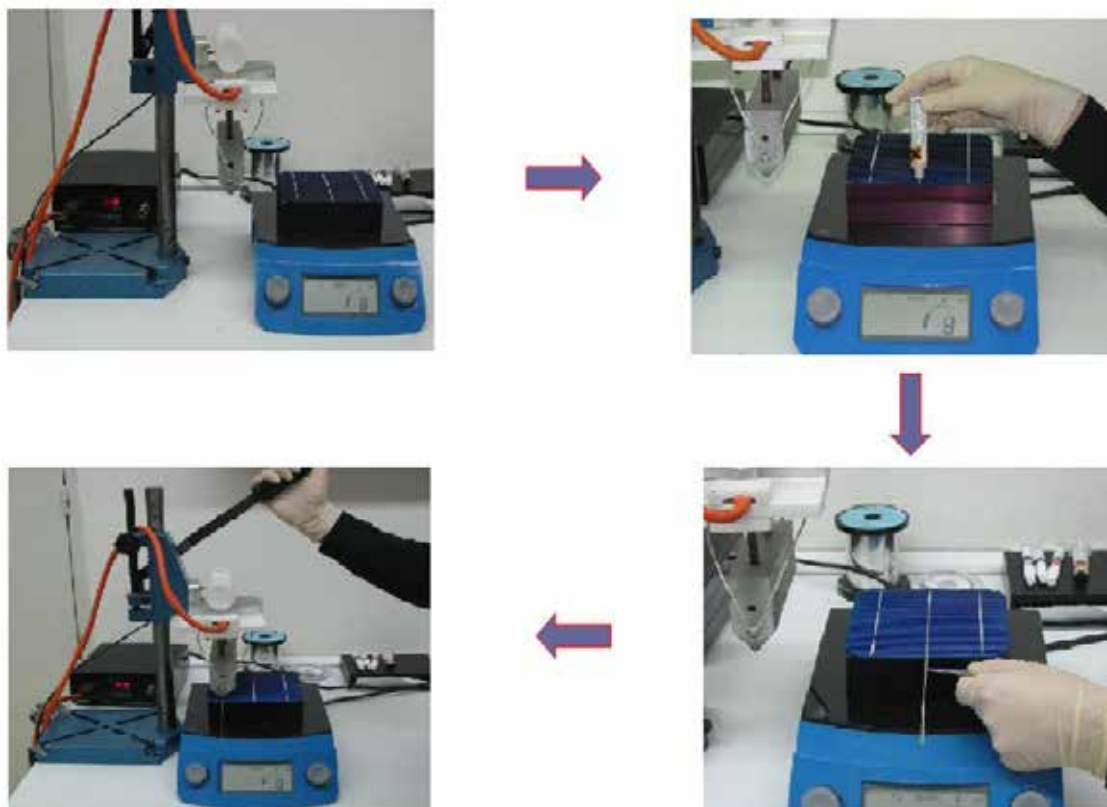
Τα στάδια της συγκόλλησης είναι τα ακόλουθα:

- 1) Θέρμανση του φωτοβολταϊκού στοιχείου επί κεραμικής εστίας για την αποφυγή μικρορωγμών που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης λόγω των μηχανικών τάσεων.
- 2) Απομάκρυνση της κεραμικής αντιοξειδωτικής ουσίας από την μεταλλική επαφή του κυττάρου και καθαρισμός της επιφάνειας με αλκοόλη καθώς και των μεταλλικών συρμάτων που θα συγκολληθούν.
- 3) Επίστρωση της αγωγίμης κόλλας κατά μήκος των ράβδων συλλογής ηλεκτρικού ρεύματος (bus-bar) του ηλιακού κυττάρου.
- 4) Τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των επίπεδων αγωγών χαλκού με την επικάλυψη του φιλικού προς το περιβάλλον κράματος στο bus bar.
- 5) Εφαρμογή της θερμαντικής πηγής στο προς συγκόλληση μεταλλικό σύρμα.
- 6) Απομάκρυνση του δείγματος από την κεραμική εστία και καθαρισμός της επιφάνειας του δείγματος από το πολυμερές που καλύπτει τις περιοχές που γειτνιάζουν στις ράβδους συλλογής ηλεκτρικού ρεύματος του κυττάρου.

Η μέθοδος που μόλις περιγράφηκε δοκιμάστηκε σε αρκετά δείγματα με διαφορετικές θερμοκρασίες στο hot plate και στην θερμαντική πηγή. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε η αγωγή πάστα και για τα δύο κράματα επικάλυψης των μεταλλικών αγωγών. Οι καλύτερες συνθήκες συγκόλλησης με βάση την αποφυγή ανάπτυξης μηχανικών τάσεων άρα και ρωγμών στα φωτοβολταϊκά στοιχεία αλλά και ποιότητας των ωμικών συνδέσεων φαίνεται στον πίνακα 4.2

| Alloy | Hotplate Temperature (°C) | Tabbing Machine Temperature (°C) | Time (sec) |
|---------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|
| <i>Sn96.5/Ag3.5</i> | 120 | 240 | 10 |
| <i>Bi58/Sn42</i> | 80 | 150 | 8 |

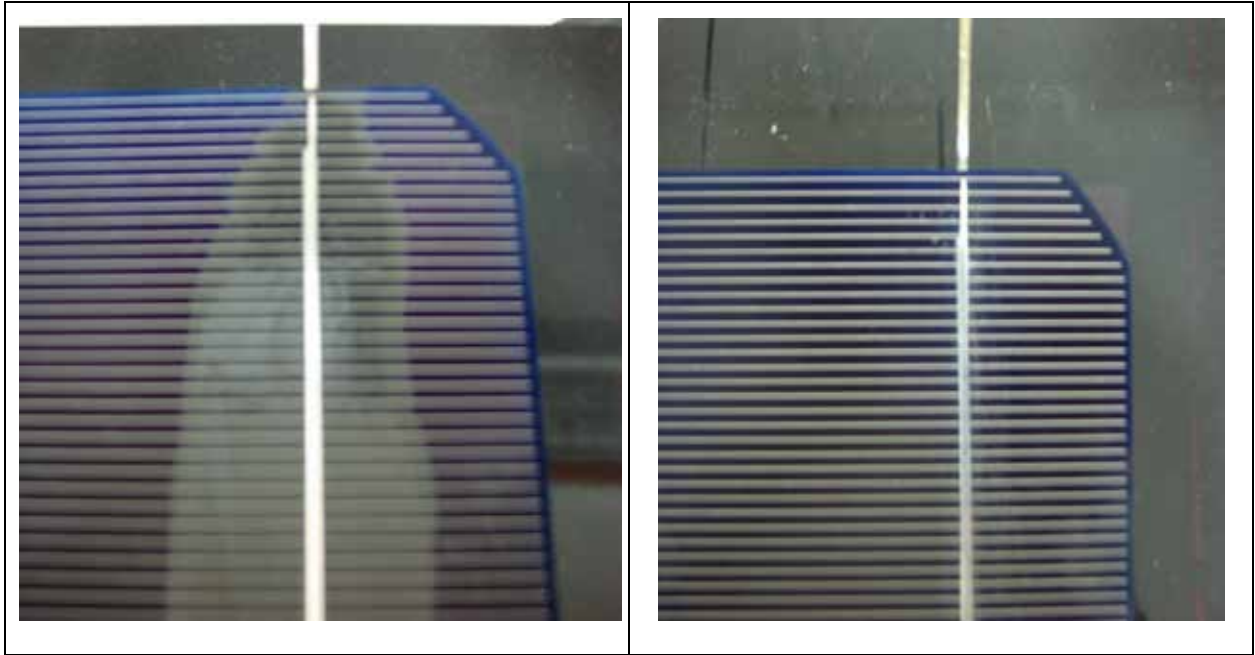
Πίνακας 4.2 Ιδανικότερες συνθήκες συγκόλλησης των μελετούμενων κραμάτων



Εικόνα 4.4 Βήματα κατασκευής των ωμικών συνδέσεων σε μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου 3 busbars.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4 το πολυμερές που περιέχει η αγώγιμη κόλλα ανάλογα με την θερμοκρασία που επιτυγχάνεται η ωμική σύνδεση αλλά και την πίεση που ασκείται από την θερμαντική πηγή καλύπτει ένα μέρος της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού δίπλα από το bus bar με αποτέλεσμα να μειώνεται η ενεργός επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου. Η εξάλειψη του φαινομένου που μόλις προαναφέραμε γίνεται με μια σειρά χημικών αντιδράσεων. Η πλύση που υποβάλλουμε το ηλιακό κύτταρο γίνεται με την ακόλουθη σειρά:

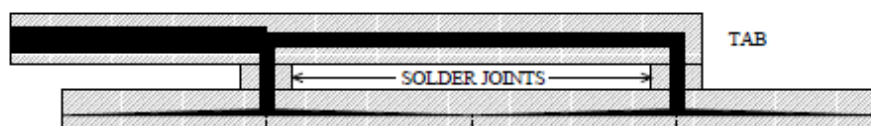
- 1) Πλύση του ηλιακού κυττάρου με ακετόνη
- 2) Πλύση με ισοπροπυλική αλκοόλη
- 3) Πλύση με απιονισμένο νερό
- 4) Στέγνωμα με ξηρό αέριο άζωτο



Εικόνα 4.5 Απομάκρυνση πολυμερούς από την επιφάνεια του δείγματος μετά την κατασκευή των ωμικών συνδέσεων

4.6 Απώλειες από τις ωμικές συνδέσεις

Ο επίπεδος αγωγός χαλκού είναι συνδεδεμένος με το μεταλλικό αγωγό (bus-bar) του ηλιακού κυττάρου με αρκετά σημεία κόλλησης μεταλλικού κράματος (solder joints). Το μαύρο χρώμα στην εικόνα 4.6 δείχνει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος από τον κεντρικό μεταλλικό αγωγό στο επίπεδο καλώδιο. Το ρεύμα στους κεντρικούς μεταλλικούς αγωγούς συλλέγεται από τα grid-fingers και μετά μέσω των σημείων κόλλησης μεταλλικού κράματος (solder joints) μεταφέρεται στα flat wires και από εκεί στην έξοδο [19]. Το ρεύμα σε ένα σημείο κόλλησης προέρχεται από δύο κατευθύνσεις όπως φαίνεται στην εικόνα με αποτέλεσμα την βαθμωτή αύξησή του στο flat wire.



Εικόνα 4.6 Σχηματική αναπαράσταση της διαδρομής του ρεύματος διαμέσου των κολλήσεων στο flat ribbon.

Η εξίσωση που δίνει την αντίσταση του μεταλλικού αγωγού συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δίνεται από την σχέση 4.1

$$R_t = r_{lt} \frac{L_b}{3n_t} + \frac{1}{2n_s^2} \quad (4.1)$$

Όπου r_{lt} = ειδική αντίσταση του flat wire

L_b = το μήκος του φωτοβολταϊκού στοιχείου

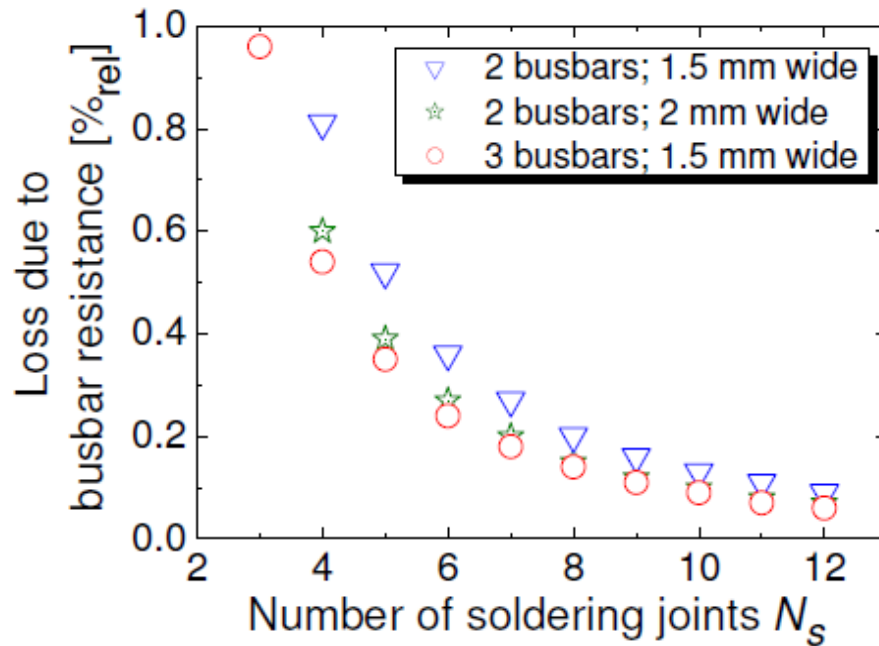
n_t = ο αριθμός των tabs

n_s = ο αριθμός των κολλήσεων

Από την σχέση 4.1 φαίνεται ότι όταν φτάσουμε σε πάρα πολλά σημεία κόλλησης πάνω στο μεταλλικό αγωγό ($n_s \gg 1$) τότε ο τύπος για την αντίσταση του επίπεδου αγωγού (tab) γίνεται

$$R_t = r_{lt} \frac{L_b}{3n_t} \quad (4.2)$$

Από την τελευταία διαπίστωση συμπεραίνεται ότι χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός σημείων κόλλησης μεταξύ των bus bars και των tabbing ribbons ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι απώλειες από την αντίσταση του μεταλλικού αγωγού όπως επίσης να χρησιμοποιείται flat wire με όσο το δυνατόν μικρότερο πάχος με ενδεικτική τιμή 1.5mm ή 2mm [16, 20]. Στην εικόνα 4.7 φαίνεται γραφικά ο αριθμός των σημείων κόλλησης και πως επιδρούν στην αντίσταση που δημιουργεί το bus bar σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.



Εικόνα 4.7 Επίδραση του αριθμού των σημείων κόλλησης στην συνολική αντίσταση του busbar

Επίσης, από την εξίσωση 4.2 δικαιολογείται η πρόταση στην παρούσα εργασία για περισσότερες ωμικές συνδέσεις σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (αύξηση του n_i) καθώς φαίνεται ότι μεγαλύτερος αριθμός επίπεδων μεταλλικών αγωγών σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μειώνει την συνολική αντίσταση που προσδίδει η R_i στο δείγμα. Αυτό φαίνεται καλύτερα στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό που έγινε στο κάθε δείγμα.

4.7 Μετρήσεις – Αποτελέσματα

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω κατασκευάστηκαν ωμικές συνδέσεις φιλικές προς το περιβάλλον σε 3 διαφορετικούς τύπους ηλιακών κυττάρων. Το κράμα με σύσταση Sn/Ag χρησιμοποιήθηκε σε δείγματα με διαστάσεις $125 \times 125 \text{ mm}^2$ και $156 \times 156 \text{ mm}^2$ με 2 busbars το καθένα, ενώ το κράμα Bi/Sn δοκιμάστηκε σε $125 \times 125 \text{ mm}^2$ και $156 \times 156 \text{ mm}^2$ με το τελευταίο να έχει 3 busbars. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κάθε δείγματος δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία Sunways AG μετρούμενα σε συνθήκες STC (standard test conditions) δηλαδή σε A.M 1.5, θερμοκρασία 25°C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m^2 .

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες φυσικού φωτισμού στα δείγματα και των δύο κραμάτων με έμφαση σε μετρήσεις συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας για τη μελέτη τους σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και φωτισμού ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες και παράλληλα τη μελέτη της επίδρασης μιας παθητικής δεξαμενής θερμότητας στην θερμοκρασία τους. Στα δείγματα που μετρήθηκαν χωρίς συγκέντρωση, στο πίσω μέρος ήταν προσαρμοσμένοι οι αισθητήρες θερμοκρασίας (Platinum Resistance Temperature Detectors) Pt-1000 για μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο καθώς επίσης και ένας αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανεξάρτητος από το σύστημα. Πριν από κάθε καταγραφή ρεύματος – τάσης I-V το δείγμα προσανατολιζόταν κάθετα προς το προσπίπτον φως με τη βοήθεια του μετρητή ηλιακής ακτινοβολίας Macsolar που διαθέτει μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (ίδιου τύπου με τα δείγματα) και κατέγραφε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών έγινε με το Source Measure Unit της εταιρείας Keithley με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2 όπου μια μεταβλητή παλμική πηγή ρεύματος εφαρμόζόταν στα άκρα του ηλιακού κυττάρου με ταυτόχρονη μέτρηση της τάσης του.

Η διάταξη των επίπεδων αγωγών χαλκού στα δείγματα που μετρήθηκαν δεν έγινε μόνο με τον παραδοσιακό τρόπο στον οποίο τέσσερις επαφές μονού ribbon συνδέονται σε κάθε μεταλλικό αγωγό του στοιχείου. Στα δείγματα κατασκευάστηκαν ωμικές συνδέσεις με οκτώ επαφές πάνω στο ηλιακό κύτταρο καθώς επίσης και τέσσερις επαφές με τη διαφορά ότι το ηλεκτρόδιο που αντιστοιχεί στο ρεύμα είναι διπλό για καλύτερη διαχείριση υψηλών ρευμάτων και μεγαλύτερη μηχανική αντοχή.

4.7.1 Χαρακτηριστικές I-V για τις ωμικές συνδέσεις με το συγκολλητικό κράμα κασσιτέρου-αργύρου (Sn/Ag)

Για να συγκριθούν οι διαφορετικές συνδεσμολογίες σε μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου κατασκευάστηκαν ωμικές συνδέσεις με επίπεδο αγωγό χαλκού και επικάλυψη από το κράμα Sn/Ag σε μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου με 2 bus bars διαστάσεων 125x125 mm² και 156x156 mm². Τα ηλιακά κύτταρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρείας Sunways και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στους πίνακες 4.3 και 4.4. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το source-measure unit 2611A της εταιρείας KEITHLEY το οποίο ρυθμίστηκε ως πηγή παλμικού ρεύματος, με σάρωση από τιμές 0A έως 10A με ταυτόχρονη μέτρηση της τάσης. Ο συνολικός χρόνος που διαρκούσε η μέτρηση ήταν 15 δευτερόλεπτα καθώς το πλάτος του παλμού ορίστηκε στα 50 μ s με τον αριθμό των μετρούμενων σημείων στη χαρακτηριστική να είναι 300.

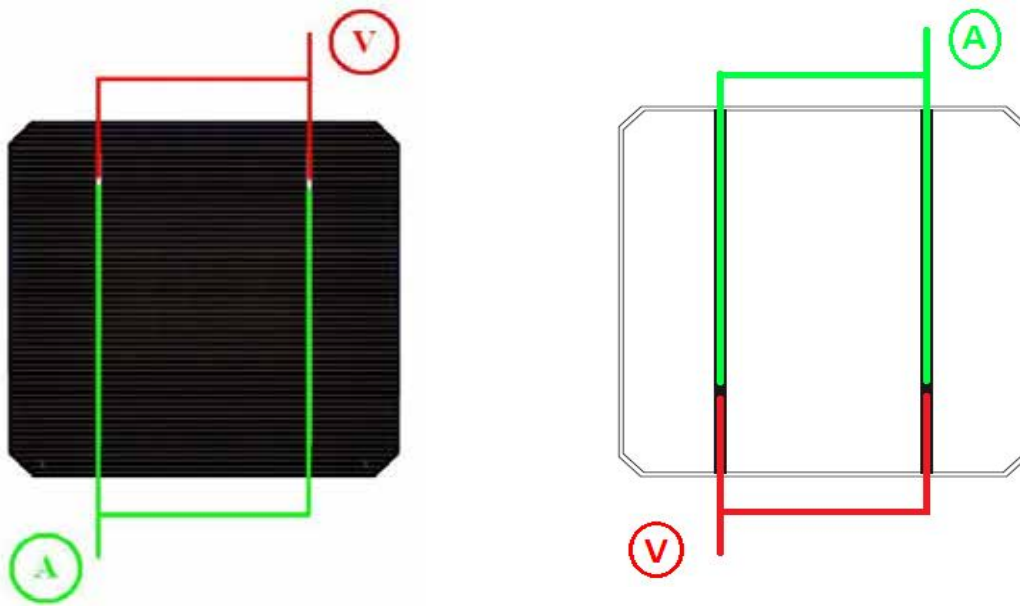
| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|---------------------|
| Isc (A) | 5.48 | Temp.Coefficients | -2.2 mV/K, +1.6mA/K |
| Voc (V) | 0.618 | Pmax (W) | 2.65 |
| FF % | 78.3 | I_{max} (A) | 5.20 |
| η% | 17.1 | V_{max} (V) | 0.510 |

Πίνακας 4.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλιακού κυττάρου διαστάσεων 125X125 mm² της εταιρείας Sunways

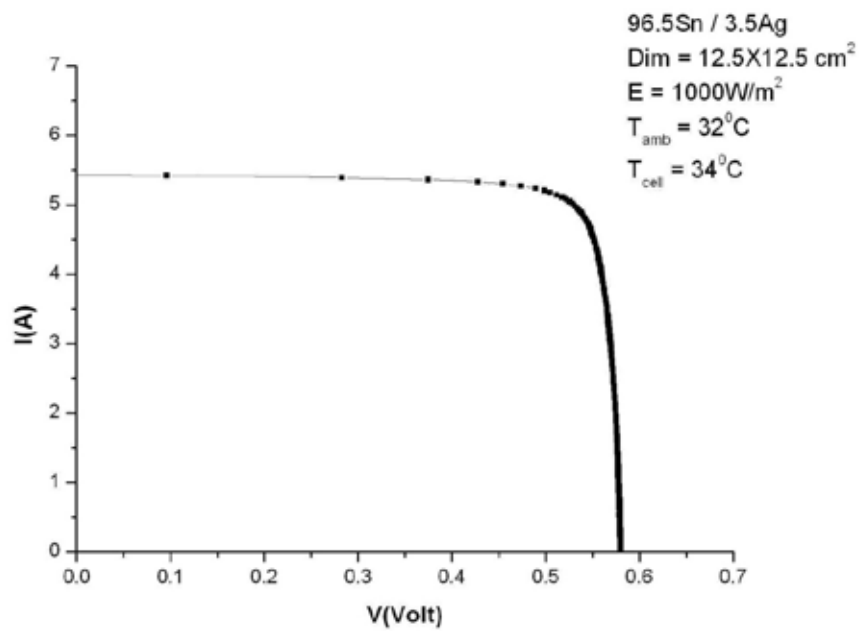
| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|---------------------|
| Isc (A) | 8.64 | Temp.Coefficients | -2.1 mV/K, +2.1mA/K |
| Voc (V) | 0.618 | Pmax (W) | 4.13 |
| FF % | 77.1 | I_{max} (A) | 8.10 |
| η% | 17.3 | V_{max} (V) | 0.510 |

Πίνακας 4.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλιακού κυττάρου διαστάσεων 156X156 mm² με 2 bus bars της εταιρείας Sunways

Μετά την καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης υπολογίστηκαν τα βασικά μεγέθη για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων. Από τις εξισώσεις 2.38, 2.39 και 2.40 υπολογίστηκαν η παραγόμενη ισχύς, ο παράγοντας πλήρωσης καθώς και η απόδοση. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοιχτού κυκλώματος, το σημείο μέγιστης λειτουργίας και η αντίσταση σε σειρά καθορίστηκαν γραφικά.



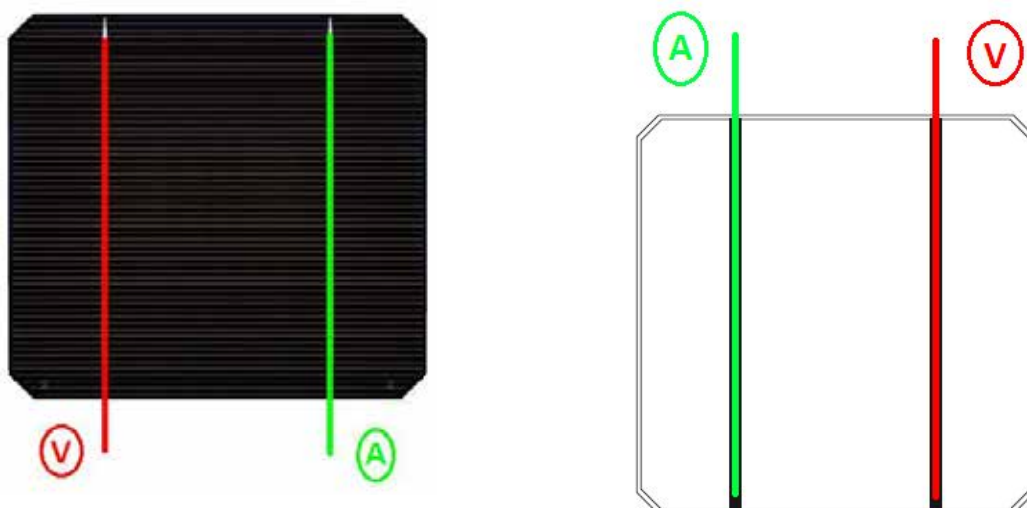
Εικόνα 4.8 Δημιουργία οκτώ ωμικών συνδέσεων σε μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου διαστάσεων 125 X 125 mm²



Εικόνα 4.9 Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία των οκτώ επαφών για flat wires με το κράμα Sn/Ag

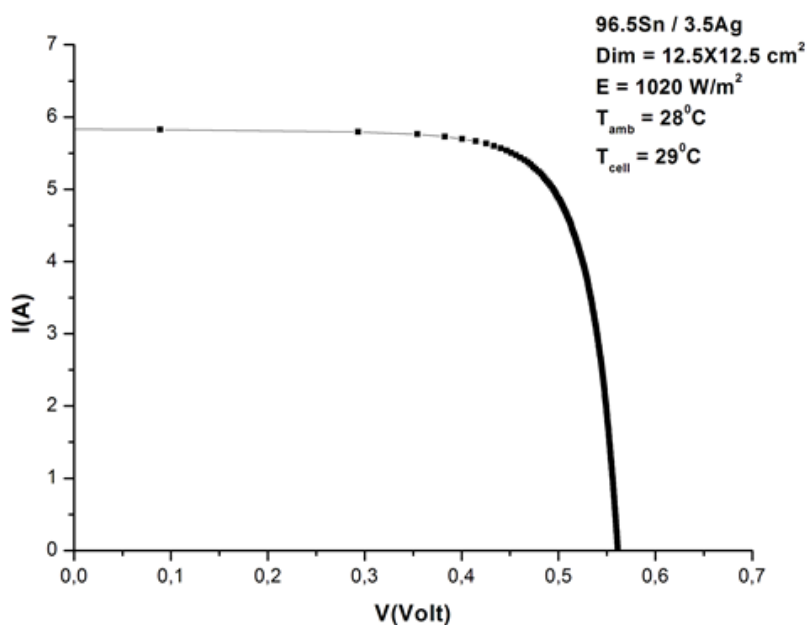
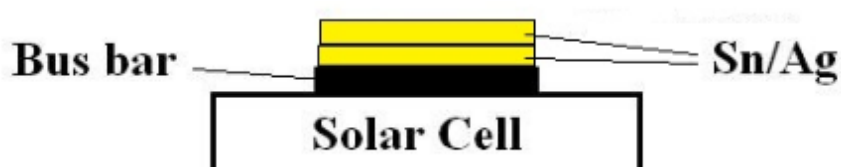
| | | | |
|---------------------------|-------|-------------------------------|---------|
| I_{sc} (A) | 5.45 | R_{series} (Ω) | 0.00216 |
| V_{oc} (V) | 0.580 | P_{max} (W) | 2.67 |
| FF % | 84.5 | I_{max} (A) | 5.04 |
| η % | 17.1 | V_{max} (V) | 0.530 |

Πίνακας 4.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τη συνδεσμολογία των οκτώ επαφών για flat wires με το κράμα Sn/Ag



Εικόνα 4.10 Πάνω: Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία του διπλού καλωδίου για flat wires με το κράμα Sn/Ag για τα δείγματα των $125 \times 125 \text{ mm}^2$ και $156 \times 156 \text{ mm}^2$

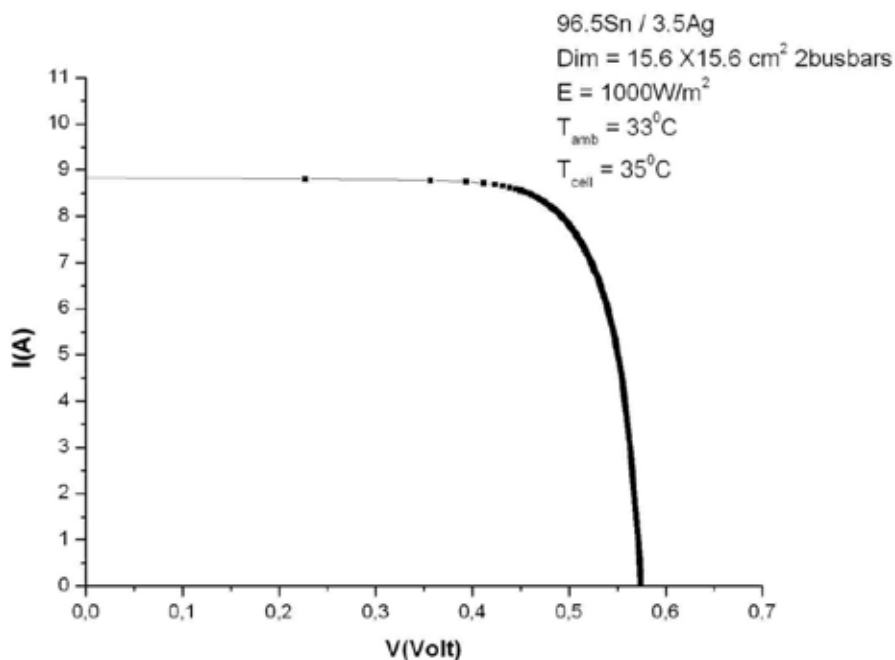
Κάτω: Λεπτομερής ανάλυση της διάταξης του διπλού καλωδίου



Εικόνα 4.11 Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία των τεσσάρων επαφών με το διπλό καλώδιο για flat wires με το κράμα Sn/Ag

| | | | |
|----------------------------|-------|--------------------------------------|---------|
| Isc (A) | 5.83 | Rseries (Ω) | 0.00339 |
| Voc (V) | 0.560 | Pmax (W) | 2.52 |
| FF | 77.0 | I_{max} (A) | 5.37 |
| $\eta\%$ | 15.8 | V_{max} (V) | 0.470 |

Πίνακας 4.6 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τη συνδεσμολογία των τεσσάρων επαφών με το διπλό καλώδιο για flat wires με το κράμα Sn/Ag



Εικόνα 4.12 Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία των οκτώ επαφών για το flat wire με το κράμα Sn/Ag σε φωτοβολταϊκό στοιχείο 156X156 mm²

| | | | |
|----------------------------|-------|--------------------------------------|---------|
| Isc (A) | 8.84 | Rseries (Ω) | 0.00225 |
| Voc (V) | 0.580 | Pmax (W) | 3.97 |
| FF | 78.0 | I_{max} (A) | 8.11 |
| $\eta\%$ | 16.6 | V_{max} (V) | 0.490 |

Πίνακας 4.7 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τη συνδεσμολογία των τεσσάρων επαφών με το διπλό καλώδιο για το flat wire με το κράμα Sn/Ag σε δείγμα 156X156 mm²

Όπως φαίνεται από την εικόνα 4.9 στη συνδεσμολογία των οκτώ επαφών για το flat ribbon με το κράμα Sn/Ag σε μονοκρυσταλικό ηλιακό κύτταρο πυριτίου το ρεύμα βραχυκύκλωσης μετρήθηκε 5.45 A και η τάση ανοιχτού κυκλώματος 0.58 V σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m² και θερμοκρασία κυττάρου 34°C . Η πτώση στην τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος λόγω αύξησης της θερμοκρασίας είναι η αναμενόμενη. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία οι συντελεστές θερμοκρασίας για την τάση είναι -0.0022

V/K και για το ρεύμα $+0.0016$ A/K όπου για το μετρούμενο δείγμα συνεπάγεται συνολική μείωση της τάσης κατά 0.0198 V και αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά 0.0144 A. Έτσι, οι θεωρητικοί υπολογισμοί μας δίνουν ρεύμα βραχυκύκλωσης 5.49 A και τάση ανοιχτού κυκλώματος 0.60 V. Τέλος, η ισχύς που παράγει το ηλιακό κύτταρο είναι παρόμοια με αυτήν που αναφέρει ο κατασκευαστής δηλαδή 2.65 W.

Σε αντίστοιχων διαστάσεων ηλιακό κύτταρο πραγματοποιήθηκαν ωμικές συνδέσεις όπως φαίνονται στην εικόνα 4.10. Εδώ, το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μεγαλύτερο από την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής το οποίο είναι αναμενόμενο αφού είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε η τιμή του ρεύματος $I_{sc} = 5.83$ A στα 1020 W/m² με την αναμενόμενη τιμή σύμφωνα με τις βαθμονομημένες μετρήσεις του κατασκευαστή να είναι 5.69 A. Στην τάση ανοιχτού κυκλώματος για τη θερμοκρασία των 29°C και σύμφωνα με το συντελεστή θερμοκρασίας αναμέναμε μία πτώση τάσης 0.0088 V δηλαδή 0.610 V αλλά η μετρούμενη τιμή είναι 0.56 V.

Το τελευταίο δείγμα στο οποίο δοκιμάστηκαν οι ωμικές συνδέσεις του κράματος Sn/Ag είναι διαστάσεων 156×156 mm² με την συνδεσμολογία των οκτώ επίπεδων καλωδίων (flat ribbons) που μετρήθηκε στα 1000 W/m² με θερμοκρασία κυττάρου στους 35°C . Οι συντελεστές θερμοκρασίας για το συγκεκριμένο δείγμα είναι για την τάση -0.0021 V/K και για το ρεύμα $+0.0021$ A/K. Η αύξηση της θερμοκρασίας εδώ θεωρητικά θα μείωνε την τάση ανοιχτού κυκλώματος κατά 0.023 V, δηλαδή θα είχε τιμή 0.595 V, και θα έδινε μια αύξηση στο ρεύμα 0.011 A, δηλαδή τιμή 8.65 A. Η μετρούμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης έχει μεγαλύτερη τιμή συγκεκριμένα 8.84 A, η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι 0.580 V και η παραγόμενη ισχύς 4.13 W. Και σε αυτόν τον τύπο σύνδεσης των tabbing ribbons η αντίσταση σε σειρά είναι $R_s = 0.00225\Omega$, ανάλογη της τιμής που προέκυψε στην συνδεσμολογία των 8 επαφών στο δείγμα διαστάσεων 125×125 mm².

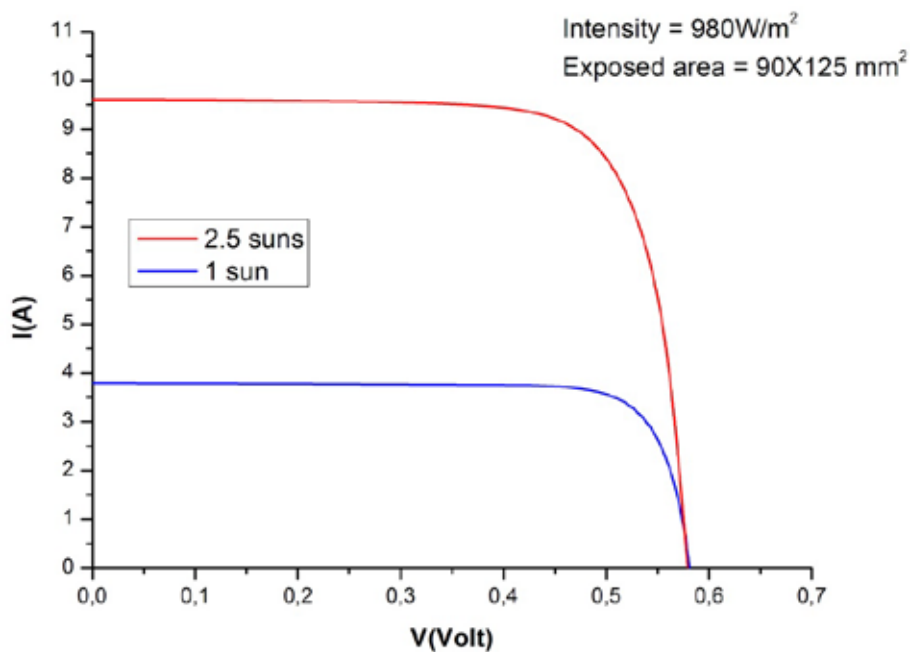
Και στις τρεις περιπτώσεις οι επίπεδοι μεταλλικοί αγωγοί με το κράμα Sn/Ag δείχνουν πολύ καλή ηλεκτρική συμπεριφορά με τιμές πολύ κοντά στις κατασκευάστριας εταιρείας. Ωστόσο ο τρόπος σύνδεσης με τις οκτώ ωμικές επαφές είναι πολύ κοντά όσον αφορά στις τιμές της απόδοσης και της παραγόμενης ισχύος που αναφέρει η κατασκευάστρια εταιρεία, όπως άλλωστε αναμέναμε.

4.7.2 Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας για το κράμα κασσιτέρου-αργύρου (Sn/Ag)

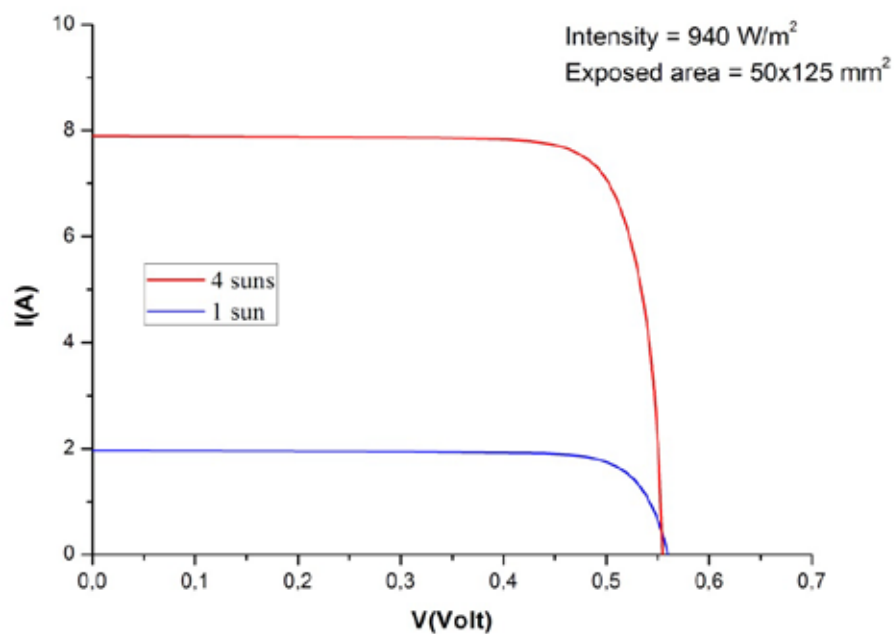
Στις μετρήσεις υπό συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας για τη μελέτη των ωμικών συνδέσεων ως προς την αξιοπιστία τους χρησιμοποιήθηκαν δείγματα με διαστάσεις $125 \times 125 \text{ mm}^2$ με τέσσερις επαφές και με το διπλό καλώδιο συνδεδεμένο σε μία από τις δύο ράβδους συλλογής ηλεκτρικού ρεύματος, δεδομένου των υψηλών ρευμάτων που ανεμένετο να παραχθούν. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές απαγωγής θερμότητας (heat sinks) με την εφαρμογή θερμοαπαγωγικής κόλλας στο κάτω μέρος τους και μετά στην ειδική βάση στην οποία προσαρμύζονται κυκλικοί φακοί Fresnel για την συγκέντρωση του ηλιακού φωτός. Λόγω του περιορισμού όσον αφορά στην τιμή του ρεύματος που το source measure unit μπορεί να μετρήσει μειώθηκε η ενεργός περιοχή του ηλιακού κυττάρου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία με την τοποθέτηση στην μπροστινή του επιφάνεια πετασμάτων, σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου, διαφόρων διαστάσεων. Το εμβαδόν της περιοχής που θα εκτεθεί σε υψηλές συγκεντρώσεις ακτινοβολίας υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της συγκέντρωσης για την μέτρηση και το επαρκές μήκος έκθεσης των ωμικών συνδέσεων σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι λοιπόν οι περιοχές αυτές επιλέχθηκαν με εμβαδά $70 \times 70 \text{ mm}^2$, $80 \times 80 \text{ mm}^2$, $90 \times 125 \text{ mm}^2$ και τέλος $25 \times 125 \text{ mm}^2$. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας με τιμές 2.5X, 4X και 5.5X. Αυτές οι τιμές συγκεντρώσεων επιτεύχθηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικής διαμέτρου φακούς Fresnel από την εταιρεία Edmund Optics. Για συγκέντρωση 2.5X χρησιμοποιήθηκε φακός με διάμετρο 15 ίντσες ενώ για τις συγκεντρώσεις 4X και 6X φακός με διάμετρο 18.25 ίντσες. Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε μέτρηση υπολογίστηκε γεωμετρικά με τη μέθοδο των ομοίων τριγώνων. Από το EFL (effective focal length) του κάθε φακού και την απόστασή του από την επιφάνεια του δείγματος προερχόταν η τιμή της συγκέντρωσης της κάθε μέτρησης πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή 0.9 που αντιστοιχεί στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον φακό για την περιοχή μηκών κύματος από 400 nm έως 1100 nm.

Πριν από κάθε μέτρηση I-V το δείγμα, το οποίο ήταν τοποθετημένο στο σύστημα μετρήσεων φακών Fresnel- ηλιακών κυττάρων (παράγραφος 3.6) προσανατολιζόταν κάθετα προς το προσπίπτον φως με τη βοήθεια του μετρητή ηλιακής ακτινοβολίας Macsolar που διαθέτει μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (ίδιου τύπου με τα δείγματα) και κατέγραφε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Αφού καταγραφόταν η μέτρηση σε

ακτινοβολία 1 sun (χωρίς συγκέντρωση) στη συνέχεια το δείγμα καλυπτόταν ώστε να ψυχθεί και να αποκτήσει ξανά την αρχική χαμηλή θερμοκρασία ($\sim 27^{\circ}\text{C}$). Αφού ψυχθεί επαρκώς το δείγμα η απομάκρυνση του καλύμματος συνοδευόταν από την ταυτόχρονη έναρξη της καταγραφής της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης [21]. Η καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών γινόταν με το Source Measure Unit της εταιρείας Keithley με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2 όπου μια πηγή παλμικού ρεύματος εφαρμοζόταν στα άκρα του ηλιακού κυττάρου με ταυτόχρονη μέτρηση της τάσης του. Συγκεκριμένα ορίστηκε σαν πηγή το ρεύμα και σαν μετρούμενο μέγεθος η τάση. Επιλέχθηκε πηγή παλμικού ρεύματος από 0 A μέχρι 10 A, με πλάτος παλμού 50 μs και συνολικά 300 μετρούμενα σημεία με τη μέτρηση να διαρκεί 15 δευτερόλεπτα.

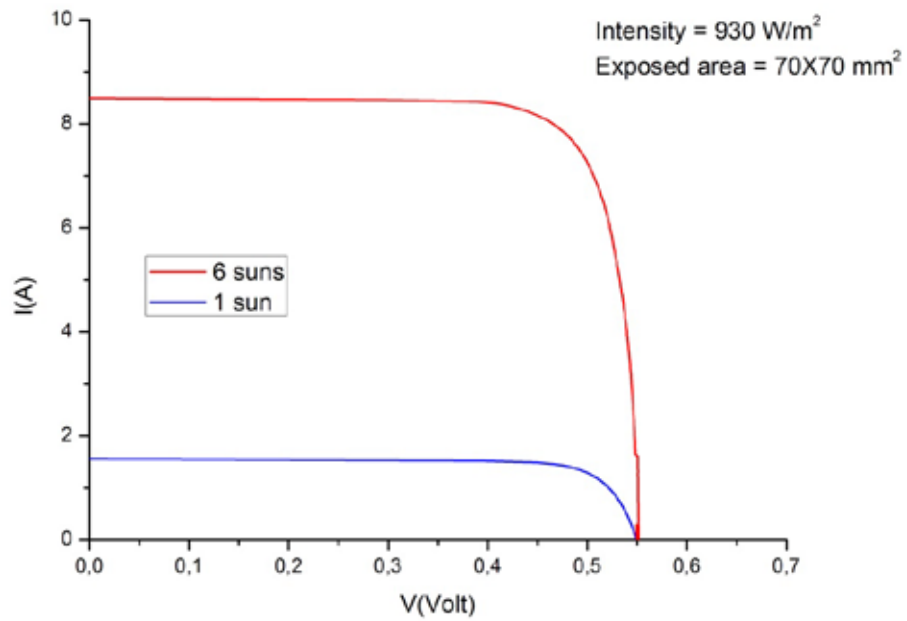


(α)

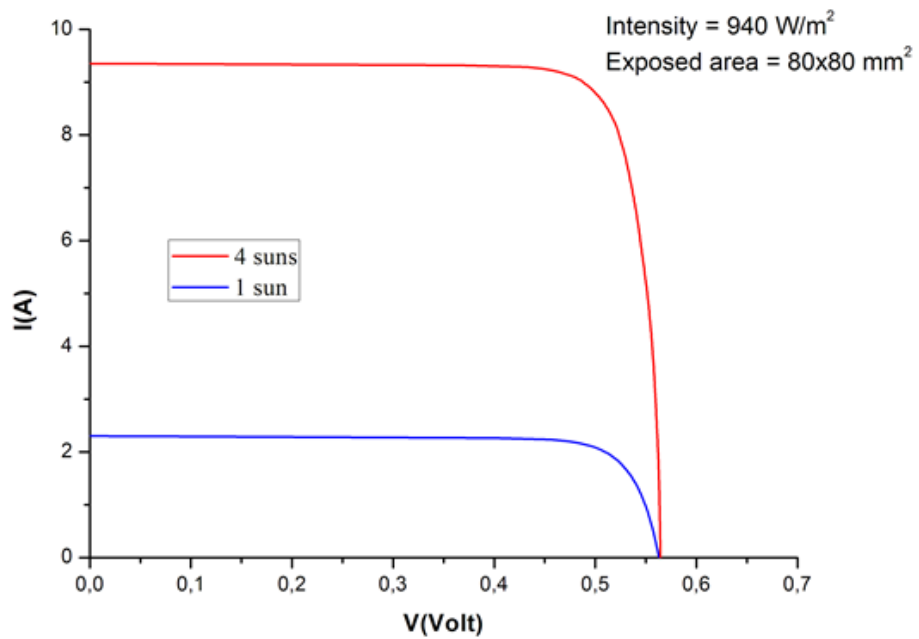


(β)

Εικόνα 4.13: Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης για (α) δείγμα εμβαδού $90 \times 125 \text{ mm}^2$ σε συγκέντρωση 2.5X και (β) δείγμα εμβαδού $50 \times 125 \text{ mm}^2$ σε συγκέντρωση 4X



(α)



(β)

Εικόνα 4.14: Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για (α) δείγμα εμβαδού 70X70 mm² σε συγκέντρωση 6X και (β) δείγμα εμβαδού 80X80mm² σε συγκέντρωση 4X

| Dimensions of exposed area (mm) | Percentage of cell surface coverage (%) | Length of exposed bus bars (mm) | Solar Radiation Intensity (W/m^2) | Solar Radiation Concentration | I_{sc} (A) | V_{oc} (mV) | I_m (A) | V_m (mV) | P_m | F.F. |
|---------------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------|-----------|------------|-------|------|
| 70 x 70 | 31.36 | 70 | 930 | 1 sun | 1.58 | 549 | 1.45 | 466 | 0.68 | 0.77 |
| 70 x 70 | 31.36 | 70 | 930 | 6 suns | 8.51 | 549 | 7.82 | 478 | 3.74 | 0.80 |
| 80 x 80 | 40.96 | 80 | 940 | 1 sun | 2.29 | 563 | 2.14 | 491 | 1.05 | 0.81 |
| 80 x 80 | 40.96 | 80 | 940 | 4 suns | 9.24 | 564 | 8.83 | 498 | 4.40 | 0.83 |
| 50 x 125 | 40 | 125 | 940 | 1 sun | 1.97 | 560 | 1.81 | 488 | 0.88 | 0.80 |
| 50 x 125 | 40 | 125 | 940 | 4 suns | 7.95 | 554 | 7.44 | 482 | 3.59 | 0.81 |
| 90 x 125 | 72.00 | 125 | 980 | 1 sun | 3.81 | 582 | 3.56 | 502 | 1.78 | 0.80 |
| 90 x 125 | 72.00 | 125 | 980 | 2.5 suns | 9.63 | 580 | 8.82 | 485 | 4.25 | 0.76 |

Πίνακας 4.8 Συγκεντρωτικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τις μετρήσεις σε συγκέντρωση των δειγμάτων με τις ωμικές συνδέσεις του κράματος Sn/Ag

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων και την καταγραφή των καμπυλών ρεύματος-τάσης υπολογίστηκαν τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τα οποία παρουσιάζονται συνολικά στον πίνακα 4.8. Για την περιοχή με εμβαδό $70 \times 70 \text{ mm}^2$ στο φωτοβολταϊκό στοιχείο $125 \times 125 \text{ mm}^2$ που εκτέθηκε σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία με τιμή 6X το ρεύμα βραχυκύκλωσης χωρίς συγκέντρωση θα έπρεπε να έχει τιμή 1.59 A σε ένταση 930 W/m^2 . Οι μετρούμενες τιμές έχουν ελάχιστη απόκλιση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης να είναι 1.58 A στη μέτρηση χωρίς συγκέντρωση και 8.51 A κάτω από συγκέντρωση 6X. Η ισχύς που παράγεται από ένα δείγμα με εμβαδόν 0.0049 m^2 είναι 3.74W.

Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν και για τα επόμενα μετρούμενα εμβαδά. Συγκεκριμένα, για τη φωτεινή περιοχή $80 \times 80 \text{ mm}^2$ σε φωτοβολταϊκό στοιχείο $156 \times 156 \text{ mm}^2$ η οποία μετρήθηκε σε συγκέντρωση μέχρι 4X η μετρούμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι $I_{sc} = 2.29 \text{ A}$ με την αντίστοιχη θεωρητική να έχει τιμή $I_{sc} = 2.27 \text{ A}$ ενώ, σε συγκέντρωση 4X μετρήθηκε ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc} = 9.24 \text{ A}$. Η ισχύς που παράγει το συγκεκριμένο εμβαδόν είναι 4.40 W. Συνακόλουθα, για τα επόμενα δύο εμβαδά $50 \times 125 \text{ mm}^2$ και $90 \times 125 \text{ mm}^2$ οι θεωρητικές τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης χωρίς συγκέντρωση

έχουν τιμή 2.06 A και 3.86 A αντίστοιχα με τις μετρούμενες να είναι πολύ κοντά σε αυτές με τιμές 1.97 A και 3.81 A. Το ηλιακό κύτταρο που καλύπτεται από πέτασμα με άνοιγμα στο κέντρο του εμβαδού 50x125 mm² μετρήθηκε υπό συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας 4X με μετρούμενη τιμή του ρεύματος να είναι 7.95A. Τέλος, η χαμηλότερη τιμή συγκέντρωσης που εφαρμόστηκε ήταν στο εμβαδόν 90x125 mm² με 2.5X όπου η θεωρητική τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης χωρίς συγκέντρωση ήταν 3.86A με τη μετρούμενη να είναι 3.81A δίνοντας μετρούμενο ρεύμα σε συγκέντρωση 9.63 A.

Από τις εξισώσεις (2.49) και (2.50) σε συνδυασμό με τον πίνακα 4.8 έγινε ο θεωρητικός υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης καθώς και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος στις διάφορες τιμές συγκεντρώσεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση 2.49 (κεφάλαιο 2)

$$I_{sc}(X) \gg XI_{sc} \quad (2.49)$$

Όπου I_{sc} = ρεύμα βραχυκύκλωσης χωρίς συγκέντρωση

X = τιμή της συγκέντρωσης

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση 2.50 (κεφάλαιο 2)

$$V_{oc}(X) = V_{oc}(1) + \frac{K_B T}{q} \ln(X) \quad (2.50)$$

Όπου

Όπου $K_B = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K

$q = 1.602 \times 10^{-19}$ Cb

$V_{oc}(1)$ = τάση ανοιχτού κυκλώματος χωρίς συγκέντρωση

X = τιμή συγκέντρωσης

T = η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε βαθμούς Kelvin

Παράδειγμα για το δείγμα εμβαδού $80 \times 80 \text{ mm}^2$ σε συγκέντρωση $4X$ οι θεωρητικοί υπολογισμοί του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος είναι οι εξής.

Για το ρεύμα βραχυκύκλωσης έχουμε:

$$I_{sc}(X) = XI_{sc}$$

$$\text{P } I_{sc}(4) = 4 \times 2.29 \text{ A} = 9.16 \text{ A}$$

Για την τάση ανοιχτού κυκλώματος έχουμε:

$$V_{oc}(X) = V_{oc}(1) + \frac{K_B T}{q} \ln X$$

$$\text{P } V_{oc}(X) = 0.563 \text{ V} + \frac{1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 300.15 \text{ K}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C}} \ln(4)$$

$$\text{P } V_{oc}(X) = 0.598 \text{ V}$$

Η αντίστοιχη διαδικασία έγινε για να υπολογιστούν το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτού κυκλώματος για όλα τα δείγματα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.9.

| Dimensions of exposed area (mm) | Solar Radiation Concentration | I_{sc} (A) | V_{oc} (V) |
|--|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 70 x 70 | 5.5 suns | 8.69 | 0.592 |
| 80 x 80 | 4.0 suns | 9.16 | 0.598 |
| 50 x 125 | 4.0 suns | 7.88 | 0.595 |
| 90 x 125 | 2.5 suns | 9.52 | 0.605 |

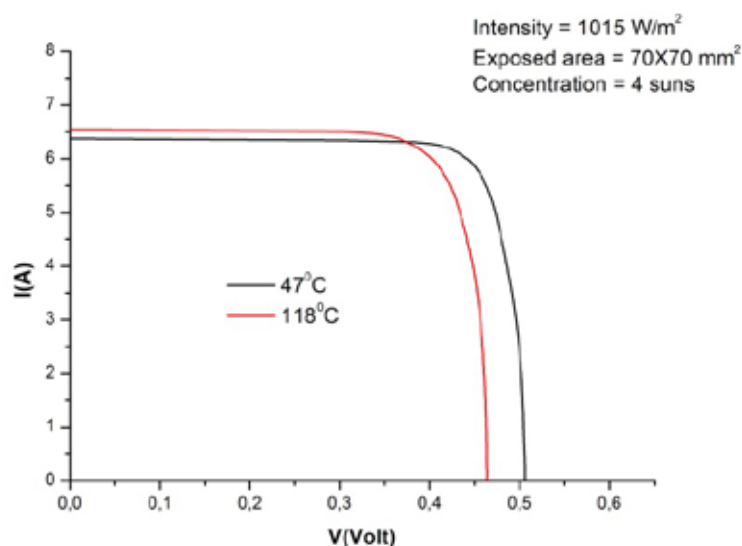
Πίνακας 4.9 Θεωρητικοί υπολογισμοί για τις μετρήσεις σε συγκέντρωση των δειγμάτων με τις ωμικές συνδέσεις του κράματος Sn/Ag

Με βάση την εξίσωση 2.49 περιμέναμε αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης με αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και μάλιστα με τιμή πολλαπλάσια της τιμής που είχε η συγκέντρωση. Από την σύγκριση πινάκων 4.8 και 4.9 μπορεί να επιβεβαιωθεί καλύτερα η συγκεκριμένη διαπίστωση. Για το δείγμα εμβαδού 70x70 σε τιμές συγκέντρωσης 5.5X το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπολογίστηκε 8.69 A με το μετρούμενο να έχει τιμή 8.51 A, αντίστοιχα για το δείγμα εμβαδού 80x80mm² η τιμή που προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσης είναι 9.16 A με την μετρούμενη να είναι 9.24 A. Για το δείγμα με ενεργό επιφάνεια 50x125 η θεωρητική τιμή από την μετρούμενη διαφέρουν κατά 0.07 A όπως και για το τελευταίο δείγμα με ενεργό επιφάνεια 90x125 η θεωρητική τιμή για το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι 9.52 A με τη μετρούμενη να είναι 9.63 A δηλαδή έχουν μια διαφορά 0.09 A. Για όλες τις τιμές της συγκέντρωσης η απόκλιση της πειραματικής τιμής από την θεωρητική είναι της τάξης του 1-2% οφείλεται κυρίως στην αυξομείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να επηρεάσει άμεσα την τιμή του ρεύματος.

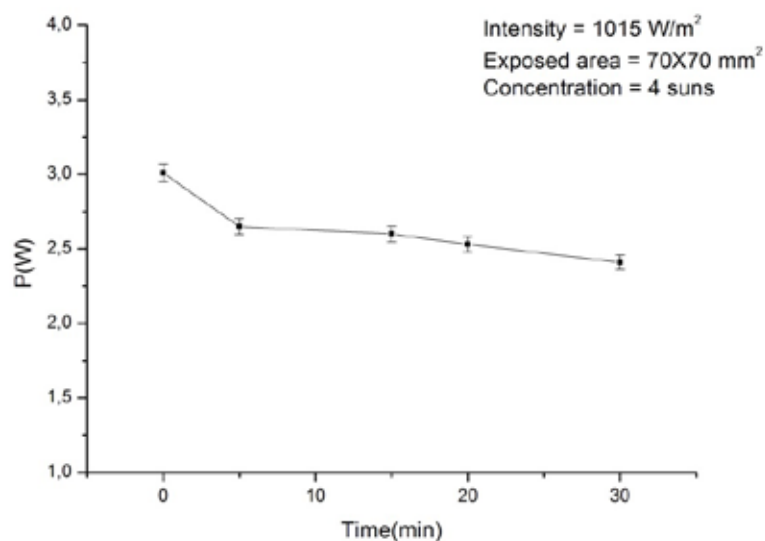
Για την τάση ανοιχτού κυκλώματος αναμένουμε μια λογαριθμική αύξηση στην τιμή της με την αύξηση της συγκέντρωσης. Προϋπόθεση για να συμβεί αυτό είναι να διατηρείται η θερμοκρασία του ηλιακού κυττάρου σταθερή. Η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας των δειγμάτων, σε συνθήκες συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας, συμβάλει στη μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Η ταχύτερη καταγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V σχεδόν ταυτόχρονα με την έκθεση του δείγματος στη συγκεντρωμένη ακτινοβολία επελέγη για να μειωθεί η επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μέτρησης των κυττάρων.

4.7.3 Μετρήσεις θερμοκασίας για το κράμα κασσιτέρου-αργύρου (Sn/Ag)

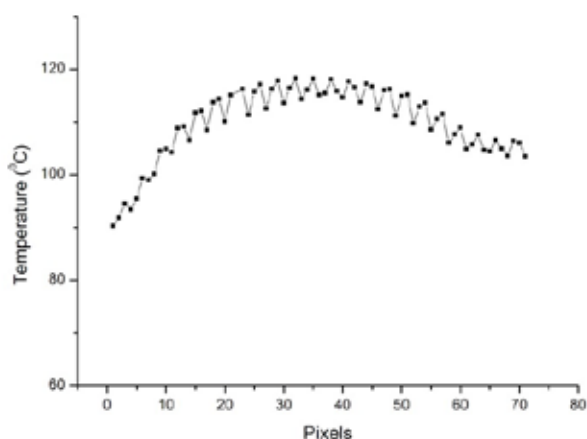
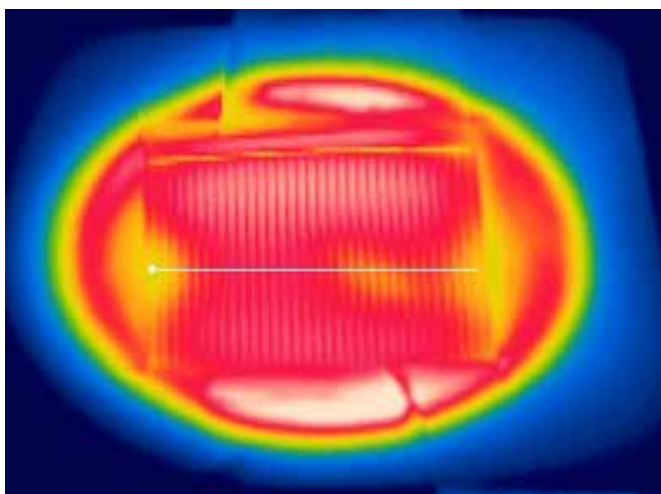
Παράλληλα με τις μετρήσεις ρεύματος-τάσης έγιναν και μετρήσεις θερμοκρασίας για τα δείγματα με το κράμα κασσιτέρου-αργύρου (sn/Ag) διατηρώντας σταθερή τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας και σε πραγματικό χρόνο γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αυτό έγινε με τη χρήση θερμοκάμερας εφαρμόζοντας τη μέθοδο παθητικής θερμογραφίας (passive thermography). Το σύνολο των μετρήσεων θερμοκρασίας υπό συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε σε ημέρες πλήρους ηλιοφάνειας με μέσο όρο έντασης του φυσικού φωτός 1000W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος πάνω από $30\text{ }^\circ\text{C}$. Μετρήθηκαν δύο δείγματα διαφορετικών διαστάσεων με το ίδιο συγκολλητικό κράμα στους μεταλλικούς επίπεδους αγωγούς Sn/Ag. Στο δείγμα $125 \times 125\text{ mm}^2$ επιλέχθηκε το εμβαδόν $70 \times 70\text{ mm}^2$ σε συγκέντρωση 4X για χρονική διάρκεια 30 λεπτών ενώ, στο ηλιακό στοιχείο $156 \times 156\text{ mm}^2$ επιλέχθηκε το εμβαδόν $85 \times 85\text{ mm}^2$ επίσης για χρονική διάρκεια 30 λεπτών. Οι μετρήσεις φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα πρώτα ως γραφικές ρεύματος-τάσης παρουσιάζοντας την πρώτη με την τελευταία χρονικά μέτρηση και μετά ως παραγόμενη ισχύς συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 4.15: Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για δείγμα εμβαδού $70 \times 70\text{ mm}^2$ σε συγκέντρωση 4X και αύξηση της θερμοκρασίας από 47°C μέχρι 118°C



Εικόνα 4.16: Η παραγόμενη ισχύς δείγματος με εμβαδόν $70 \times 70 \text{ mm}^2$ σε συγκέντρωση 4X για χρονική διάρκεια τριάντα λεπτών.



Εικόνα 4.17: Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος μετά τη μισή ώρα έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 4X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.

Από την εικόνα 4.15 και από την εικόνα της θερμογραφίας στην τελευταία μέτρηση φαίνεται η κατακόρυφη αύξηση της θερμοκρασίας σε συγκέντρωση 4X στον επίπεδο αγωγό χαλκού σε διάρκεια τριάντα λεπτών. Η ημέρα που πραγματοποιήθηκε η μέτρηση εσκεμμένα ήταν από τις πιο θερμές του καλοκαιριού με θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις μεσημβρινές ώρες όπου πραγματοποιήθηκε η έκθεση του δείγματος σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας 38°C . Η τιμή αυτή δικαιολογεί την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας από

την πρώτη κιόλας μέτρηση η οποία είναι στους 47 °C και αυξάνεται μετά το χρονικό διάστημα της μισής ώρας στους 118 °C.

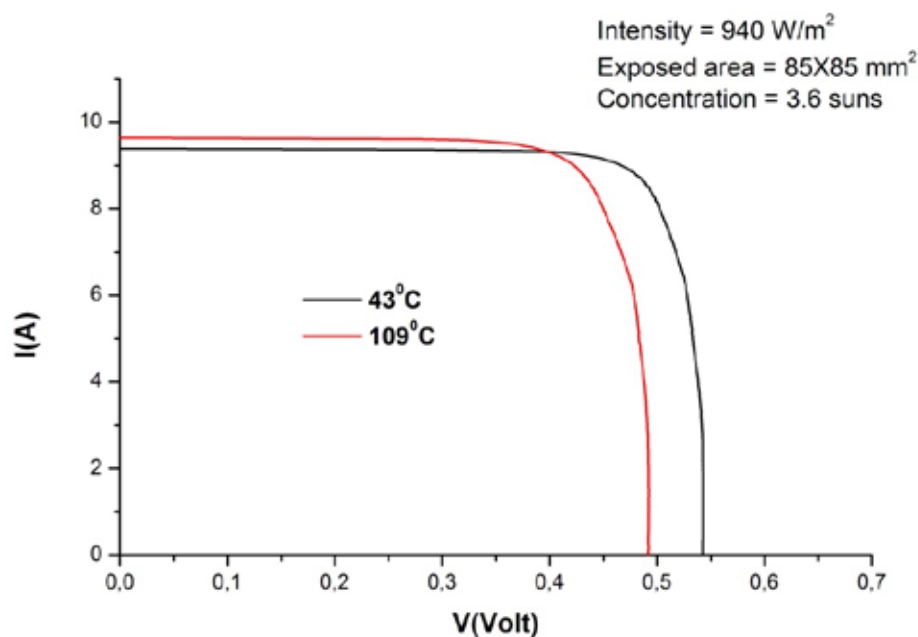
Αναλύοντας τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δείγματος από την εικόνα 4.15 παρατηρείται μια αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης από τα 6.4 A στα 6.56 A με την αύξηση της θερμοκρασίας και ταυτόχρονη μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος από τα 0.506 V στα 0.464 V. Η αύξηση του ρεύματος και η μείωση της τάσης είναι σωστή σύμφωνα με τη θεωρία. Σύμφωνα με τους θερμικούς συντελεστές της κατασκευάστριας εταιρείας - 0.0022V/K και +0.0016A/K για το ρεύμα και την τάση αντίστοιχα, η διαφορά της θερμοκρασίας της πρώτης με την τελευταία μέτρηση είναι 71°C το οποίο συνεπάγεται μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά 0.1562V και 0.1136 A αντίστοιχα. Έτσι λοιπόν, οι θεωρητικές τιμές για την τελευταία μέτρηση είναι $V_{oc}=0.3498$ V και $I_{sc}=6.51$ A. Από τις πειραματικές τιμές παρατηρείται ότι η μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος είναι μικρότερη από την αναμενόμενη αντίθετα οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης δείχνουν να συμφωνούν. Η δεξαμενή απαγωγής θερμότητας δρα καταλυτικά στη συγκεκριμένη εφαρμογή κυρίως για την μικρότερη πτώση στην τιμή της τάσης αλλά και γενικά στην παραγόμενη ισχύ του δείγματος. Αυτό φαίνεται καλύτερα στην εικόνα 4.16 όπου απεικονίζεται η παραγόμενη ισχύς ως συνάρτηση του χρόνου. Εδώ φαίνεται ότι η ισχύς μετά από την αρχική απότομη πτώση λόγω αύξησης της θερμοκρασίας «ισορροπεί» γύρω από την τιμή των 2.5 W μέχρι και μετά από μισή ώρα έκθεσης σε συγκέντρωση ακτινοβολίας 4X. Ουσιαστικά η δεξαμενή θερμότητας ψύχει σωστά το δείγμα σε τέτοιες τιμές συγκεντρώσεων με αποτέλεσμα να επηρεάζεται θετικά η τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και να μην μειώνεται περαιτέρω.

Οι ωμικές συνδέσεις του κράματος Sn/Ag παρά τις συνεχείς μετρήσεις σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλές και σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας δείχνουν αξιόπιστες ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Γραφικά μπορεί να παρατηρηθεί από τις τιμές του ρεύματος που διαχειρίζονται, στη συγκεκριμένη περίπτωση 6.5 A για ένταση ακτινοβολίας περίπου 4000W πάνω τους και μηχανικά από την αντοχή τους χωρίς να αστοχήσουν σε συνεχείς κύκλους θέρμανσης – ψύξης κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών.

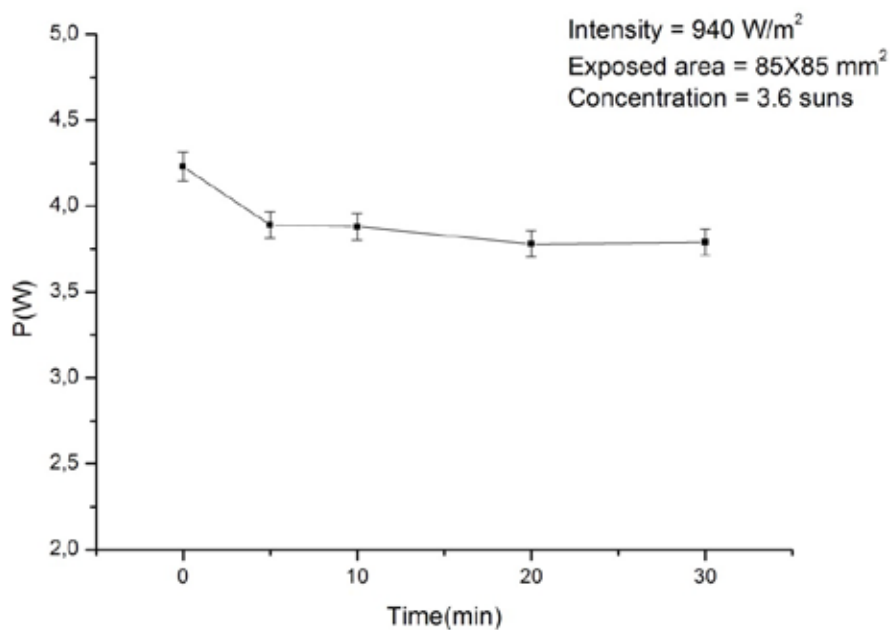
Ένας ίδιος συνδυασμός μετρήσεων δοκιμάστηκε σε μεγαλύτερης επιφάνειας φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου. Οι διαστάσεις του είναι 156 x 156 mm², με την ενεργό επιφάνεια να έχει εμβαδόν 85 x 85 mm². Εδώ το προς μέτρηση ηλιακό κύτταρο δέχτηκε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας με τιμή 3.6X για χρονική διάρκεια σαράντα λεπτών. Κάθε πέντε λεπτά πραγματοποιούνταν μετρήσεις ρεύματος - τάσης ώστε να φανεί η ακριβής συμπεριφορά των

ηλεκτρικών μεγεθών του δείγματος. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν αρκετά υψηλή, όπως και στην προηγούμενη μέτρηση, με τιμή 36°C υπό σκιά.

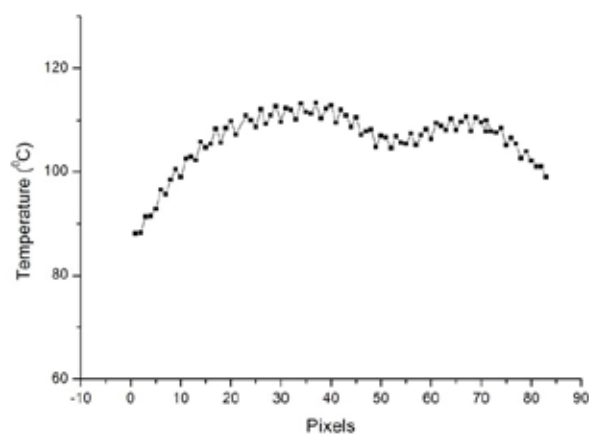
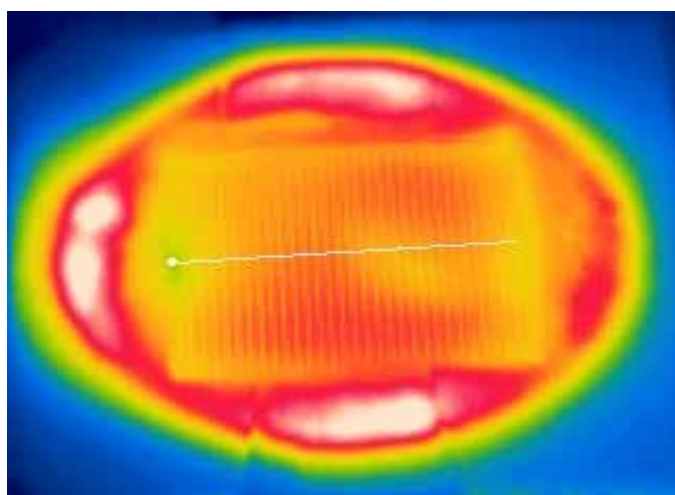
Από την εικόνα 4.18 φαίνεται ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του δείγματος αυξήθηκε σε χρονικό διάστημα σαράντα λεπτών κατά 66 βαθμούς με ταυτόχρονη αύξηση του ρεύματος από τα 9.40 A στα 9.64 A και μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος από 0.59V σε 0.54V. Από τους συντελεστές θερμοκρασίας του συγκεκριμένου δείγματος προκύπτει θεωρητικά μείωση της τάσης κατά 0.1518 V ,δηλαδή τελική τιμή $V_{oc}= 0.438 \text{ V}$, και άξηση του ρεύματος κατά 0.0726 A , δηλαδή τελική τιμή ρεύματος $I_{sc}=9.47 \text{ A}$. Και σε αυτή την περίπτωση το σύστημα απαγωγής θερμότητας φαίνεται να περιορίζει την απότομη μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος που οφείλεται σε άνοδο της θερμοκρασίας ενώ παράλληλα η μεγαλύτερη τιμή στο μετρούμενο ρεύμα οφείλεται σε άνοδο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Παρά τις υψηλές θερμοκρασίες και την εφαρμογή συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας για μεγάλο χρονικό διάστημα οι ωμικές συνδέσεις συμπεριφέρονται αξιόπιστα όπως δείχνουν τα καταγεγραμμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Ρεύματα με ένταση μεγαλύτερη από 9 A παράγονται από το φωτοβολταϊκό κύτταρο σε όλη τη διάρκεια μέτρησης. Επίσης, από την εικόνα 4.19 η οποία δείχνει την παραγόμενη ισχύ ως προς το χρόνο της μέτρησης παρατηρείται μια σταθεροποίηση της τιμής της ισχύος στα 3.8W.



Εικόνα 4.18: Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για δείγμα εμβαδού 85x85 mm² σε συγκέντρωση 3.6X και αύξηση της θερμοκρασίας από 43°C μέχρι 109°C



Εικόνα 4.19: Η παραγόμενη ισχύς δείγματος με εμβαδόν 85x85mm² σε συγκέντρωση 3.6X για χρονική διάρκεια τριάντα λεπτών



Εικόνα 4.20: Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος μετά τη μισή ώρα έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 3.6X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.

4.7.4 Χαρακτηριστικές I-V για τις ωμικές συνδέσεις του κράματος βισμούθιου-κασσιτέρου (Bi/Sn)

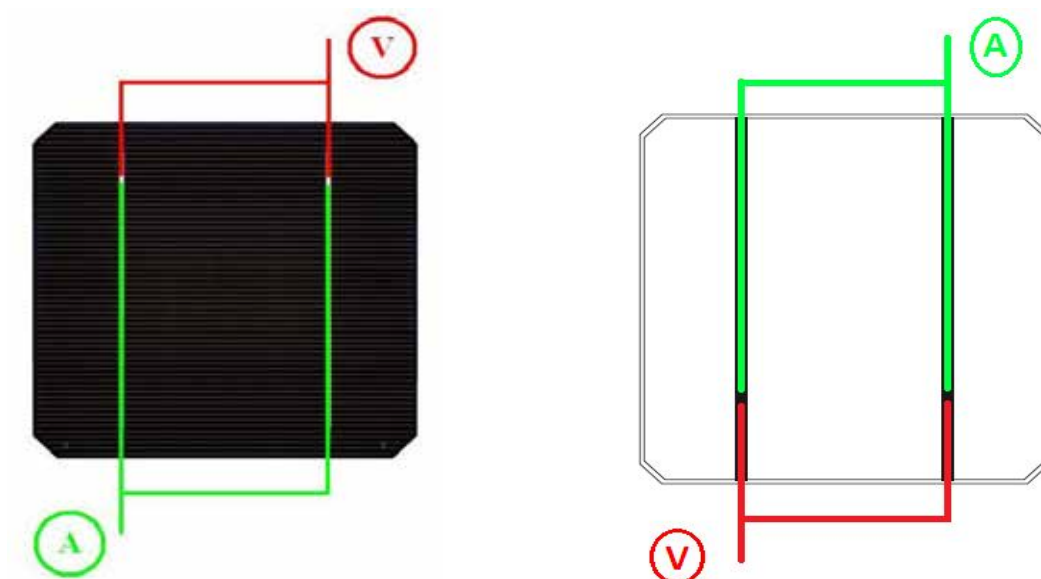
Για να συγκριθούν οι διαφορετικές συνδεσμολογίες σε μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου κατασκευάστηκαν ωμικές συνδέσεις με επίπεδο αγωγό χαλκού και επικάλυψη από το κράμα Bi/Sn σε μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου 2 bus bars διαστάσεων 125x125 mm² και 3 bus bars διαστάσεων 156x156 mm². Τα ηλιακά κύτταρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρείας Sunways και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φαίνονται στους πίνακες 4.10 και 4.11. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το source-measure unit 2611A της εταιρείας KEITHLEY το οποίο ρυθμίστηκε σαν πηγή παλμικού ρεύματος, με σάρωση από τιμές 0A έως 10A με ταυτόχρονη μέτρηση της τάσης. Ο συνολικός χρόνος που διαρκούσε η μέτρηση ήταν 15 δευτερόλεπτα καθώς το πλάτος του παλμού ορίστηκε στα 50 μs, με 300 μετρούμενα σημεία στη χαρακτηριστική I-V.

| | | | |
|----------------|-------|----------------------------|--------------------|
| Isc (A) | 5.48 | Temp.Coefficients | -2.2mV/K, +1.6mA/K |
| Voc (V) | 0.618 | Pmax (W) | 2.65 |
| FF % | 78.3 | I_{max} (A) | 5.20 |
| η% | 17.1 | V_{max} (V) | 0.510 |

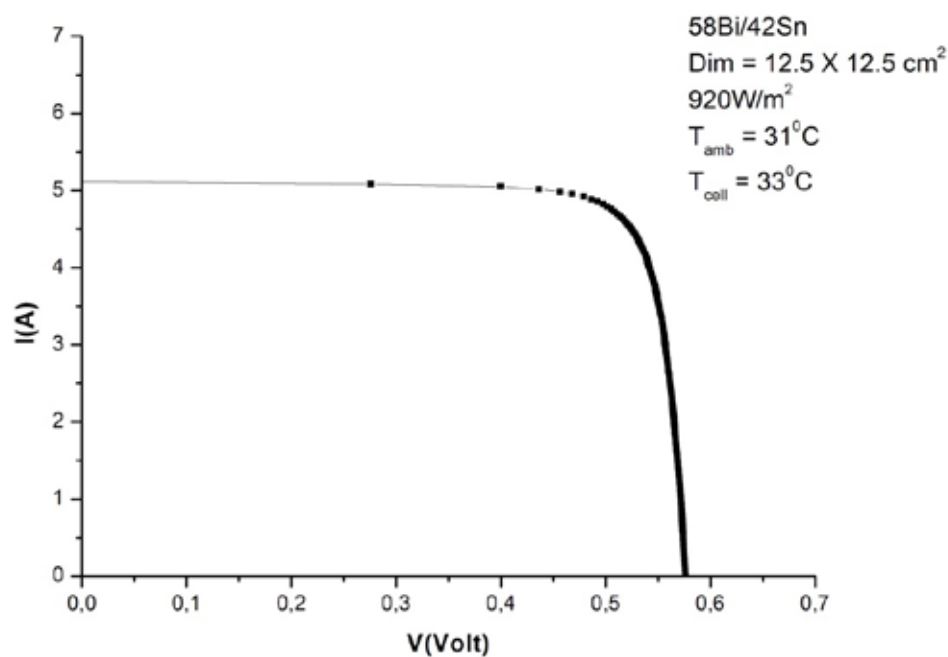
Πίνακας 4.10 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλιακού κυττάρου διαστάσεων 125x125 mm² της εταιρείας Sunways

| | | | |
|----------------|-------|----------------------------|--------------------|
| Isc (A) | 8.82 | Temp.Coefficients | -2.3mV/K, +1.1mA/K |
| Voc (V) | 0.616 | Pmax (W) | 4.18 |
| FF % | 77.3 | I_{max} (A) | 8.20 |
| η% | 17.5 | V_{max} (V) | 0.510 |

Πίνακας 4.11 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλιακού κυττάρου διαστάσεων 156x156 mm² 3 bus bars της εταιρείας Sunways



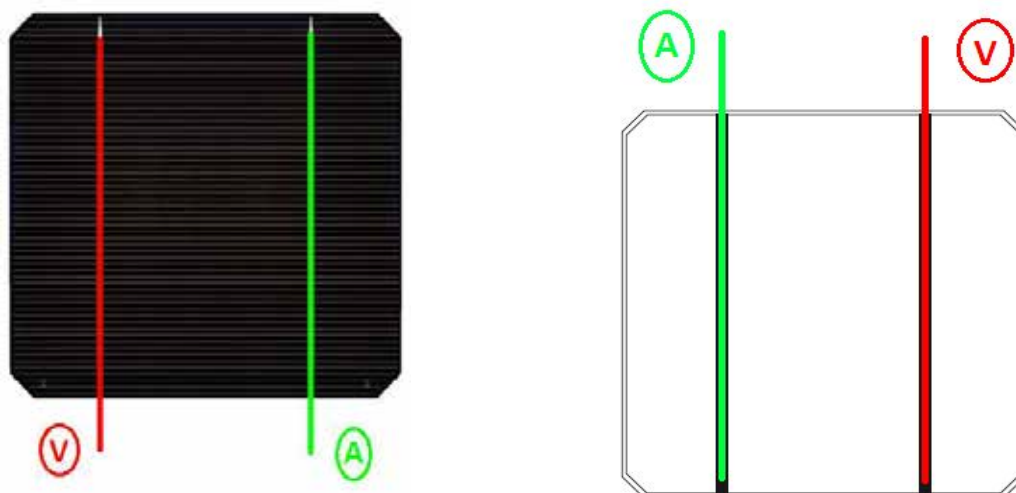
Εικόνα 4.21 Δημιουργία οκτώ ωμικών συνδέσεων σε μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου διαστάσεων 125 x 125 mm²



Εικόνα 4.22 Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία των οκτώ επαφών για το flat wire με το κράμα Bi/Sn

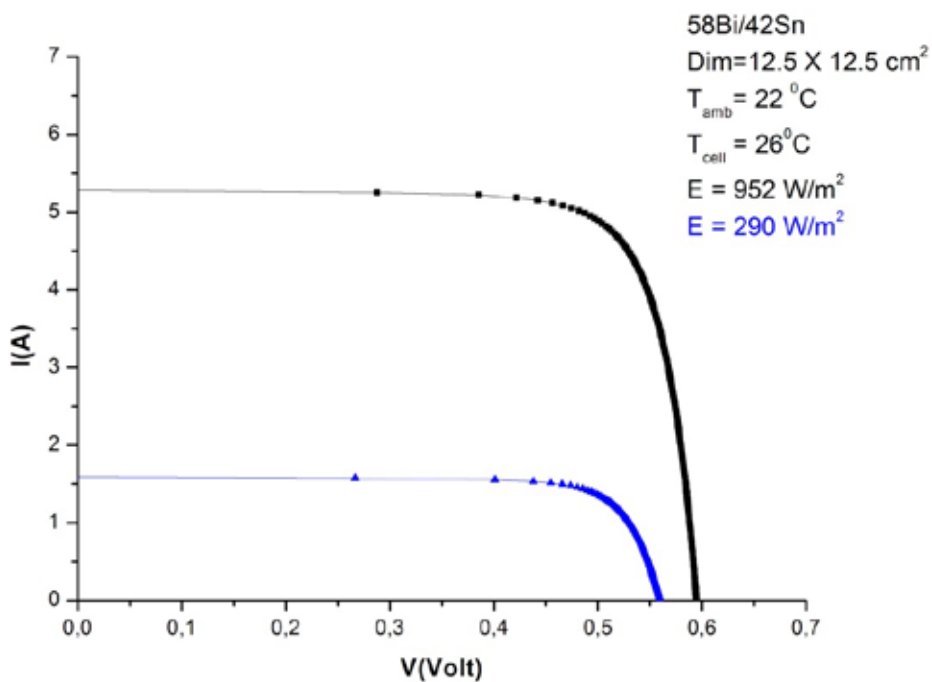
| | | | |
|----------------|-------|----------------------------|---------|
| Isc (A) | 5.11 | Rseries (Ω) | 0.00268 |
| Voc (V) | 0.576 | Pmax (W) | 2.42 |
| FF % | 82.0 | I_{max} (A) | 4.75 |
| η% | 16.8 | V_{max} (V) | 0.510 |

Πίνακας 4.12 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τη συνδεσμολογία των οκτώ επαφών με το διπλό καλώδιο για το flat wire με το κράμα Bi/Sn για ένταση 920 W/m²



Εικόνα 4.23 Πάνω: Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία του διπλού καλωδίου για το flat wire με το κράμα Bi/Sn για το δείγμα $125 \times 125 \text{ mm}^2$

Κάτω: Λεπτομερής ανάλυση της διάταξης του διπλού καλωδίου



Εικόνα 4.24 Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία των τεσσάρων επαφών με το διπλό καλώδιο για το flat wire με το κράμα Bi/Sn για διαφορετικές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας.

| | | | |
|---------------------------|-------|-------------------------------|---------|
| I_{sc} (A) | 5.31 | R_{series} (Ω) | 0.00626 |
| V_{oc} (V) | 0.590 | P_{max} (W) | 2.45 |
| FF % | 78.0 | I_{max} (A) | 4.81 |
| η% | 16.5 | V_{max} (V) | 0.510 |

Πίνακας 4.13 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τη συνδεσμολογία των τεσσάρων επαφών με το διπλό καλώδιο για το flat wire με το κράμα Bi/Sn για ένταση 950 W/m²

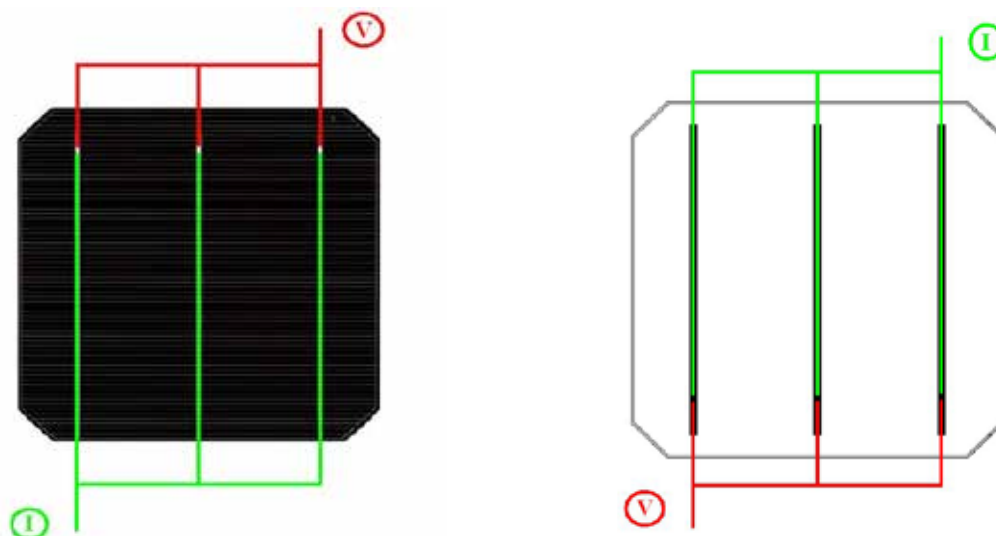
| | | | |
|---------------------------|-------|-------------------------------|---------|
| I_{sc} (A) | 1.59 | R_{series} (Ω) | 0.01983 |
| V_{oc} (V) | 0.560 | P_{max} (W) | 0.70 |
| FF % | 78.0 | I_{max} (A) | 1.48 |
| η% | 15.5 | V_{max} (V) | 0.470 |

Πίνακας 4.14 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τη συνδεσμολογία των τεσσάρων επαφών με το διπλό καλώδιο για το flat wire με το κράμα Bi/Sn 290 W/m²

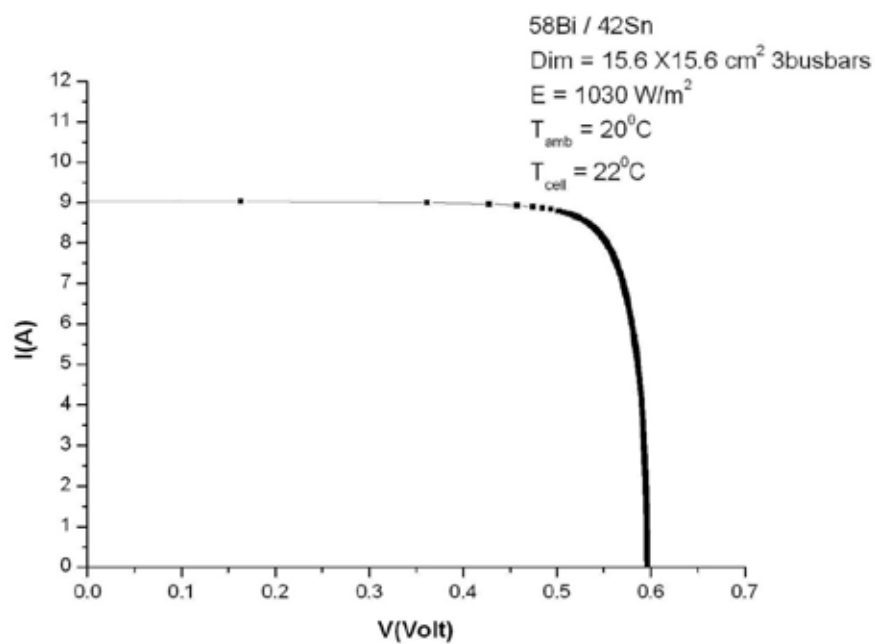
Για τις ωμικές συνδέσεις του κράματος Bi/Sn στη συνδεσμολογία των οκτώ επαφών τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 4.12. Η θερμοκρασία του ηλιακού κυτάρου την στιγμή της μέτρησης ήταν 33 °C όπου σε συνδυασμό με τους συντελεστές θερμοκρασίας (για την τάση -0.0022V/K και για το ρεύμα +0.0016 A/K) θα προκαλούσε πτώση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος κατά 0.0176V και αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά 0.0128 A. Έτσι λοιπόν η θεωρητική τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος είναι $V_{oc}=0.6$ V και του ρεύματος βραχυκύκλωσης $I_{sc}=5.49$ A. Αφού η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όταν πραγματοποιήθηκε η μέτρηση ήταν 920W/m² το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα έπρεπε να μειωθεί αναλογικά και να έχει τιμή $I_{sc}=5.04$ A με τη μετρούμενη να είναι σε τιμή $I_{sc}=5.11$ A. Η παραγόμενη ισχύς είναι 2.4W και η τιμή της αντίστασης σε σειρά είναι 0,00268Ω αντίστοιχη με τις ωμικές συνδέσεις του κράματος Sn/Ag.

Για τη συνδεσμολογία των τεσσάρων συνδέσεων με το διπλό επίπεδο καλώδιο (flat ribbon) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και σε χαμηλές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας για να διαπιστωθεί η ηλεκτρική συμπεριφορά του εν λόγω κράματος σε χαμηλά ρεύματα. Για την γραφική παράσταση ρεύματος-τάσης σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μικρότερη των 1000 W/m² αναμέναμε μια μικρή πτώση στην τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Συγκεκριμένα στα 950 W/m² η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που αναμένεται να μετρηθεί είναι $I_{sc}=5.21$ A και η μετρούμενη είναι $I_{sc}=5.31$ A. Όσον αφορά τους θερμοκούς συντελεστές του δείγματος σε θερμοκρασία 26 °C η πτώση στην τάση λόγω αύξησης της θερμοκρασίας θα είναι 0.0022 V και η αύξηση στο ρεύμα 0.0016 A. Στη χαμηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας που μετρήθηκε στα 290 W/m² αναμέναμε μεγάλη μείωση και στο ρεύμα βραχυκύκλωσης και στην τάση ανοιχτού κυκλώματος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο είναι ανάλογο της

έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, μετρήθηκε $I_{sc}= 1.59$ A και η προβλεπόμενη τιμή σύμφωνα με τις βαθμονομημένες μετρήσεις της εταιρείας Sunways για την ίδια ένταση ακτινοβολίας υπολογίστηκε ως 1.589 A. Η αναμενόμενη μικρότερη τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος εξηγείται από την εξίσωση 2.42 όπου φαίνεται η λογαριθμική της εξάρτηση της έντασης του ρεύματος από την μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο νέο δείγμα της Sunways με τις τρεις μεταλλικές επαφές πραγματοποιήθηκαν δώδεκα ωμικές συνδέσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 4.25. Λόγω χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος η τάση ανοιχτού κυκλώματος έχει τιμή $V_{oc}=0.590$ V σε αντιστοιχία με την τιμή $V_{oc}=0.616$ V. Η αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στα 1030 W/m² επιδρά στην αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης το οποίο έχει τιμή $I_{sc}=9.06$ A με την αναμενόμενη τιμή στη συγκεκριμένη ένταση να είναι $I_{sc}=9.08$ A. Η παραγόμενη ισχύς σε αυτή την περίπτωση είναι 4.53W και η τιμή της αντίστασης σε σειρά υπολογίστηκε ως 0.00024Ω που είναι και η μικρότερη που μετρήθηκε.



Εικόνα 4.25 Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία των δώδεκα επαφών για το flat wire με το κράμα Bi/Sn σε ηλιακό κύτταρο 3 busbars με διαστάσεις $156 \times 156 \text{ mm}^2$.



Εικόνα 4.26 Χαρακτηριστική I-V με τη συνδεσμολογία των δώδεκα επαφών για το flat wire με το κράμα Bi/Sn σε ηλιακό κύτταρο 3 busbars με διαστάσεις $156 \times 156 \text{ mm}^2$ και ένταση ακτινοβολίας 1030 W/m^2

| | | | |
|----------------------------|-------|--------------------------------------|---------|
| Isc (A) | 9.06 | Rseries (Ω) | 0.00024 |
| Voc (V) | 0.590 | Pmax (W) | 4.50 |
| FF % | 84.2 | I_{max} (A) | 8.49 |
| η % | 18.25 | V_{max} (V) | 0.530 |

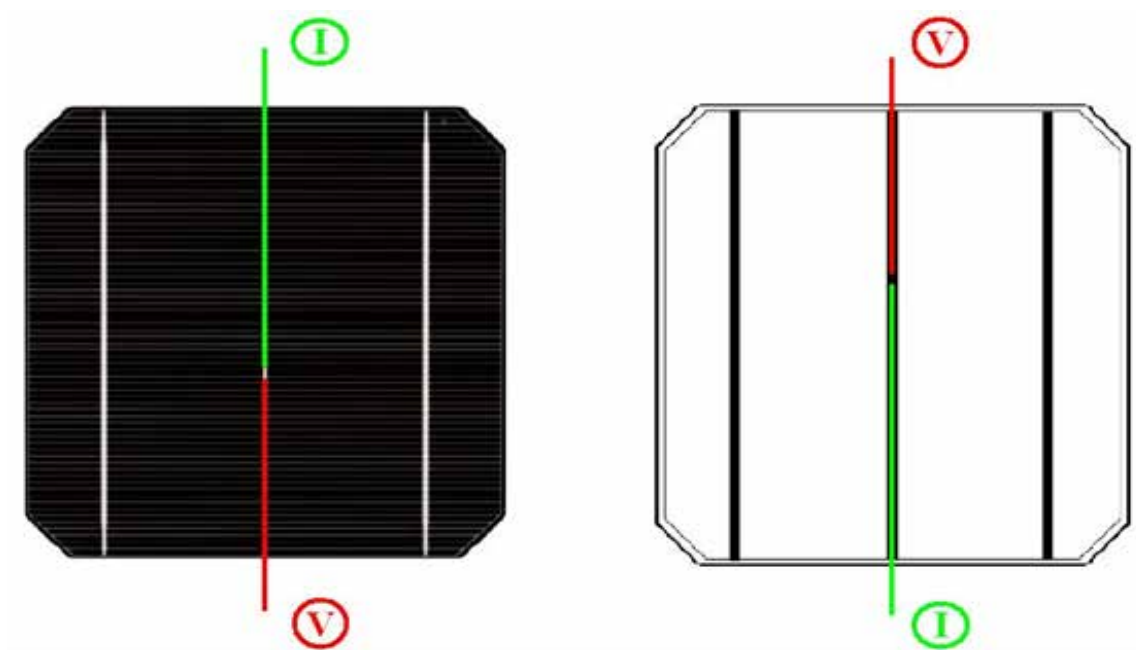
Πίνακας 4.15 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τη συνδεσμολογία των δώδεκα επαφών για το flat wire με το κράμα Bi/Sn

4.7.5 Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας για το κράμα βισμούθιου-κασσιτέρου (Bi/Sn)

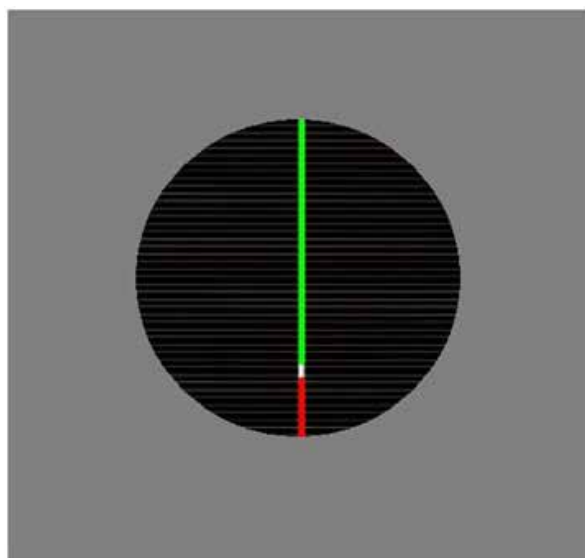
Για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας και να δοκιμαστεί το κράμα Bi/Sn σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας κατασκευάστηκαν ωμικές συνδέσεις σε μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου 3 bus bars. Τα ηλιακά κύτταρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρείας Sunways και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 4.11.

Στις συγκεκριμένες μετρήσεις δεν πραγματοποιήθηκαν 12 ωμικές συνδέσεις δεδομένου ότι τα φιλικά προς το περιβάλλον κράματα θα δοκιμαστούν σε τιμές συγκέντρωσης μέχρι και 16X με αποτέλεσμα η ενεργός περιοχή του κυττάρου να είναι μικρότερη από τις διαστάσεις του δείγματος της Sunways. Λόγω του περιορισμού στην ανώτερη τιμή του ρεύματος που μπορεί να μετρηθεί από το source measure unit 2611A της εταιρείας Keithley και με βάση τις τιμές των επιλεγμένων συγκεντρώσεων κατασκευάστηκαν πετάσματα με κυκλικά ανοίγματα που καλύπτουν το δείγμα κατά τη διάρκεια της μέτρησης αφήνοντας ακάλυπτη στο κέντρο του μια κυκλική περιοχή η οποία δέχεται το σύνολο της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας.

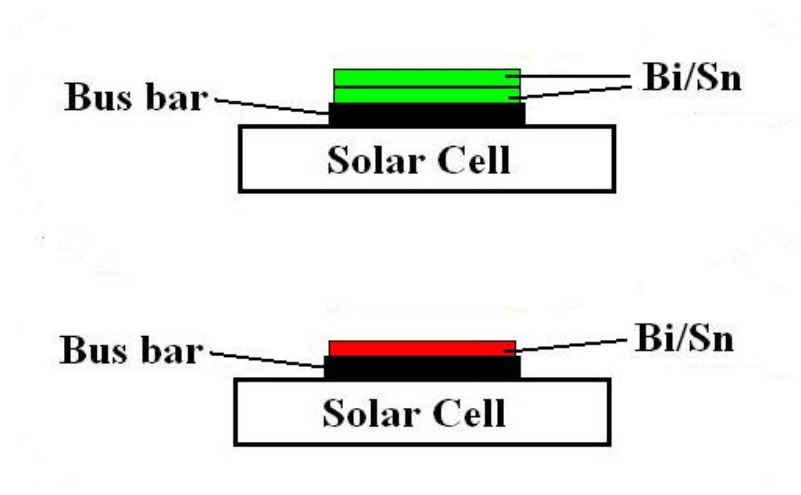
Για το σκοπό αυτό έγιναν 4 ωμικές συνδέσεις μόνο στον κεντρικό μεταλλικό αγωγό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και συγκεκριμένα στην «φωτεινή» περιοχή του. Οι ωμικές συνδέσεις που αντιστοιχούν στο ρεύμα (I source) πραγματοποιήθηκαν με διπλό επίπεδο καλώδιο του ίδιου κράματος (BiSn), το οποίο ενώθηκε πριν την σύνδεσή του με το busbar, για καλύτερη διαχείριση των υψηλών ρευμάτων. Οι αντίστοιχες συνδέσεις για την μέτρηση της τάσης έγιναν με μονό επίπεδο αγωγό χαλκού με Bi/Sn. Στην εικόνα 4.27 φαίνεται ολόκληρο το δείγμα με τη διάταξη των ωμικών συνδέσεων μόνο στον κεντρικό αγωγό και στις 2 όψεις του καθώς και η εικόνα του δείγματος μετά την τοποθέτηση του πετάσματος με την ενεργό περιοχή να ξεχωρίζει στο κέντρο του. Στην εικόνα 4.28 φαίνεται μια κάθετη τομή του προς μέτρηση δείγματος στο οποίο παρουσιάζεται η διαφορά στην κατασκευή των συνδέσεων που αφορούν κατά τη διάρκεια της μέτρησης τους ακροδέκτες του ρεύματος και της τάσης.



Εικόνα 4.27 Κατασκευή δείγματος με τέσσερις ωμικές συνδέσεις Bi/Sn στο κεντρικό μεταλλικό αγωγό για μετρήσεις συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας



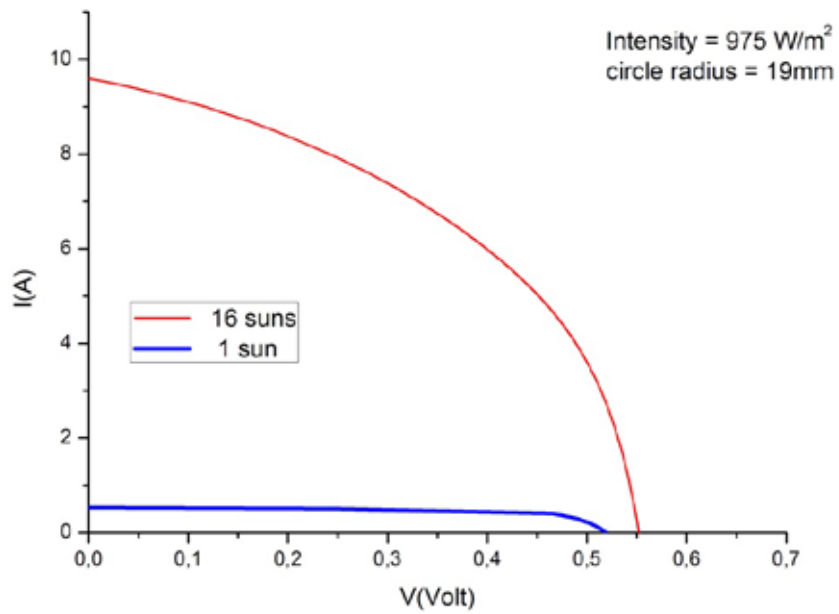
Εικόνα 4.28 Εικόνα του δείγματος μετά την τοποθέτηση του πετάσματος με την ενεργό περιοχή να ξεχωρίζει στο κέντρο του.



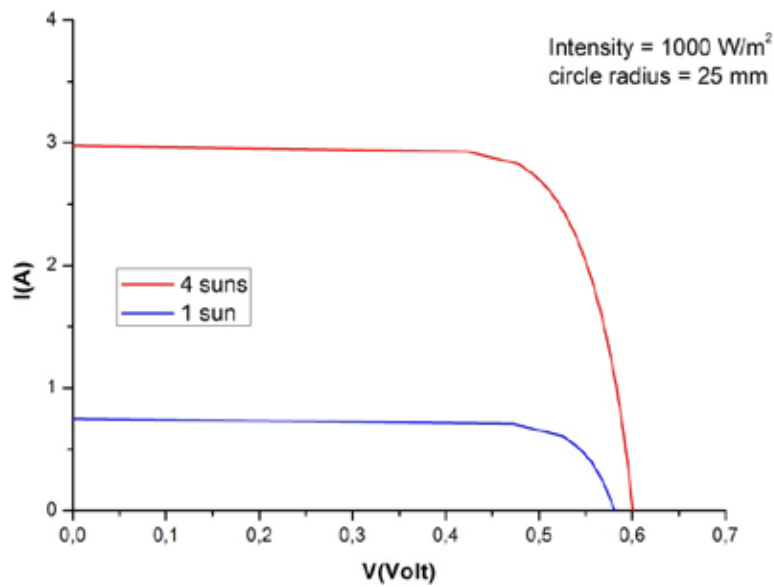
Εικόνα 4.29 Λεπτομερής ανάλυση της εικόνας των επίπεδων μεταλλικών αγωγών με το ηλεκτρόδιο του ρεύματος να έχει διπλό tabbing wire (πράσινο χρώμα)

Το δείγμα που κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε σε δεξαμενή απαγωγής θερμότητας με την εφαρμογή θερμοαπαγωγικής κόλλας και έπειτα στην ειδική βάση στην οποία προσαρμόζονται κυκλικοί φακοί Fresnel της εταιρείας Edmund Optics. Το δείγμα με το κράμα συγκόλλησης Bi/Sn υποβλήθηκε σε ηλεκτρικές μετρήσεις συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας για τιμές 4X, 5X, 9X, 10X και τέλος 16X για να διαπιστωθεί και η αξιοπιστία των ωμικών συνδέσεων σε συχνούς θερμικούς κύκλους θέρμανσης-ψύξης. Οι τιμές των συγκεντρώσεων επιτεύχθηκαν χρησιμοποιώντας φακό Fresnel από την εταιρεία Edmund Optics με διάμετρο 18.25 ίντσες. Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μέτρηση υπολογίστηκε γεωμετρικά με τη μέθοδο των ομοίων τριγώνων όπως και στις μετρήσεις συγκέντρωσης για το κράμα Sn/Ag.

Πριν από κάθε μέτρηση I-V το δείγμα, το οποίο ήταν τοποθετημένο στο σύστημα μετρήσεων προσανατολιζόταν κάθετα προς το προσπίπτον φως με τη βοήθεια του μετρητή ηλιακής ακτινοβολίας Macsolar και καταγραφόταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Αφού ολοκληρωνόταν η μέτρηση σε ακτινοβολία 1 sun (χωρίς συγκέντρωση) για λόγους βαθμονόμησης στη συνέχεια το δείγμα καλυπτόταν ώστε να ψυχθεί πάλι στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η απομάκρυνση του καλύμματος συνοδευόταν από την ταυτόχρονη έναρξη της καταγραφής της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης. Η καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών έγινε με το Source Measure Unit της εταιρείας Keithley όπου επιλέχθηκε πηγή παλμικού ρεύματος από 0 A μέχρι 10 A, με μικρότερο πλάτος παλμού 40μs αυτή τη φορά και συνολικά 200 μετρούμενα σημεία με τη μέτρηση να διαρκεί συνολικά μόνο 8 δευτερόλεπτα ώστε να αποφευχθεί κατά το δυνατόν η θέρμανση του δείγματος.

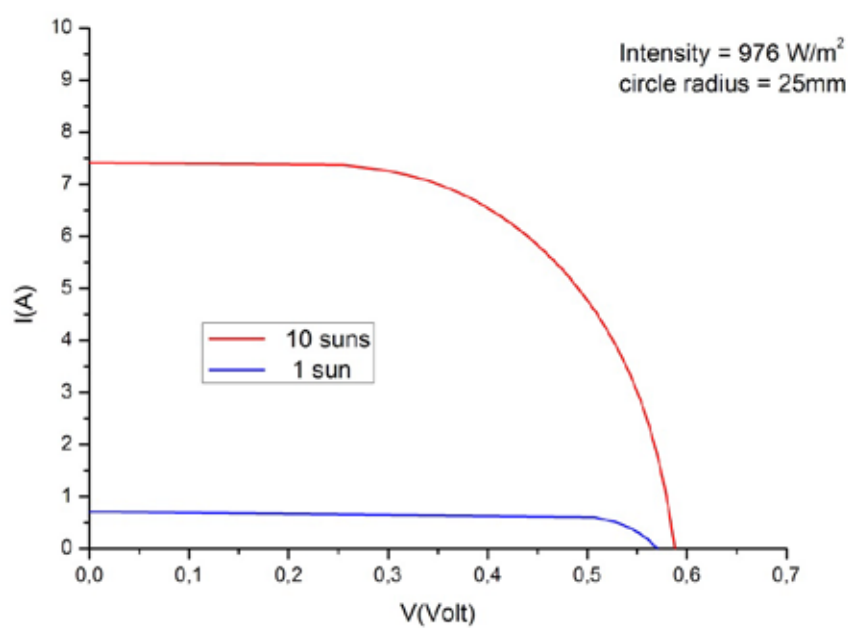


(α)

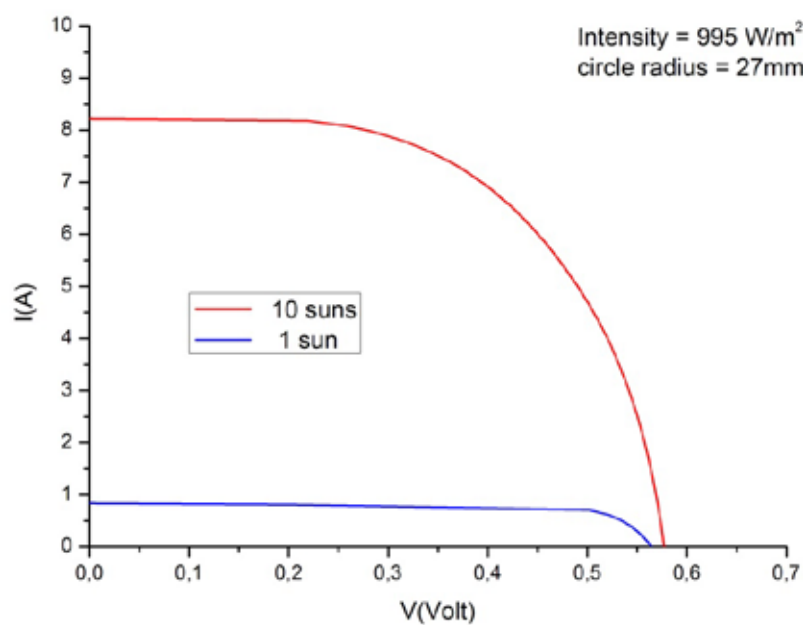


(β)

Εικόνα 4.30: Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για (α) δείγμα με ακτίνα 19mm σε συγκέντρωση 16X και (β) δείγμα με ακτίνα 25mm σε συγκέντρωση 4X

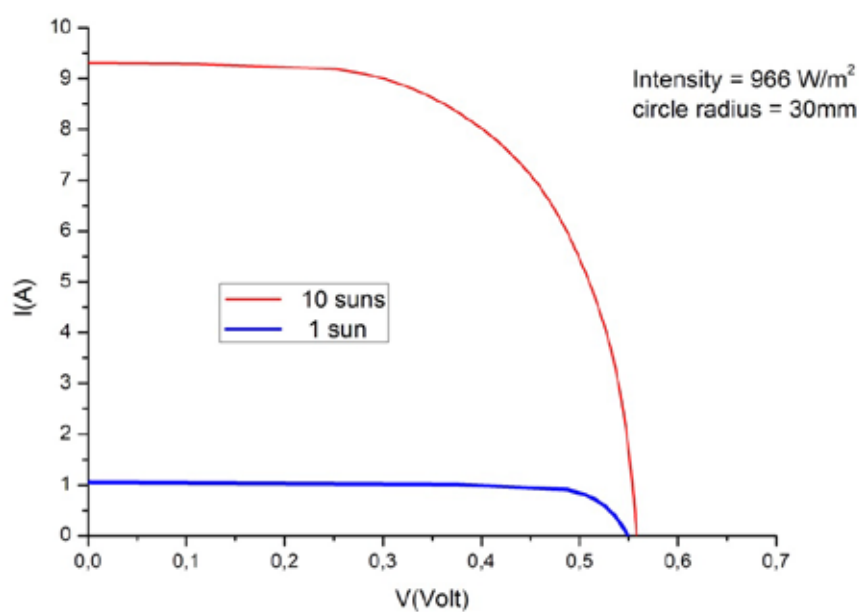


(α)

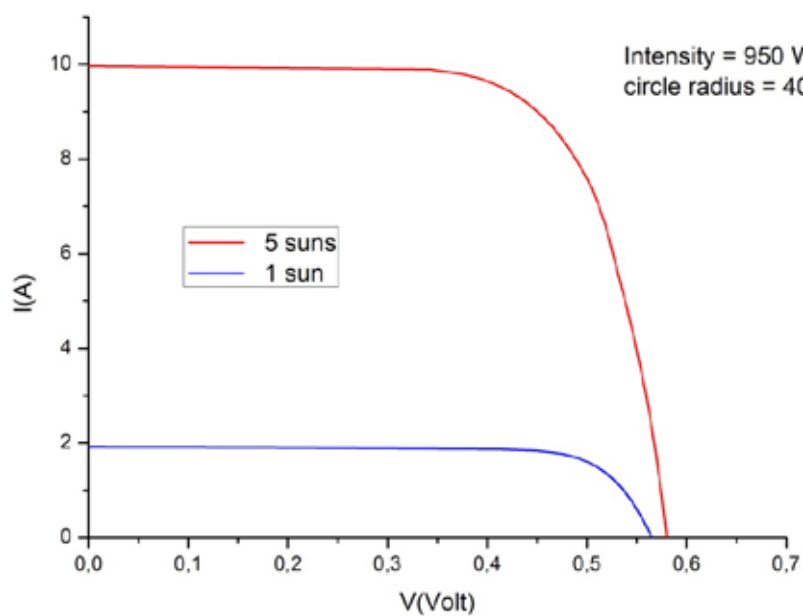


(β)

Εικόνα 4.31: Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για (α) δείγμα με ακτίνα 25 mm σε συγκέντρωση 10X και (β) δείγμα με ακτίνα 27mm σε συγκέντρωση 10X



(α)



(β)

Εικόνα 4.32: Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για (α) δείγμα με ακτίνα 30mm σε συγκέντρωση 10X και (β) δείγμα με ακτίνα 40mm σε συγκέντρωση 5X

| Circle Radius (mm) | Total cell surface coverage (%) | Solar Radiation Intensity (Watt/m ²) | Solar Radiation Concentration | I _{sc} (A) | V _{oc} (mV) | I _m (A) | V _m (mV) | P _m | F.F. |
|--------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|---------------------|----------------|-------------|
| 19 | 4.65 | 975 | 1 sun | 0.60 | 511 | 0.40 | 404 | 0.18 | 0.60 |
| 19 | 4.65 | 975 | 16 suns | 9.69 | 551 | 6.16 | 389 | 2.39 | 0.44 |
| 25 | 8.21 | 1000 | 1 sun | 0.75 | 581 | 0.70 | 471 | 0.33 | 0.75 |
| 25 | 8.21 | 1000 | 4 suns | 2.98 | 600 | 2.72 | 496 | 1.35 | 0.76 |
| 25 | 8.21 | 976 | 1 sun | 0.72 | 570 | 0.60 | 506 | 0.30 | 0.73 |
| 25 | 8.21 | 976 | 10 suns | 7.43 | 587 | 6.16 | 429 | 2.64 | 0.60 |
| 27 | 9.40 | 995 | 1 sun | 0.83 | 564 | 0.70 | 501 | 0.35 | 0.75 |
| 27 | 9.40 | 995 | 10 suns | 8.22 | 577 | 6.76 | 409 | 2.77 | 0.58 |
| 30 | 11.83 | 966 | 1 sun | 1.06 | 547 | 0.90 | 486 | 0.44 | 0.75 |
| 30 | 11.83 | 966 | 10 suns | 9.31 | 557 | 7.67 | 421 | 3.23 | 0.62 |
| 40 | 20.64 | 950 | 1 sun | 1.93 | 564 | 1.77 | 473 | 0.84 | 0.76 |
| 40 | 20.64 | 950 | 5 suns | 9.95 | 579 | 8.88 | 455 | 4.05 | 0.69 |

Πίνακας 4.16 Συγκεντρωτικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τις μετρήσεις σε συγκέντρωση των δειγμάτων με τις ωμικές συνδέσεις του κράματος Bi/Sn

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για κάθε δείγμα που εκτέθηκε σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζονται στον πίνακα 4.12. Σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς η περιοχή με ακτίνα κύκλου 19 mm στο κέντρο του φωτοβολταϊκού στοιχείου με εμβαδόν 156 x 156 mm² η οποία δέχεται 16 X συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας δίνει ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}= 9.69 A όταν η ένταση είναι 975 W/m². Το εντυπωσιακό σε αυτή τη μέτρηση είναι η αντοχή των ωμικών συνδέσεων ενός κράματος με σχετικά χαμηλό σημείο τήξης σε τόσο υψηλές συγκεντρώσεις. Η παραγόμενη ισχύς σε αυτή την περίπτωση είναι 2.39W. Σε συγκέντρωση 10X πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τρία δείγματα διαφορετικής διαμέτρου. Συγκεκριμένα το δείγμα ακτίνας 25 mm παράγει ισχύ 2.64 W με την αναμενόμενη τιμή για το ρεύμα βραχυκύκλωσης πριν τη συγκέντρωση να είναι 0.71 A και η μετρούμενη 0.72A αντίστοιχα δίνοντας παράλληλα σε συγκέντρωση I_{sc}=7.43 A. Αντίστοιχα και για τα άλλα δύο δείγματα σε συγκέντρωση 10X με ακτίνες 27mm και 30mm. Για το πρώτο η θεωρητική τιμή για το εμβαδό της επιφάνειάς του χωρίς συγκέντρωση ήταν I_{sc}= 0.83 A με το μετρούμενο ρεύμα να έχει την ίδια τιμή και με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας να δίνει I_{sc}=8.22A . Για το δεύτερο με ακτίνα 30mm η θεωρητική τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης χωρίς συγκέντρωση ήταν I_{sc}=1.02A με την μετρούμενη να είναι I_{sc}=1.06A. Ιδιαίτερο προσοχής σε αυτή την συγκέντρωση είναι το παραγόμενο ρεύμα 9.31 A από το δείγμα με ακτίνα 30 mm. Τέλος, για τις χαμηλές συγκεντρώσεις στα 4X ο κύκλος ακτίνας 25mm δίνει θεωρητικά 0.71A χωρίς συγκέντρωση

και μετρήθηκαν 0.75 A. Η μετρούμενη τιμή του ρεύματος υπό συγκέντρωση είναι 2.98A και στα 5X το δείγμα διαμέτρου 40 mm δίνει χωρίς συγκέντρωση θεωρητικά 1.82A και μετρήθηκε 1.93A και υπό συγκέντρωση δίνει $I_{sc}=9.95A$.

Εφαρμόζοντας και εδώ τις εξισώσεις 2.49 και 2.50 υπολογίστηκαν οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος για τιμές συγκεντρώσεων 4X, 5X, 10X και 16X για τα δείγματα διαφορετικών εμβαδών του πίνακα 4.16

| Dimensions of exposed area (mm) | Solar Radiation Concentration | I_{sc} (A) | V_{oc} (V) |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| R=19 | 16 suns | 9.6 | 0.582 |
| R=25 | 4 suns | 3.0 | 0.616 |
| R=25 | 10 suns | 7.2 | 0.629 |
| R=27 | 10 suns | 8.3 | 0.623 |
| R=30 | 10 suns | 10.2 | 0.606 |
| R=40 | 5 suns | 9.65 | 0.605 |

Πίνακας 4.17 Θεωρητικοί υπολογισμοί για τις μετρήσεις σε συγκέντρωση των δειγμάτων με τις ωμικές συνδέσεις του κράματος Bi/Sn

Η αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης με την αύξηση της συγκέντρωσης, κατά συνέπεια και η μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης ήταν κάτι που περιμέναμε με βάση την εξίσωση 2.49. Συγκεκριμένα για το δείγμα με ακτίνα 19mm σε τιμές συγκέντρωσης 16X το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπολογίστηκε 9.6 A με το μετρούμενο να έχει τιμή 9.69 A, αντίστοιχα για το δείγμα με ακτίνα 25mm και συγκέντρωση 4X η τιμή που προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσης είναι 3 A με την μετρούμενη να είναι 2.98 A. Για τα δείγματα σε συγκέντρωση 10X και με ενεργό επιφάνεια κύκλο ακτίνας 25mm το πρώτο και κύκλο ακτίνας 27mm το δεύτερο, η θεωρητική τιμή από την μετρούμενη διαφέρουν κατά 0.23 A για το πρώτο και 0.08A για το δεύτερο. Για το δείγμα σε συγκέντρωση 10X και ενεργό επιφάνεια κύκλου ακτίνας 30mm η θεωρητική τιμή για το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι 10.2A με τη μετρούμενη να είναι 9.31 A. Τέλος, για το δείγμα ακτίνας 40 mm και συγκέντρωση 5X η θεωρητική τιμή είναι 9.65A με την μετρούμενη 9.95A. Για όλες τις τιμές της συγκέντρωσης η μικρή απόκλιση της πειραματικής τιμής από την θεωρητική οφείλεται στις τυχόν πολύ μικρές μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της μέτρησης που επηρεάζει άμεσα την τιμή του ρεύματος.

Για την τάση ανοιχτού κυκλώματος από την εξίσωση 2.50 αναμένουμε λογαριθμική αύξηση της τιμής της με την αύξηση της συγκέντρωσης. Όπως φαίνεται από τους πίνακες

αλλά και γραφικά μετρήσαμε αύξηση της τιμής της τάσης ανοιχτού κυκλώματος αλλά όχι σε συμφωνία με τις τιμές του πίνακα. Ο λόγος είναι ότι η θερμοκρασία του ηλιακού κυττάρου δεν παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια καταγραφής των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V χωρίς και με συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος σε συνθήκες συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά ανασταλτικά στη αύξηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Αυτό μπορεί να φανεί και γραφικά αφού για τα δείγματα σε υψηλές τιμές συγκεντρώσεων 10X και 16X υπάρχει αύξηση της αντίστασης σε σειρά η οποία οφείλεται στην απότομη αύξηση της θερμοκρασίας.

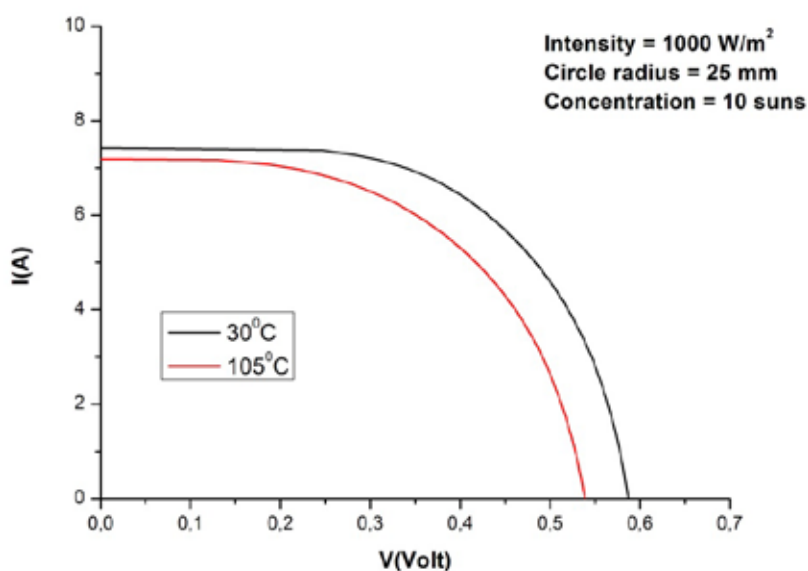
4.7.6 Μετρήσεις θερμοκρασίας για το κράμα βισμούθιου-κασσιτέρου (Bi/Sn)

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας για το κράμα Bi/Sn επιλέχθηκαν να πραγματοποιηθούν στο δείγμα με κύκλο ακτίνας 25mm και σε συγκέντρωση 10X. Οι ημέρες που πραγματοποιήθηκαν είχαν πλήρη ηλιοφάνεια με θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω στους 25 °C ενώ για να δοκιμαστεί επαρκώς η αντοχή των ωμικών συνδέσεων μετρήθηκε το ίδιο δείγμα με διαφορά 25 ημερών σε σχεδόν ταυτόσημες συνθήκες. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας έγιναν με το IR φορητό θερμόμετρο της εταιρείας FLUKE.

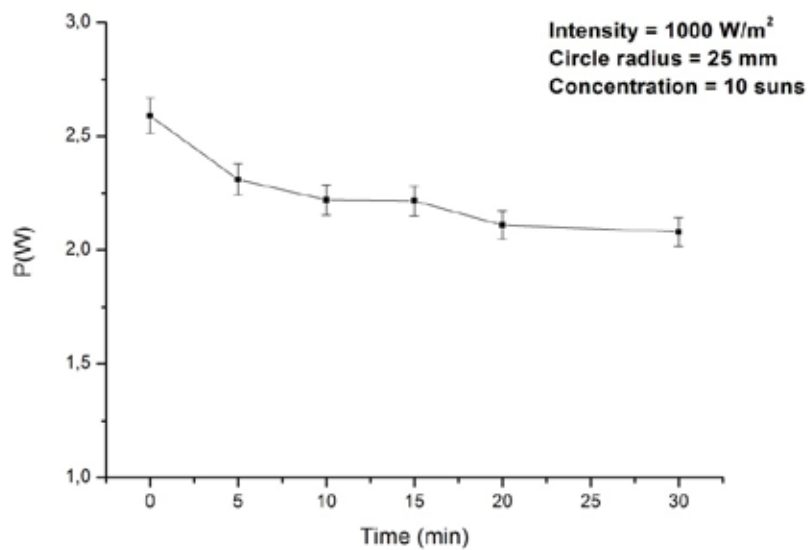
Η πρώτη ημερολογιακά μέτρηση φαίνεται στην εικόνα 4.33. Παρατηρώντας τον πίνακα 4.17 το αποτέλεσμα για το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι απολύτως λογικό με τιμή $I_{sc} = 7.43 \text{ A}$ και τάση ανοιχτού κυκλώματος στην πρώτη μέτρηση $V_{oc} = 0.586 \text{ V}$ σε θερμοκρασία 30 °C. Όπως φαίνεται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας ακολουθεί μια έντονη πτώση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος μέχρι την τιμή των 0.537 V. Από τους θερμικούς συντελεστές της κατασκευάστριας εταιρείας για το δείγμα (-0.0023V/K , +0.0011A/K) η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 75 °C συνεπάγεται τιμή για την τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{oc} = 0.413 \text{ V}$. Εδώ είναι σημαντική η συμβολή δεξαμενής απαγωγής θερμότητας η οποία σταθεροποιεί τη θερμοκρασία του δείγματος και δεν επιτρέπει την απότομη μείωση της τάσης. Αντίθετα, η πτώση στο ρεύμα βραχυκύκλωσης οφείλεται στις μικρές μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Η τιμή της έντασης μειώθηκε από την τιμή των 1000 W/m² που ήταν στην πρώτη μέτρηση στα 950 W/m². Ωστόσο, παρά την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνειά του από τους 30 °C στους 105 °C από την εικόνα 4.34 φαίνεται η αντοχή των ωμικών συνδέσεων σε αυτές τις ακραίες συνθήκες. Παρότι το σημείο τήξης του κράματος είναι στους 118 °C, σε κοντινή

θερμοκρασία από αυτή η παραγόμενη ισχύς έχει τιμή 2.08W μετά από 30 λεπτά σε συγκέντρωση 10X.

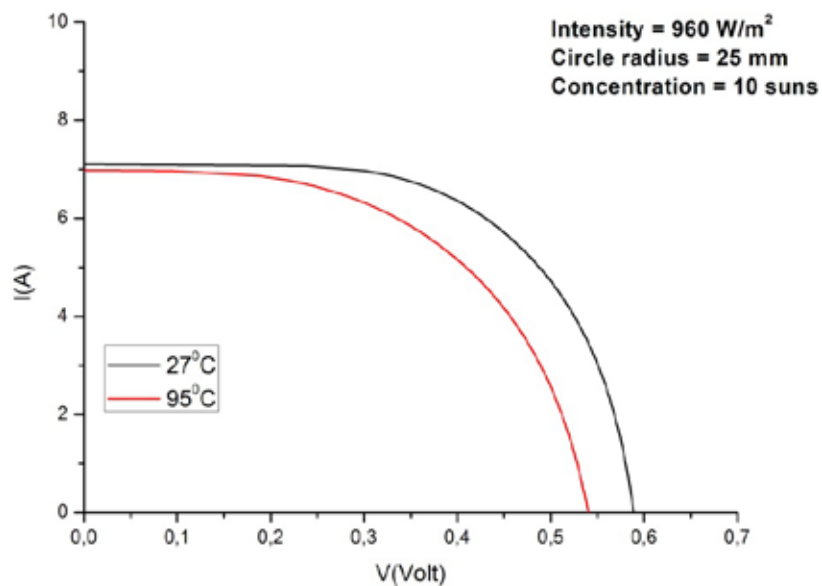
Στη δεύτερη ημερολογιακά μέτρηση (εικόνα 4.35) μετά από 25 ημέρες στο ίδιο δείγμα εφαρμόστηκε πάλι συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας 10X. Στην πρώτη μέτρηση η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι 7.11 A που είναι σωστή αν λάβουμε υπόψη και την ένταση της ακτινοβολίας που ήταν 960 W/m^2 . Η πτώση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ήταν η ίδια με την προηγούμενη μέτρηση συγκεκριμένα από αρχική τιμή 0.583V έως τα 0.538V. Και σε αυτή τη μέτρηση επειδή χρησιμοποιήθηκε φυσικός φωτισμός υπήρξαν μικρές διακυμάνσεις στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα η τελευταία μέτρηση να καταγραφεί σε χαμηλότερη ένταση από την πρώτη με άμεσο αποτέλεσμα την μικρή πτώση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η παραγόμενη ισχύς φαίνεται μετά από 20 λεπτά σε υψηλή συγκέντρωση να είναι 2.067W (εικόνα 4.36).



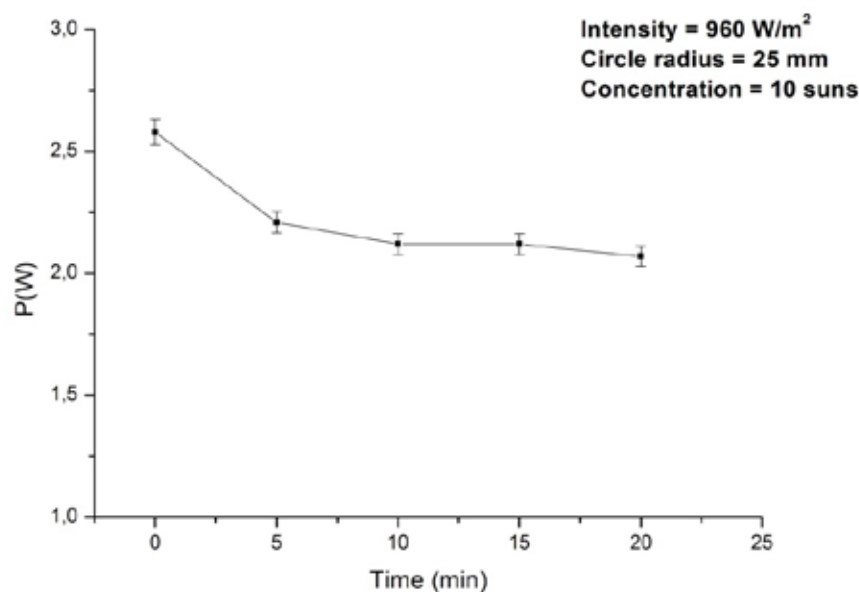
Εικόνα 4.33 Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για κυκλικό δείγμα με ακτίνα 25mm σε συγκέντρωση 10X και αύξηση της θερμοκρασίας από 30°C μέχρι 105°C



Εικόνα 4.34 Η παραγόμενη ισχύς κυκλικού δείγματος με ακτίνα 25mm σε συγκέντρωση 10X για χρονική διάρκεια τριάντα λεπτών



Εικόνα 4.35 Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για κυκλικό δείγμα με ακτίνα 25mm σε συγκέντρωση 10X και αύξηση της θερμοκρασίας από 27°C μέχρι 95°C



Εικόνα 4.36 Η παραγόμενη ισχύς κυκλικού δείγματος με ακτίνα 25mm σε συγκέντρωση 10X για χρονική διάρκεια είκοσι λεπτών

4.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά, καθορίστηκαν οι ιδανικότερες συνθήκες συγκολλήσεως για την κατασκευή ωμικών συνδέσεων επίπεδων αγωγών χαλκού που επικαλύπτονται από φιλικά προς το περιβάλλον κράματα σε φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα κράματα που μελετήθηκαν για να αντικαταστήσουν την παραδοσιακά χρησιμοποιούμενη ύλη συγκολλήσεως ήταν τα Sn(96.5%)/Ag(3.5%) και Bi(58%)/Sn(42%). Και για τα δύο κράματα καθορίστηκαν οι θερμοκρασίες προθέρμανσης του δείγματος καθώς και οι θερμοκρασίες συγκολλήσεως ώστε να μειωθούν οι μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται και οι οποίες οδηγούν στην ανάπτυξη μικρών ή μεγάλων ρωγμών στο δείγμα. Σύμφωνα με τα πειράματά μας οι καταλληλότερες θερμοκρασίες συγκόλλησης για τα κράματα Sn(96.5%)/Ag(3.5%) και Bi(58%)/Sn(42%) είναι 240 °C και 150 °C αντίστοιχα. Αφού καθορίστηκαν οι ιδανικότερες συνθήκες συγκόλλησης, στη συνέχεια η μελέτη επικεντρώθηκε σε συνδεσμολογίες διπλού ribbon και 8 επαφών σε δείγματα 2 busbars καθώς και 12 επαφών σε 3 busbars και για τα δυο κράματα.

Από τις συστηματικές μετρήσεις χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης σε εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι 1000W/m^2 , η συνδεσμολογία των 12 επαφών με το κράμα Bi(58%)/Sn(42%) έδωσε την μικρότερη αντίσταση σε σειρά και καλές ηλεκτρικές ιδιότητες. Στη συνέχεια δείγματα με ωμικές συνδέσεις και από τα δύο κράματα δέχτηκαν συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας έως 16X με την χρησιμοποίηση φακών Fresnel. Οι επίπεδοι αγωγοί χαλκού με το κράμα Sn/Ag εκτέθηκαν σε συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας από 2.5X μέχρι 5.5X και το κράμα Bi/Sn σε διάφορες συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας με τιμές από 4X μέχρι 16X. Οι ωμικές συνδέσεις ανταποκρίθηκαν πλήρως στην διαχείριση υψηλών ρευμάτων ενώ ταυτόχρονα επέδειξαν μηχανική αντοχή δεδομένης της ραγδαίας αύξησης της θερμοκρασίας τους με την εφαρμογή υψηλών συγκεντρώσεων. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της παθητικής απαγωγής θερμότητας στην αύξηση της θερμοκρασίας των κυττάρων υπό την επίδραση συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και η έκθεση των ωμικών συνδέσεων σε σταθερή τιμή συγκέντρωσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μεταλλική δεξαμενή απαγωγής θερμότητας περιόρισε την μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και οι ωμικές συνδέσεις ανταποκρίθηκαν στη συνεχή έκθεση συγκεντρωμένης ακτινοβολίας μέχρι και 10X.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

- [1] "Moving further towards 'green manufacturing' of photovoltaics," *Photovoltaics Bulletin* (2003) 9.
- [2] G. Cuddalorepatta, A. Dasgupta, S. Sealing, J. Moyer, T. Tolliver, and J. Loman, Durability of Pb-free solder between copper interconnect and silicon in photovoltaic cells *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18 (2010) 168.
- [3] K. S. K. Puttlitz, *Handbook of lead free solder technology for microelectronics assemblies*, Marcel Dekker Inc.
- [4] K. Sugauma, *Lead free soldering in electronics*, Marcel Dekker Inc.
- [5] I. Kaban, K. Khalouk, M. Köhler, W. Hoyer, and J. G. Gasser, *Journal of Electronic Materials* 39 (2010) 70.
- [6] M. K. J. Wend, M. Trager, Quantifying the solderability of lead free solder alloys on solar cells using wetting balance analyzer in 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference Hamburg, 2011.
- [7] M. Palcut, J. Sopoušek, L. Trnková, E. Hodúlová, B. Szewczyková, M. Ožvold, M. Turňa, and J. Janovec, Thermal analysis of selected tin-based lead-free solder alloys *Kovove Materialy* 47 (2009) 43.
- [8] P. Schmitt, P. Kaiser, C. Savio, M. Tranitz, and U. Eitner, *Energy Procedia* 27 (2012) 664.
- [9] X. R. Zhang, C. L. Wang, H. X. Zhao, J. Q. Li, and Z. F. Yuan, *Guocheng Gongcheng Xuebao/The Chinese Journal of Process Engineering* 9 (2009) 829.
- [10] D. N.-C. Lee, Indium Corporation of America.
- [11] EC, http://europa.eu.int/eur-lex/pri/en/oj/dat/2003/l_037/l_03720030213en00190023.pdf (2003)
- [12] "Materials Research Society Symposium Proceedings - Pb-Free and ROHS-Compliant Materials and Processes for Microelectronics," 2007. Vol. 993, 2007.
- [13] F. B. Lalaguna, D. Sanchez, L.J. Caballero, J. Alonso "Evaluation of bismuth-based solder alloys for low-stress interconnection of industrial crystalline silicon PV cells," 22nd EUPVSEC Milan 2007
- [14] J. Bennett, P.C. de Kloos, M.J.H.; Stam, C.N.J.; Schuermans, J.; Gomez, R.J.; Sanchez-Friera, P.; Schmidt, H.; Henckens, A, "Low-Stress interconnection of solar cells," 22nd EUPVSEC Milan 2007

- [15] P.C. de Jong, J.A. Wienke, M.W. Brieko, M.J.H. Kloos, "Low-stress interconnection for solar cells," 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2005.
- [16] P.Grunow Soldering of crystalline Si modules: losses, reliability and improvements, in 2nd Workshop on metallization on crystalline Si solar cells, 2012.
- [17] M. H. M.Arenas, V.Acoff, Effect of flux on the wetting characteristic of SnAg, SnAgBi and SnAgCu lead free solders on copper substrates, *Journal of Electronic Materials* 35 (2006)
- [18] J. Hisert Tabbing and Bus Ribbon for Solar Assembly, Indium Corporation
- [19] A. Mette, New concepts for front side metallization of industrial silicon solar cells Fraunhofer - ISE.
- [20] F. R. P. Sanchez-Friera, B. Lalaguna, L.J. Caballero, J. Alonso, Power losses in a PV module due to cell interconnection," 23rd EUPVSEC Valencia 2008
- [21] R. D. Nasby and R. W. Sanderson, Performance measurement techniques for concentrator photovoltaic cells, *Solar Cells* 6 (1982) 39.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΜΙΔΙΑΦΑΝΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται, για πρώτη φορά, ο σχεδιασμός, η κατασκευή και ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων μονο-κρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας και υψηλής απόδοσης. Για την κατασκευή των κυττάρων επινοήθηκε μέθοδος σύμφωνα με την οποία τα ημιδιαφανή κύτταρα κατασκευάζονται επί σύγχρονης τεχνολογίας ηλιακών κυττάρων μονο-κρυσταλλικού πυριτίου που έχουν απόδοση από 17.3% έως 18.6%, εμβαδόν $156 \times 156 \text{ mm}^2$ και πάχος $180(\pm 30) \mu\text{m}$ ή $200(\pm 40) \mu\text{m}$. Η διαφάνεια επιτυγχάνεται με την κοπή (laser cutting) μεγάλου αριθμού ελλείψεων που σχηματίζουν δύο-διαστάσεων περιοδικά πλέγματα επί της επιφανείας των ηλιακών κυττάρων.

Η κοπή των ελλείψεων έγινε από την εταιρεία Μεταλλεμπορική Α.Ε. που έχει την έδρα της στην Βιομηχανική Περιοχή Πατρών και διαθέτει το σύγχρονο σύστημα κοπής λέιζερ Bystar 4020 της εταιρείας Bystronic. Δοκιμές από τεχνικούς της Μεταλλεμπορικής έδειξαν ότι είναι δυνατή η ακριβής κοπή ελλείψεων μεταξύ διαδοχικών μεταλλικών επαφών

(grid fingers) των κυττάρων. Το ποσοστό της διαπερατότητας επιλέγεται να είναι τουλάχιστον 5% ούτως ώστε να διασφαλίζονται : α) η υψηλού επιπέδου ορατότητα δια μέσου των κυττάρων, β) να αποφεύγεται ο κατακερματισμός της εικόνας, γ) να επιτυγχάνεται ο ομοιόμορφος φωτισμός του χώρου και δ) η απόδοση των κυττάρων να παραμένει υψηλή. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής των ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων η ισχύς που παράγουν στο σημείο μέγιστης απόδοσης και η απόδοσή τους υπολογίζονται σε πολύ υψηλά επίπεδα δηλαδή 3.0 Watt και 14% αντιστοίχως συγκρινόμενες με τις τιμές των 4.2 Watt για την ισχύ και 17.5% για την απόδοση των αρχικών, βιομηχανικώς κατασκευασμένων, αδιαφανών κυττάρων υπό Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου (Standard Test Conditions).

Για την καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) των διαφανών ηλιακών κυττάρων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή ηλεκτρικών μετρήσεων (SMU) 2611A της αμερικανικής εταιρείας Keithley που ήδη διαθέτει το Εργαστήριο Νανοτεχνολογίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Η ανωτέρω SMU έχει την δυνατότητα να λειτουργεί ως πηγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος έως τα 1.5 Amperes και ως πηγή παλμικού ρεύματος (pulsed current) έως τα 10 Amperes. Τα ανωτέρω υψηλά ηλεκτρικά ρεύματα είναι απαραίτητα για τον χαρακτηρισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των διαφανών ηλιακών κυττάρων πυριτίου που κατασκευάσαμε.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των προτεινόμενων διαφανών ηλιακών κυττάρων μονοκρυσταλλικού και πολυ-κρυσταλλικού πυριτίου είναι : α) ο ομοιόμορφος φυσικός φωτισμός που εξασφαλίζουν, β) η υψηλή απόδοση που παρέχουν και γ) το μεγάλο εμβαδόν της επιφάνειάς τους. Η υψηλή απόδοση και η μεγάλη επιφάνεια θα μειώσουν την δαπάνη κατασκευής των glass-glass laminated φωτο-βολταϊκών πλαισίων αλλά και την δαπάνη εγκατάστασής τους.

5.2 Εφαρμογές και πλεονεκτήματα από την χρησιμοποίηση των λέιζερ στη βιομηχανική παραγωγή.

Προκειμένου να μειωθεί το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών συστημάτων, έχουν γίνει εντατικές προσπάθειες ώστε να αυξηθεί η απόδοση σε μία πλήρως αυτοματοποιημένη γραμμή με υψηλό ρυθμό παραγωγής. Ανεξάρτητα από την περίπτωση των ηλιακών κυττάρων, τα λέιζερ έχουν ήδη διαδραματίσει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη νέων κατασκευαστικών μεθόδων στη βιομηχανική παραγωγή. Σε

μερικές περιπτώσεις, υπάρχει ισχυρός ανταγωνισμός όπου υπάρχουν μια ή δύο εναλλακτικές τεχνολογίες για μία συγκεκριμένη μέθοδο κατασκευής, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις κανένα άλλο προηγμένο σύστημα δεν μπορεί ανταγωνιστεί την ταχύτητα και την ακρίβεια των λέιζερ [1].

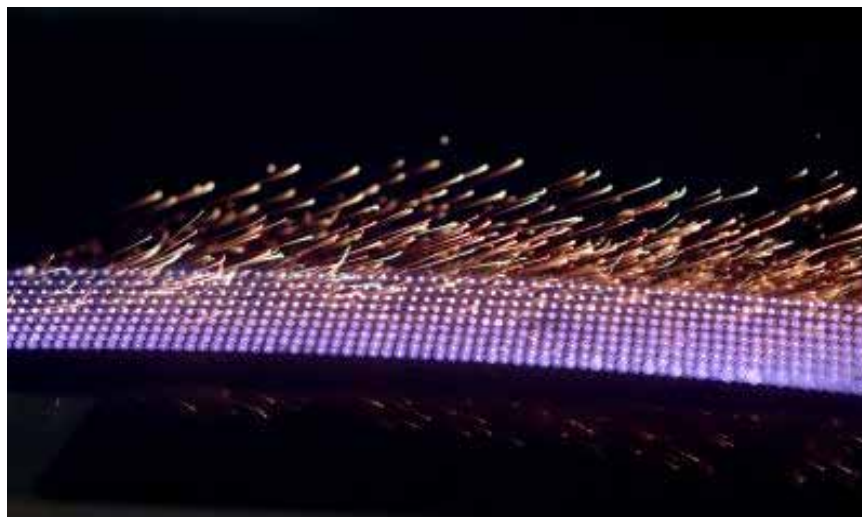
Τα λέιζερ διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία αρκετών υλικών που χρησιμοποιούνται σε μηχανικές, ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές κατασκευές. Το φάσμα των διαδικασιών στις οποίες εμπλέκονται τα λέιζερ είναι συνεχώς αυξανόμενο και την τελευταία 20ετία έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της βιομηχανικής παραγωγής σε ολόκληρο τον κόσμο. Είτε η κοπή περιλαμβάνει μέταλλο, γυαλί, πλαστικό, σιλικόνη, καουτσούκ, ακόμη και ξύλο η επεξεργασία με λέιζερ έχει αποδείξει την υπεροχή της σε σχέση με την ακρίβεια και την απόδοση της διεργασίας. Τέτοιες διεργασίες μπορεί να είναι η συγκόλληση, η κοπή, η θερμική επεξεργασία, η μηχανική κατεργασία και η διάτρηση που επιτυγχάνονται εύκολα με τη χρήση λέιζερ αντί των παραδοσιακών εργαλείων και μηχανημάτων για τις κατασκευές. Η επεξεργασία με λέιζερ προσφέρει μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων διαθέσιμων μεθόδων. Ένα από αυτά είναι η ικανότητά τους να μπορούν να επεξεργαστούν διαφορετικά υλικά με διαφορετικά σχήματα. Για παράδειγμα, οι παραδοσιακές μέθοδοι διάτρησης είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε υλικά με ακαθόριστο σχήμα. Με τη χρησιμοποίηση των λέιζερ, η διαδικασία πραγματοποιείται χωρίς να είναι αναγκαία η επαφή με το υλικό και οι διάφοροι γεωμετρικοί περιορισμοί αίρονται. Επιπλέον, η κοπή ορισμένων υλικών είναι αδύνατο να γίνει με τα 'κλασικά' μηχανήματα, αλλά με λέιζερ, μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα και χωρίς ατέλειες στην κοπή[2].

Τα δύο σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους είναι η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης διαδικασίας. Η χρήση των λέιζερ στον τομέα των παραδοσιακά βιομηχανικών μεθόδων όπως αυτές που περιγράφηκαν πριν στο κείμενο (συγκόλληση, κοπή και διάτρηση) είναι ταχύτερη με αποτέλεσμα υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής. Τέλος, λόγω του γεγονότος ότι η μετακίνηση μίας δέσμης λέιζερ γίνεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, υπάρχει υψηλότερη ακρίβεια από οποιοδήποτε συμβατικό εξοπλισμό. Στις συμβατικές μεθόδους τα εργαλεία φθείρονται και χάνουν την ακρίβειά τους με το χρόνο[3].

5.3 Τα λέιζερ στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών.

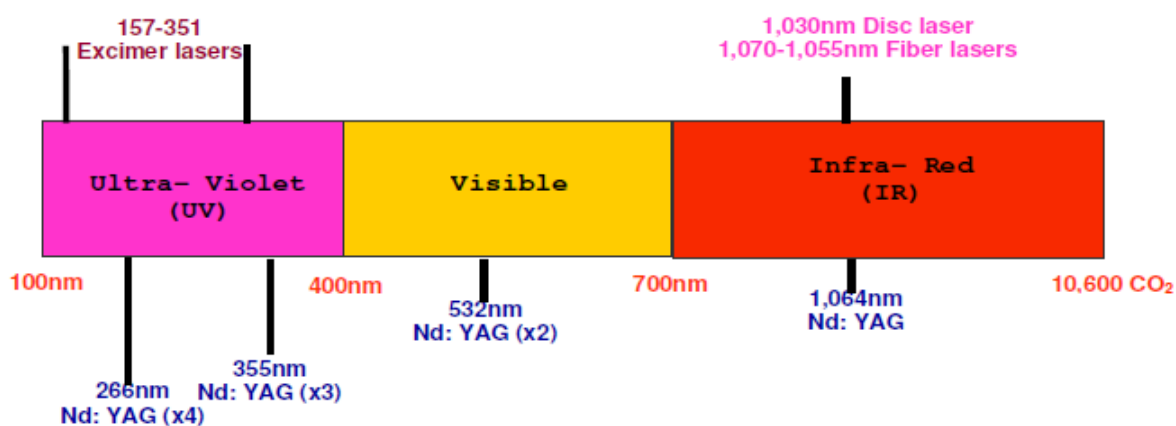
Ένας από τους τομείς στους οποίους τα λέιζερ έχουν εισαχθεί πρόσφατα είναι η κατασκευή ενεργειακών συστημάτων και συγκεκριμένα ηλιακών κυττάρων και φωτοβολταϊκών πλαισίων[4, 5]. Με την εξάντληση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα, την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και της απαίτησης για την αποτελεσματική προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, αυξάνεται το ενδιαφέρον για την αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος μέσω ανάπτυξης συστημάτων για ανανεώσιμες εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια. Αν και η ηλιακή ενέργεια είναι άμεσα διαθέσιμη και δεν έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον, δεν έχει αξιοποιηθεί πλήρως και αυτό οφείλεται σε έναν αριθμό προβλημάτων. Ένα από αυτά τα προβλήματα είναι το υψηλό κόστος και η χαμηλή απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η βιομηχανία των φωτοβολταϊκών έχει αρκετά κέρδη από τη χρησιμοποίηση του λέιζερ, όπως είναι η ακρίβεια, η αποδοτικότητα και η ευελιξία που είναι κρίσιμες για τις κατασκευές σήμερα. Γενικά, το λέιζερ χρησιμοποιείται σε όλη τη διαδικασία παραγωγής ενός ηλιακού κυττάρου από το πρώτο στάδιο που υπάρχει το πυρίτιο ως πρώτη ύλη μέχρι τη διαδικασία των συγκολλήσεων για την κατασκευή ενός πλαισίου[6].

Ένα laser στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών μπορεί να εφαρμοστεί επί πολυκρυσταλλικού, μονοκρυσταλλικού και thin film φωτοβολταϊκού στοιχείου. Από τις πιο συνηθισμένες χρήσεις του είναι οι laser grooved ωμικές επαφές στο μπροστά μέρος του ηλιακού κυττάρου, η δημιουργία επιλεκτικών δομών του n-type ημιαγωγού ακόμα και προηγμένες κατασκευές όπως metal – emitter wrap through ή κατασκευή των ωμικών συνδέσεων [7, 8]. Επίσης εφαρμόζεται στην κοπή και διάτρηση οπών αλλά και σε διάφορα στάδια της κατασκευής τους ένα από τα οποία είναι η ηλεκτρική απομόνωση των άκρων του. Στα thin film συμβάλει στη διαμόρφωση της επιφάνειάς τους [9].



Εικόνα 5.1 Διάτρηση υψηλής ταχύτητας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι κυριότεροι τύποι laser που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών είναι CO₂, ND:YAG, ND:Vanadate, disk laser και fiber laser[10]. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις ιδιότητες του laser γίνεται η κατάλληλη επιλογή του τύπου που θα χρησιμοποιηθεί [11]. Στην εικόνα 5.2 συνοψίζονται οι κυριότεροι τύποι laser με τα αντίστοιχα μήκη κύματος.



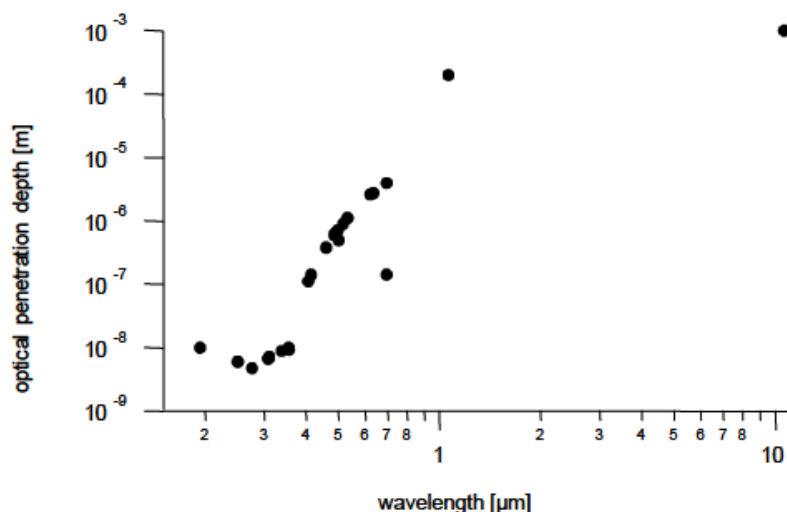
Εικόνα 5.2 Οι κυριότεροι τύποι laser που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών

Τα λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα CO₂ χαρακτηρίζονται από την ακτίνα υψηλής ισχύος που διαθέτουν με κυριότερες εφαρμογές τους σε μεθόδους κοπής και διάτρησης. Τα

lasers ND:YAG και ND:Vanadate είναι παλμικά με κύρια χαρακτηριστικά τους την υψηλή μέση δύναμη και την υψηλή τελική τιμή ισχύος. Τέλος τα disk lasers και fiber lasers κερδίζουν όλο και περισσότερη αποδοχή στην παραγωγή των ηλιακών κυττάρων. Καταρχήν, διαθέτουν μια πολύ σταθερή δέσμη όσον αφορά την ενέργεια, τη λειτουργία και το σχήμα του παλμού. Έχουν υψηλή αξιοπιστία, υψηλή απόδοση και ανθεκτικότητα. Επίσης, στις αρχικές δοκιμές κοπής μετάλλων αναφέρετε ότι τα fiber lasers μπορούν να κόψουν μέταλλα πάχους 8 mm ή λιγότερο με το 1/3 της δύναμης έχοντας την ίδια ταχύτητα αντισταθμίζοντας έτσι το λειτουργικό κόστος.

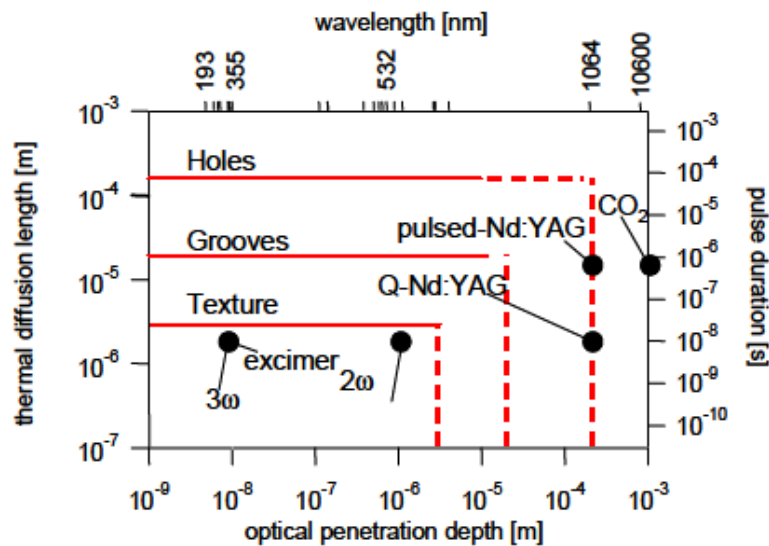
5.4 Βασικές αρχές για την επεξεργασία με λέιζερ.

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, το πυρίτιο είναι μερικώς διαπερατό για πολλά μήκη κύματος λέιζερ. Σύμφωνα με την εικόνα 3, π.χ., η ακτινοβολία από CO₂ laser ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) μπορεί να διαπεράσει το μεγαλύτερο μέρος της διαμέσου ενός δισκίου πυριτίου πάχους 300 μm . Σε αντίθεση ακτινοβολία από excimer laser ($\lambda = 248 \text{ nm}$) απορροφάται κατά το μεγαλύτερο μέρος της από 10 nm πάχους επιφανειακό στρώμα. Αντίστοιχα, μικρό βάθος οπτικής διείσδυσης έχει και ένα παλμικό laser με μήκος κύματος 1064 nm όπως φαίνεται στην εικόνα 3 όπου παριστάνεται το βάθος οπτικής διείσδυσης σε δισκίο μονοκρυσταλλικού πυριτίου για διάφορα μήκη κύματος[12].



Εικόνα 5.3 Το βάθος οπτικής διείσδυσης σε μονοκρυσταλλικό δισκίο πυριτίου για διάφορα μήκη κύματος

Για την σωστή επιλογή του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να ληφθεί υπόψη η εικόνα 5.4 στην οποία φαίνονται οι διαθέσιμοι τύποι λέιζερ σε σχέση με το οπτικό βάθος διείσδυσης και το μήκος θερμικής διάχυσης. Στα λέιζερ που χρησιμοποιούνται για τρέχουσες βιομηχανικές εφαρμογές, η καταστροφή στο πυρίτιο είναι αναπόφευκτη αλλά όχι αναγκαστικά προβληματική. Με τη διαδικασία της χημικής εγχάραξης μετά τη διαδικασία με λέιζερ μπορεί να αφαιρεθεί το κατεστραμμένο πυρίτιο το οποίο προκαλεί μείωση στην απόδοση του ηλιακού κυττάρου. Σε γενικές γραμμές για κάθε εφαρμογή θα πρέπει να αξιολογείται και να καθορίζεται ποια είναι η καλύτερη πηγή λέιζερ ανάλογα με το μήκος κύματος, τη μέγιστη ισχύ, το μήκος παλμού, την ευελιξία του συστήματος και το λειτουργικό κόστος,



Εικόνα 5.4 Διαθέσιμες πηγές laser σε σχέση με το οπτικό βάθος διείσδυσης και το μήκος θερμικής διάχυσης σε δισκίο μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

5.5 Ημιδιαφανή ηλιακά κύτταρα

Τα ημιδιαφανή μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα Si χρησιμοποιούνται σε διάφορες σημαντικές εφαρμογές. Είναι ενσωματωμένα σε στέγες αίθριων χώρων, προσόψεις και διαδρόμους δημοσίων και ιδιωτικών κτηρίων όπως για παράδειγμα σε σχολεία, σιδηροδρομικούς σταθμούς και αεροδρόμια. Πρόσφατα χρησιμοποιούνται στον τομέα της αρχιτεκτονικής σε βιοκλιματικά-ενεργειακά σπίτια όπου είναι ενσωματωμένα σε διαφανείς στέγες ή σε προσόψεις ως σταθερά ή κινητά συστήματα σκίασης παράλληλα με την παραγωγή ενέργειας από τον ήλιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται ενσωμάτωση των διαφανών ηλιακών κυττάρων σε ένα πλαίσιο που αποτελείται από δύο επίπεδες επιφάνειες γυαλιού (glass-glass laminate solar panel)[13]. Στην περίπτωση των κινητών συστημάτων ειδικοί αισθητήρες συνδεδεμένοι στις άκρες τους, συμβάλουν στη βέλτιστη θέση τους. Επίσης, λόγω της υψηλής αισθητικής εμφάνισής τους χρησιμοποιούνται στην ανακατασκευή παλαιών κτηρίων σαν φωτοβολταϊκά πλαίσια με τη δομή που περιγράφηκε παραπάνω ή σαν κεραμίδια που γίνονται με διαφανή κύτταρα Si και ενισχυμένο γυαλί.

Η χρήση τους αποτελεί μία καινοτόμο εφαρμογή στην οποία γίνεται καλύτερη αξιοποίηση του φωτός της ημέρας. Τα ημιδιαφανή ηλιακά κύτταρα μας παρέχουν όχι μόνο ενέργεια αλλά και προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό σημαίνει ότι τα κύτταρα που χρησιμοποιούνται κατά αυτόν τον τρόπο συμβάλλουν τόσο στην παραγωγή ενέργειας όσο και στο φιλτράρισμα του φωτός της ημέρας.



Εικόνα 5.5 Εφαρμογή ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων Si για παραγωγή ενέργειας αλλά και φυσικό ομοιόμορφο φωτισμό

Ο Takeoka ήταν ο πρώτος που κατάφερε να κατασκευάσει ημιδιαφανή ηλιακά κύτταρα πυριτίου που έχουν σχεδιαστεί για βιομηχανική παραγωγή. Τα δείγματα των ημιδιαφανών κυττάρων που κατασκεύασε (See-through α -Si όπως τα ονόμασε) παράγουν ηλεκτρική ισχύ με απόδοση περίπου 5% για τιμή διαπερατότητας του φυσικού φωτός 10%[14]. Μετέπειτα οι Wileke και Fath χρησιμοποίησαν μηχανική εγχάραξη για να κατασκευάσουν παράλληλα αυλάκια για την εμπρόσθια και οπίσθια πλευρά του ηλιακού κυττάρου σε κάθετες διευθύνσεις μεταξύ τους[15]. Με τη μέθοδο αυτή δημιούργησαν πλέγματα μικροσκοπικών οπών στις διασταυρώσεις των αυλακώσεων όταν τα βάθη τους υπερβαίνουν το ήμισυ του πάχους των κυττάρων. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε μέγιστη απόδοση 12.9% για bifacial ημιδιαφανές φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου εμβαδού 50x50 mm² και διαπερατότητα 16%. Αντίστοιχα για τα monofacial κύτταρα της ίδιας κατασκευής και του ίδιου εμβαδού η μέγιστη τιμή της απόδοσης μετρήθηκε 11.2% για διαπερατότητα 18%[16].

Η πρώτη μαζική βιομηχανική παραγωγή των κυττάρων που περιγράφηκαν με αποδόσεις από 8-10% και 10% διαπερατότητα του φωτός, μέσα από περίπου 20.000 μικροσκοπικές οπές, ξεκίνησε από Sunways AG στη Γερμανία τον Οκτώβριο του 2000[17, 18]. Σήμερα, κατασκευάζει 125x125 mm² ημι-διαφανές ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με διαπερατότητα 10% και αποδόσεις να κυμαίνονται από 12.9% έως 14.4% καθώς και 156x156 mm² ημι-διαφανές ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με διαπερατότητα 7.4% και αποδόσεις να κυμαίνονται από 13.6% έως 14.8% τον Σεπτέμβριο του 2012. Η διαπερατότητα των κυττάρων επιτυγχάνεται μέσω 64 τετράγωνων στην πρώτη περίπτωση και 64 οπών στην δεύτερη, τα οποία διατάσσονται σε μία συστοιχία 8x8 [19]. Τα τετράγωνα και οι οπές κόβονται, με την εφαρμογή λέιζερ, πριν από την κατασκευή της εμπρός και πίσω πλευράς ωμικών επαφών.

5.6 Σχεδιασμός και κατασκευή ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων

Η διαπερατότητα των ηλιακών κυττάρων στην παρούσα διατριβή επιτυγχάνεται με την διάνοιξη, με δέσμη laser, περιοδικών πλεγμάτων οπών επί συμβατικών (standard) ηλιακών κυττάρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου [20-22]. Για να θεωρηθεί επιτυχημένη η κατασκευή ενός ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου θα πρέπει να παρουσιάζει ομοιόμορφη

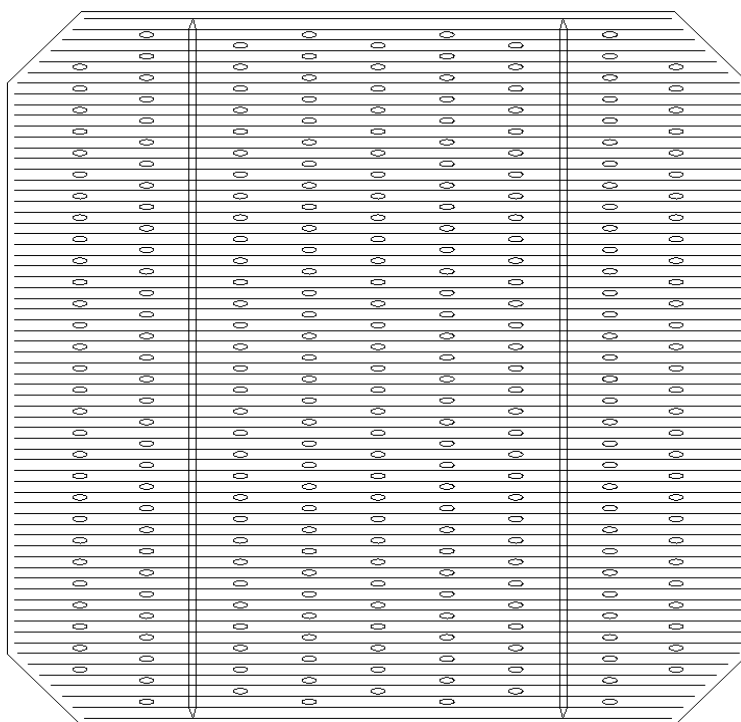
διαπερατότητα του φυσικού φωτός και υψηλή αποδοτικότητα. Πρέπει επίσης να έχει χαμηλό κόστος παραγωγής ή ισοδύναμο με μια χαμηλή τιμή/ Watt και μια μακρά διάρκεια ζωής λειτουργίας. Για το λόγο αυτό τα συμβατικά κύτταρα που επιλέγουμε για να κατασκευάσουμε τα αντίστοιχα ημιδιαφανή είναι βιομηχανικής παραγωγής, διαθέτουν έως και τρία bus bars για την διαχείριση των υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων που παράγονται κατά την λειτουργία τους, έχουν μεγάλη επιφάνεια ($156 \times 156 \text{ mm}^2$) και έχουν υψηλές αποδόσεις που κυμαίνονται έως 18.7% πριν από την διάνοιξη των οπών.

Τα ημιδιαφανή κύτταρα που χρησιμοποιήσαμε από τη βιομηχανία είναι μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα Si που κατασκευάστηκαν από την γερμανική εταιρεία Sunways AG με εμβαδό $156 \times 156 \text{ mm}^2$, πάχος $200 \pm 40 \text{ }\mu\text{m}$ και αποδόσεις από 17.3% μέχρι 18.6% μετρημένα σε STC (standard test conditions). Λόγω του σχεδιασμού των μεταλλικών επαφών στα βιομηχανικώς παραγόμενα ηλιακά κύτταρα, επιλέχθηκε το σχήμα των ελλείψεων για τις οπές που επρόκειτο να διανοηθούν κυρίως λόγω της ευελιξίας που προσφέρουν στην επιλογή διαφορετικών μηκών για τον μικρό και μεγάλο άξονά τους. Το σύστημα περιλαμβάνει ένα CO₂ laser υψηλής ισχύος (6kW) [23] και τα χαρακτηριστικά μεγέθη κοπής του είναι : α) position accuracy of $\pm 0,1 \text{ mm}$, β) repeatability of $\pm 0,05 \text{ mm}$ και γ) edge detection precision of $\pm 0,5 \text{ m}$.

Δύο ήταν οι κυριότερες δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε στα πρώτα στάδια στην προσπάθεια κατασκευής των ανωτέρω ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων. Οι δυσκολίες αρχικά έγκεινται στο γεγονός ότι τα πολυάριθμα και πολύ μικρών διαστάσεων στοιχεία που απαρτίζουν τα περιοδικά πλέγματα πρέπει να κατανεμηθούν ομοιόμορφα και σε ακριβείς θέσεις επί επιφάνειας μεγάλου εμβαδού ($156 \times 156 \text{ mm}^2$) ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη διαπερατότητα ηλιακού φωτός. Επιπλέον, θα πρέπει ο χρόνος που απαιτείται για την κοπή τους να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το φορτίο θερμότητας στα δισκία Si με πιθανό σχηματισμό μικρορωγμών, οι οποίες οδηγούν σε μείωση της ποιότητάς τους άρα σε μικρότερες αποδόσεις. Και το δεύτερο να αποφευχθεί η θραύση του κυττάρου, που έχει πολύ μικρό πάχος ($200 \pm 40 \text{ }\mu\text{m}$), από την πίεση της δέσμης laser κατά την διάρκεια κοπής των στοιχείων.

Η ακριβής τοποθέτηση αλλά και κατανομή των ελλείψεων στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου αντιμετωπίστηκε μέσω των προδιαγραφών του μηχανήματος κοπής laser αφού η κίνηση του καθοριζόταν μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος Autocad στο οποίο υπήρχε η δυνατότητα καταμερισμού αλλά και ακριβούς τοποθέτησης των στοιχείων. Επιπρόσθετα, τα χαρακτηριστικά του Bystar 4020 σε συνδυασμό με την διατομή 0.3 mm

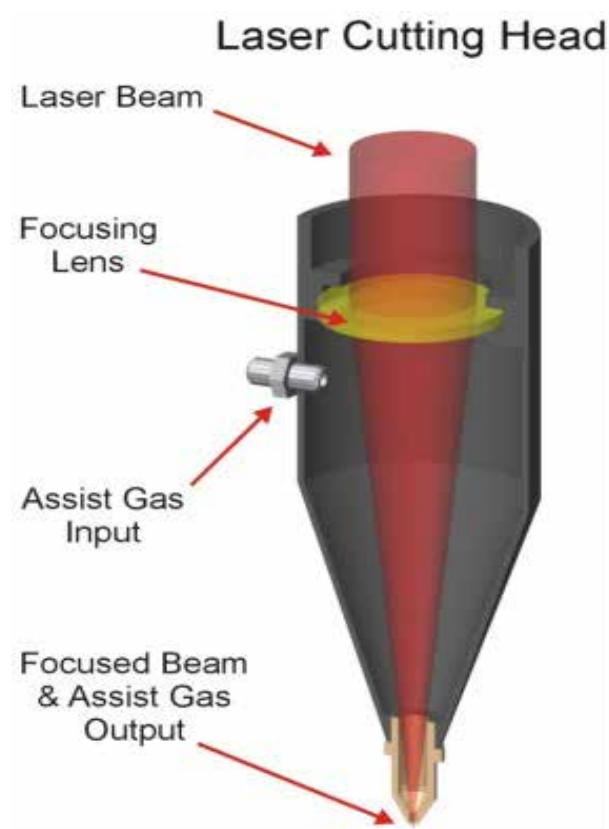
της ακτίνας λέιζερ επιτρέπουν την ακριβή κοπή και τον προσδιορισμό της θέσης των μεμονωμένων στοιχείων των σχεδίων μέσα σε περιοχή περιορισμένου εμβαδού στην επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου. Στην εικόνα 6 φαίνεται το αρχείο από το σχεδιαστικό πρόγραμμα Autocad που απεικονίζει ένα δισδιάστατο πλέγμα 279 ελλείψεων διαστάσεων μικρού και μεγάλου άξονα 1.2mm και 3mm αντίστοιχα. Οι ελλείψεις έχουν κατανομηθεί ομοιόμορφα στο ηλιακό κύτταρο με επιφάνεια 156 x156 mm² και έχουν τοποθετηθεί μεταξύ των μεταλλικών γραμμών του πλέγματος.



Εικόνα 5.6 Παράδειγμα αρχείου Autocad για την κοπή δισδιάστατου πλέγματος 279 ελλειψεων σε φωτοβολταϊκό στοιχείο 156X156 mm² με διαστάσεις μικρού και μεγάλου άξονα 1.2mm και 3mm αντίστοιχα.

Στις πρώτες κοπές με λέιζερ το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο συγκρατούνταν περιμετρικά από μία απλή μεταλλική βάση που σχημάτιζε χείλος 2 χιλιοστών. Σε αυτές τις δοκιμές, οι θραύσεις των κυττάρων συνέβαιναν πριν ολοκληρωθεί η κοπή με λέιζερ των περιοδικών πλεγμάτων των ελλείψεων με κύριο αίτιο το μικρό πάχος (200 μm ή λιγότερο) και το μεγάλο εμβαδόν επιφανείας (156 x 156 mm²) των βιομηχανικώς κατασκευασμένων κυττάρων Si που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την πίεση της δέσμης laser. Για την ελαχιστοποίηση της θραύσης των κυττάρων, είναι επιτακτική ανάγκη

να επιτευχθεί η υψηλότερη δυνατή μηχανική σταθερότητα και να αποφευχθεί η υπερβολική εφαρμογή θερμότητας στα δισκία Si κατά την κοπή τους. Η δυνατότητα του μηχανήματος λέιζερ να διαθέτει ομοαξονικό πίδακα αερίου βοηθά στην απομάκρυνση του τηγμένου υλικού αποφεύγοντας το σχηματισμό μικρορωγμών λόγω της ταχείας εναπόθεσης και στερεοποίησής του.



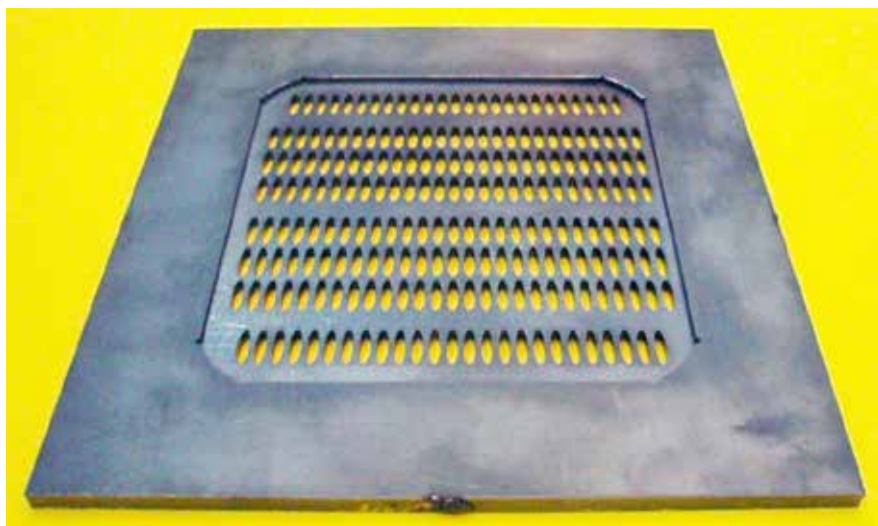
Εικόνα 5.7 Η κεφαλή κοπής του συστήματος laser με την έξοδο του υπο πίεση αερίου στο κάτω μέρος της που βοηθά στην απομάκρυνση του τηγμένου υλικού.

Για να δημιουργηθούν συνθήκες μηχανικής σταθερότητας, επινοήθηκε και κατασκευάστηκε μια μεταλλική βάση δύο επιπέδων όπως φαίνεται στην εικόνα 8. Η μεταλλική βάση αποτελείται από δύο ευθυγραμμισμένες και συγκολλημένες παράλληλες μεταλλικές πλάκες σιδήρου σχήματος τετραγώνου που έχουν συνολική επιφάνεια εμβαδού $230 \times 230 \text{ mm}^2$ [22]. Ένα περιοδικό πλέγμα ελλείψεων με μεγαλύτερα μήκη του μικρού και του μεγάλου άξονα από τα αντίστοιχα μήκη των αξόνων των ελλείψεων του περιοδικού πλέγματος που εγγράφονται στο ηλιακό κύτταρο, κόβεται στην κάτω πλάκα του σιδήρου

πάχους 4mm με το Bystar 4020. Το δεύτερο επίπεδο ευθυγραμμίζεται με το πρώτο και χρησιμεύει για να κρατά το ηλιακό κύτταρο ακίνητο και επίπεδο επί του πρώτου επιπέδου κατά την διάρκεια της κοπής. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε βρίσκεται στο κέντρο της πλάκας και καλύπτει μια περιοχή 156 x156 mm² όμοια με αυτή του φωτοβολταϊκού. Ειδικότερα, τα μήκη των μικρών και μεγάλων αξόνων για την βάση που θα πραγματοποιούνται κοπές 2BB (2 busbar) είναι 3.4mm και 14mm αντίστοιχα ενώ για την 3BB (3 busbar) είναι 3.5 mm και 15mm , δηλαδή σημαντικά μεγαλύτερες από τις ελλείψεις που σχεδιάζονται να κοπούν επί των κυττάρων πυριτίου (Si). Αυτό εξασφαλίζει ότι η διαδρομή της δέσμης λέιζερ, καθώς κόβει τις ελλείψεις ενός κυττάρου, δεν παρεμποδίζεται από την κάτω πλάκα μετάλλου, όταν εξέρχεται από την οπίσθια πλευρά του και παράλληλα βοηθάει στην εκτόνωση της δέσμης για την αποφυγή θραύσης κατά τη διάρκεια της κοπής. Οι εικόνες της μεταλλικής βάσης για την κατασκευή 2 busbar (2BB) διαφανών κυττάρων φαίνεται στην εικόνα 9 ενώ για τα δείγματα με 3BB στην εικόνα 10. Όλες οι βάσεις που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη κατασκευάστηκαν από την ομάδα μηχανικών της Μεταλλεμπορικής Α.Ε. που εδρεύει στην Πάτρα.



Εικόνα 5.8 Λεπτομερής εικόνα της μεταλλικής βάσης για την κατασκευή των ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων όπου ξεχωρίζουν τα δύο μεταλλικά επίπεδα.



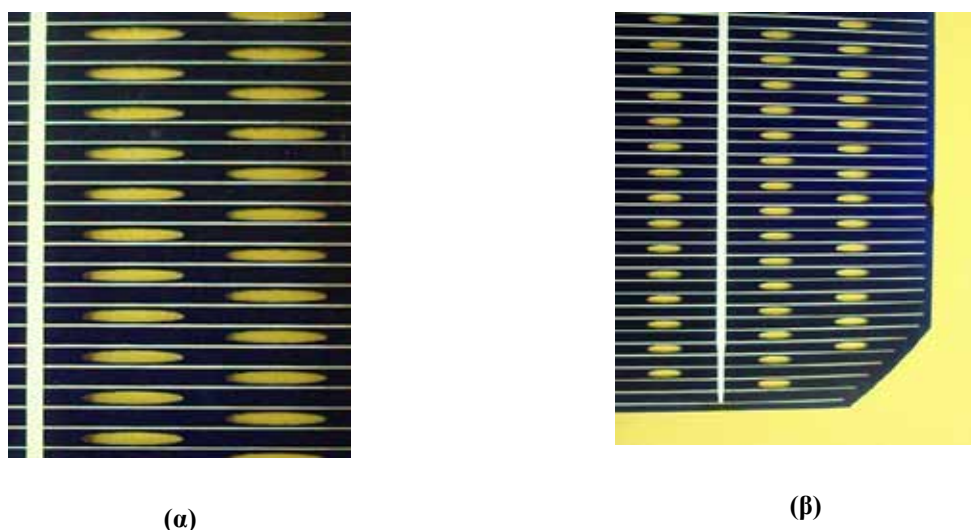
Εικόνα 5.9 Μεταλλική βάση 2 επιπέδων για την κατασκευή ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων 3 busbar επιφάνειας $156 \times 156 \text{ mm}^2$



Εικόνα 5.10 Μεταλλική βάση 2 επιπέδων για την κατασκευή ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων 3 busbar επιφάνειας $156 \times 156 \text{ mm}^2$

Κάθε έλλειψη σχεδιάστηκε να ευρίσκεται συμμετρικά εντός της περιοχής που σχηματίζεται από διαδοχικά grid fingers του πλέγματος των εμπρόσθιων ωμικών επαφών και προσανατολισμένη με το μικρό άξονα να είναι κάθετος προς την κατεύθυνση των grid fingers. Λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος Bystar 4020, τα μήκη των αξόνων των ελλείψεων σχεδιάστηκαν λαμβάνοντας υπ' όψιν τις αποστάσεις 2.3 ή 2.7 mm μεταξύ των διαδοχικών μεταλλικών γραμμών (δακτύλων) του πλέγματος σε 2BB ή 3BB ηλιακά κυττάρων αντίστοιχα. Συνεπώς αναμένουμε κάθε έλλειψη να είναι τοποθετημένη με ακρίβεια εντός των συνόρων των διαδοχικών γραμμών πλέγματος μετά την ολοκλήρωση της κοπής με την δέσμη λέιζερ. Οι ελλείψεις έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην τέμνονται με τους μεταλλικούς αγωγούς (busbars) ή τα grid fingers του πλέγματος, για δύο λόγους. Πρώτον για να αποκλειστούν πιθανές επιδράσεις βραχυκυκλώματος και δεύτερον για να εξασφαλίζεται ότι οι διαδρομές των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, που δημιουργούνται από την απορρόφηση φωτονίων, αρχικά μέσω των μεταλλικών γραμμών του πλέγματος (grid fingers) και εν συνεχεία μέσω των κύριων ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος (bus bars), δεν παρεμποδίζονται.

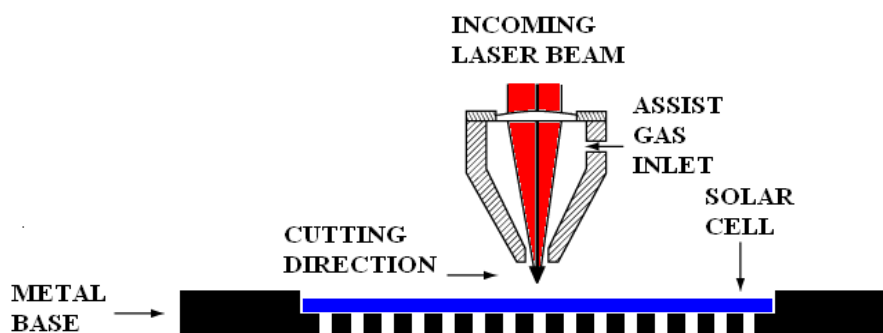
Στις εικόνες 11α και 11β φαίνονται περιοχές από τα κατασκευασμένα διαφανή μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα Si αφότου έχουν αφαιρεθεί από τη βάση. Και στις δύο εικόνες φαίνεται καθαρά ότι οι ελλείψεις έχουν τοποθετηθεί ακριβώς μέσα στα σύνορα που καθορίζονται από τις διαδοχικές μεταλλικές γραμμές του πλέγματος της μπροστινής πλευράς του κυττάρου Si. Στην εικόνα 11α είναι τοποθετημένες σωστά παρά τη μικρή διαφορά που υπάρχει αφού η απόσταση μεταξύ των grid fingers είναι 2.3 mm ενώ το μήκος του μικρού άξονα των ελλείψεων είναι ίσο με 1.8 mm.



Εικόνα 5.11 α : Κοντινή λήψη ημιδιαφανούς φωτοβολταϊκού στοιχείου $156 \times 156 \text{ mm}^2$ με ελλείψεις διαστάσεων μικρού άξονα 1.8mm και μεγάλου 8.6mm

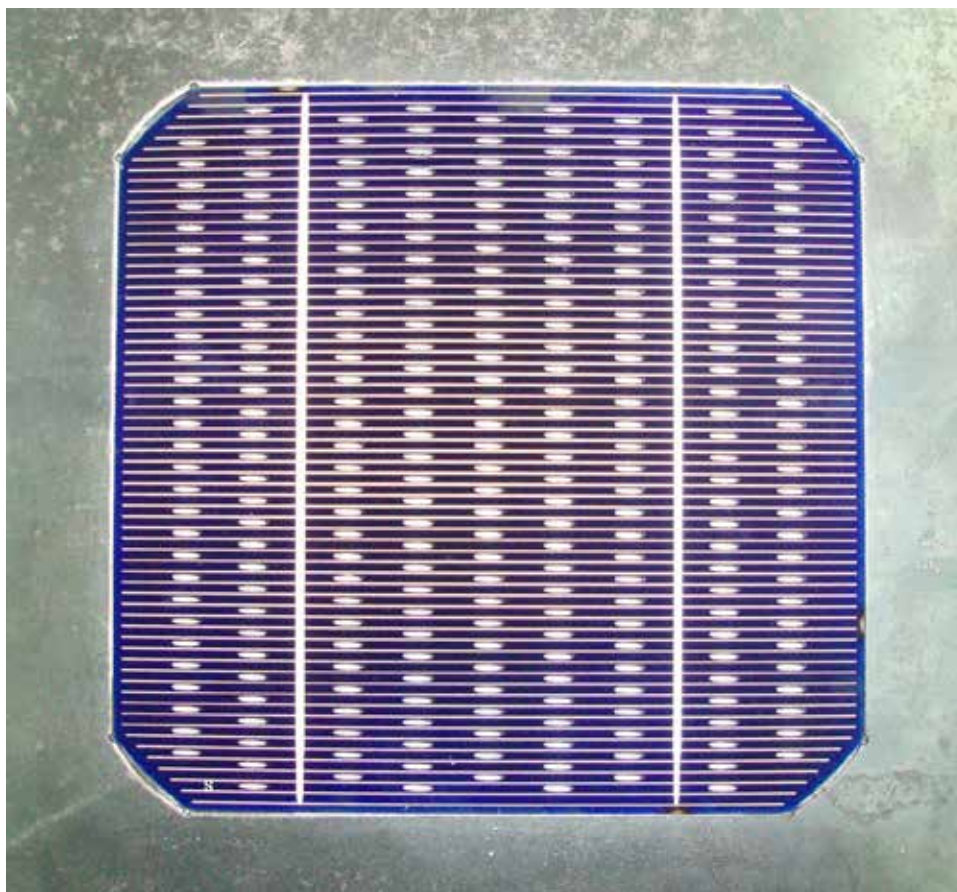
β: Κοντινή λήψη μετά την κατασκευή ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου $156 \times 156 \text{ mm}^2$.

Πριν από την κοπή, ένα ηλιακό κύτταρο τοποθετείται στο κέντρο της βάσης και ακριβώς πάνω από το πρότυπο των ελλείψεων στο μεταλλικό επίπεδο της κάτω πλάκας με την μπροστινή πλευρά των ωμικών επαφών του στραμμένη προς τα επάνω. Το ηλιακό κύτταρο διατηρείται σε σταθερή θέση από τον περιορισμό της μεταλλικής πλάκας του δεύτερου επιπέδου πάχους 2mm και με άνοιγμα στην κεντρική περιοχή της με εμβαδό ίδιο με αυτό του δείγματος. Η άκαμπτη μεταλλική βάση ήταν σχεδιασμένη και κατασκευασμένη ώστε να κρατήσει σταθερό και επίπεδο το κύτταρο, ελαχιστοποιώντας έτσι ουσιαστικά τις θραύσεις κυττάρων που προκαλούνται από την έλλειψη μηχανικής σταθερότητας.

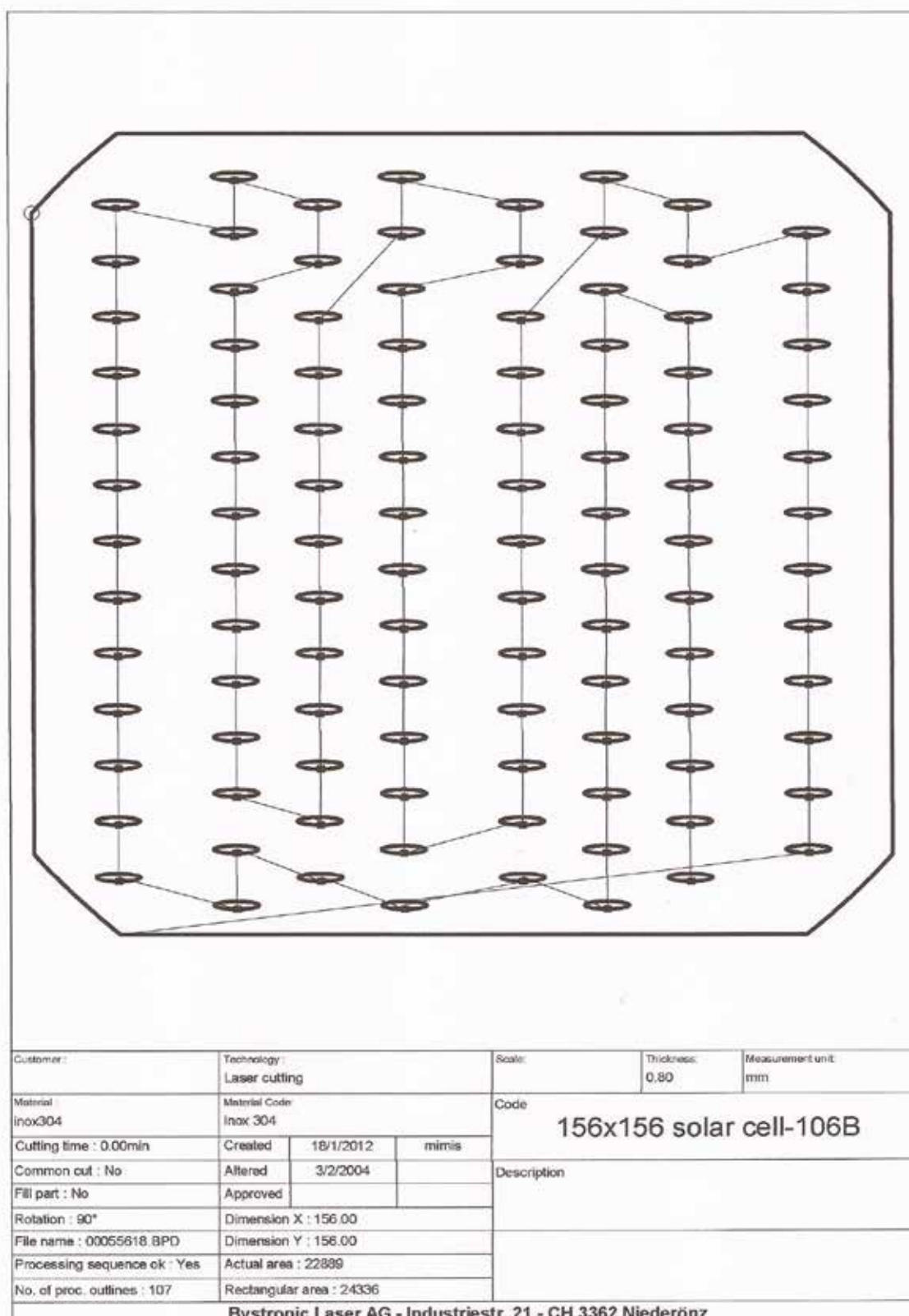


Εικόνα 5.12 Το ηλιακό κύτταρο τοποθετημένο στη μεταλλική βάση με την κεφαλή του laser να κινείται κάθετα από πάνω του κατά τη διάρκεια της κοπής.

Πριν από την έναρξη της κοπής των ελλείψεων, το σύστημα Bystar 4020 εκτελεί το στάδιο της ευθυγράμμισης. Ο χρόνος που απαιτείται για την δημιουργία ενός πλέγματος ελλείψεων σε επιφάνεια εμβαδού $156 \times 156 \text{ mm}^2$ σε ένα ηλιακό κύτταρο, εξαρτάται από το συνολικό αριθμό και το μήκος της περιμέτρου των ελλείψεων καθώς και τον αριθμό των σημείων που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό του Bystar για να ορίσει μια ορισμένη έλλειψη. Στην εικόνα 13 εμφανίζεται ένα ηλιακό κύτταρο τοποθετημένο στη μεταλλική βάση αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κοπής των ελλείψεων του περιοδικού πλέγματος που εξασφαλίζουν την ομοιόμορφη διέλευση του φυσικού φωτός. Τα μήκη του μεγάλου και μικρού άξονα των ελλείψεων είναι 6.3mm και 1.5mm αντιστοίχως και ο συνολικός τους αριθμός είναι 279. Ενώ στην εικόνα 14 φαίνεται το στάδιο της ευθυγράμμισης της δέσμης του λέιζερ, του σημείου έναρξης της κοπής αλλά και της τροχιάς που ακολουθεί για να ολοκληρώσει την κοπή των ελλείψεων.



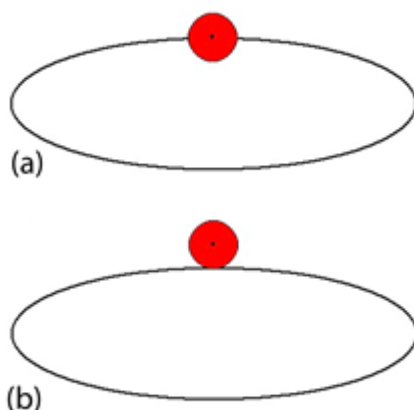
Εικόνα 5.13 Ημιδιαφανές μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου διαστάσεων $156 \times 156 \text{mm}^2$ αμέσως μετά την κοπή των 279 ελλείψεων. Οι ελλείψεις έχουν διαστάσεις μικρού άξονα 1.5mm και μεγάλου άξονα 6.3mm



Εικόνα 5.14 Καταγραφή της διαδικασίας κοπής ενός πλέγματος ελλείψεων σε 3 busbar ηλιακό κίτταρο από το λογισμικό του μηχανήματος Bystar 4020. Το στάδιο της ευθυγράμμισης γίνεται στον μικρό κύκλο που φαίνεται πάνω και αριστερά στο περίγραμμα του φωτοβολταϊκού ενώ η κοπή ξεκινάει από την έλλειψη κάτω δεξιά όπως φαίνεται.

Αραιά και πυκνά περιοδικά πλέγματα ελλείψεων σχεδιάστηκαν με τη χρήση του Autocad. Ο σχεδιασμός έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των ελλείψεων στο πλέγμα αλλά και να αποφεύγεται η τοποθέτηση και κοπή ελλείψεων σε κοντινή απόσταση που θα προκαλούσε συσσώρευση θερμικού φορτίου σε μια μικρή περιοχή ενός ηλιακού κυττάρου. Όλες οι παράμετροι των κατασκευασμένων δειγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

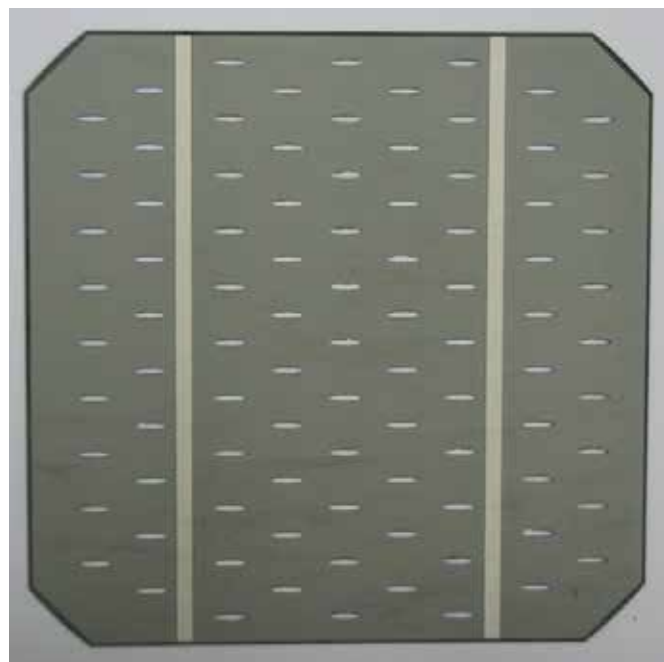
Το πραγματικό μέγεθος μιας έλλειψης μετά την κοπή είναι ελάχιστα διαφορετικό σε σύγκριση με αυτό του σχεδιασμού του. Αυτό εξαρτάται από τον τρόπο κατά τον οποίο είναι προγραμματισμένο να κινείται το κέντρο της δέσμης λέιζερ σε σχέση με την περίμετρο της έλλειψης κατά τη διάρκεια της κοπής της (Εικόνα 5.15). Για παράδειγμα, ο μικρός και ο μεγάλος άξονας μιας έλλειψης 1.2mm x 8 mm αντίστοιχα μπορεί να αυξηθεί κατά 0,3 mm και να γίνει 1.5 mm x 8.3 mm ή κατά 0.6 mm σε 1.8 mm x 8.6 mm όταν το κέντρο της δέσμης laser του Bystar έχει οριστεί να κινείται στην περίμετρο όπως στην εικόνα 5.15a ή όπως στην εικόνα 5.15b αντίστοιχα.



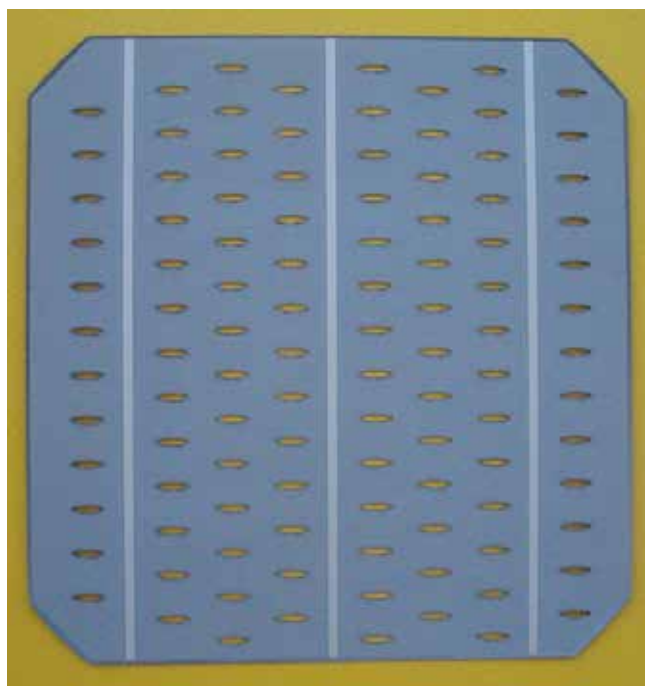
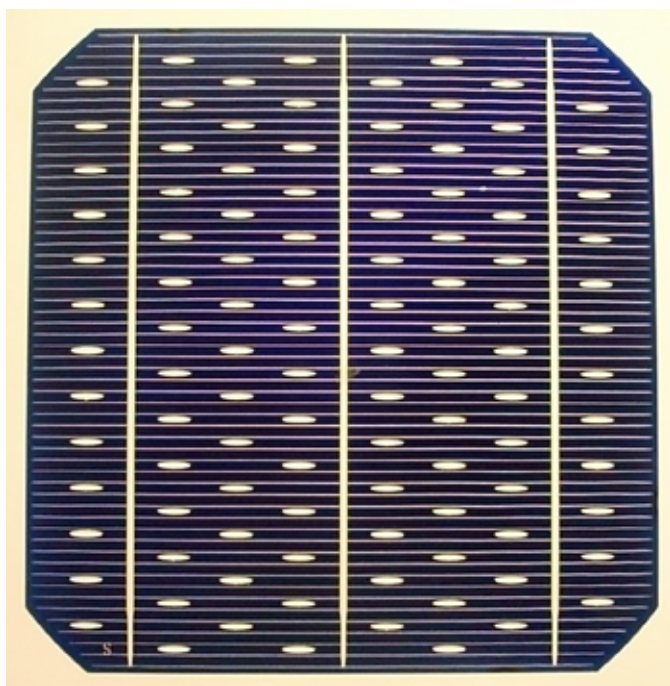
Εικόνα 5.15 Τοποθέτηση της δέσμης laser (κόκκινος κύκλος) σε σχέση με την περίμετρο της σχεδιασμένης έλλειψης

| Design dimensions of ellipses | | Dimensions of ellipses after laser cutting | | Number of ellipses | Number of bus bars | Solar cell area removed (%) |
|-------------------------------|-----------------|--|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|
| Minor Axis (mm) | Major Axis (mm) | Minor Axis (mm) | Major Axis (mm) | | | |
| 1.2 | 8 | 1.8 | 8.6 | 91 | 2 | 4.6 % |
| 1.5 | 8.3 | 1.8 | 8.6 | 106 | 3 | 5.4 % |
| 1.5 | 8 | 1.8 | 8.3 | 208 | 3 | 10.0 % |
| 1.2 | 6 | 1.5 | 6.3 | 279 | 2 | 8.7 % |

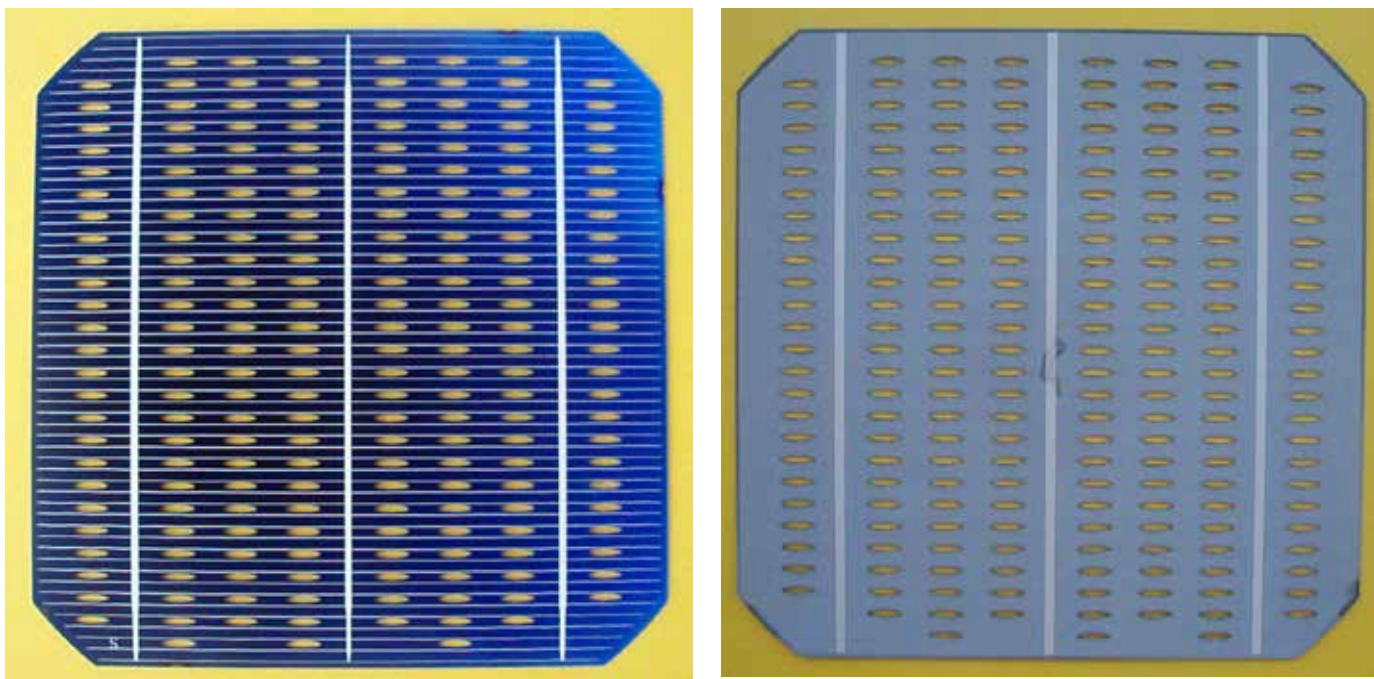
Πίνακας 5.1 Βασικοί παράμετροι των κατασκευασμένων ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων



Εικόνα 5.16 Εμπρόσθια και πίσω όψη ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου επιφάνειας $156 \times 156 \text{mm}^2$ με 91 ελλείψεις. Οι ελλείψεις έχουν μικρό και μεγάλο άξονα 1.8mm και 8.6mm αντίστοιχα.



Εικόνα 5.17 Εμπρόσθια και πίσω όψη ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου επιφάνειας $156 \times 156 \text{mm}^2$ με 106 ελλείψεις. Οι ελλείψεις έχουν μικρό και μεγάλο άξονα 2.2mm και 8.6mm αντίστοιχα.



Εικόνα 5.18 Εμπρόσθια και πίσω όψη ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου επιφάνειας $156 \times 156 \text{mm}^2$ με 208 ελλείψεις. Οι ελλείψεις έχουν μικρό και μεγάλο άξονα 1.8mm και 8.3mm αντίστοιχα.

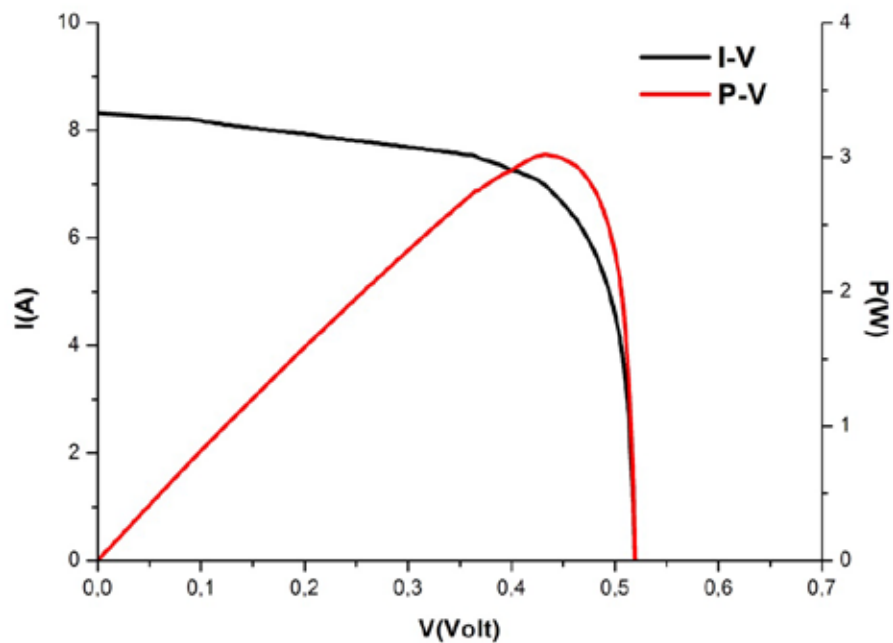
5.7 Ηλεκτρικές μετρήσεις

Για να πραγματοποιηθούν οι ηλεκτρικές μετρήσεις στα κατασκευασμένα διαφανή ηλιακά κύτταρα πραγματοποιήθηκαν ωμικές συνδέσεις και στις δύο πλευρές τους. Τα επίπεδα καλώδια χαλκού τα οποία συγκολλήθηκαν στις μεταλλικές ράβδους επιλέχθηκε να έχουν επικάλυψη από κράμα φιλικό προς το περιβάλλον με αναλογίες Bi(58%)/Sn(42%). Η επιλογή του κράματος έγινε σύμφωνα με τις συνθήκες συγκόλλησης που καθορίστηκαν και περιγράφονται στο κεφάλαιο 3. Βασικός γνώμονας είναι η αποφυγή ανάπτυξης μηχανικών τάσεων που θα είχαν ως αποτέλεσμα την καταστροφή του δείγματος. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης καταγράφηκαν με το KEITHLEY 2611 A το οποίο διαθέτει παλμική πηγή ρεύματος με ανώτατο όριο τα 10 A. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε φυσικές συνθήκες φωτισμού με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ 900-1000 W/m².

Στην εικόνα 5.19, παρουσιάζονται οι καμπύλες I-V και P-V ενός ημιδιαφανούς στοιχείου πυριτίου με ένα δύο-διαστάσεων περιοδικό πλέγμα αποτελούμενο από 91 ελλείψεις. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης καταγράφηκαν σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 930 Watt/m². Η διαφάνεια του κυττάρου είναι 4.6% και η απόδοσή του μειώθηκε από 17.3% σε 14.2% μετά από την κοπή με το λέιζερ. Εάν η κοπή δεν προκαλούσε καμία καταστροφή στο ηλιακό κύτταρο τότε η μείωση κατά ~5% της ενεργής επιφάνειας του θα έπρεπε να προκαλεί μια αντίστοιχη μείωση στην απόδοση του δηλαδή από 17.3% σε 16.5%. Το υπόλοιπο 2.3% της μείωσης δηλαδή από 16.5% σε 14.2% αποδίδεται στην βλάβη που προκαλείται από τη δέσμη laser, καθώς κόβει διαδοχικά 91 ελλείψεις κινούμενη κατά μήκος της περιμέτρου τους. Το συνολικό μήκος της διαδρομής του λέιζερ πάνω στο συγκεκριμένο ηλιακό κύτταρο είναι 1650 χιλιοστά σύμφωνα με τον τύπο που δίνει την περίμετρο της έλλειψης.

$$p \gg p \frac{e}{e} 3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(3+3b)} \frac{u}{u} \quad (5.2)$$

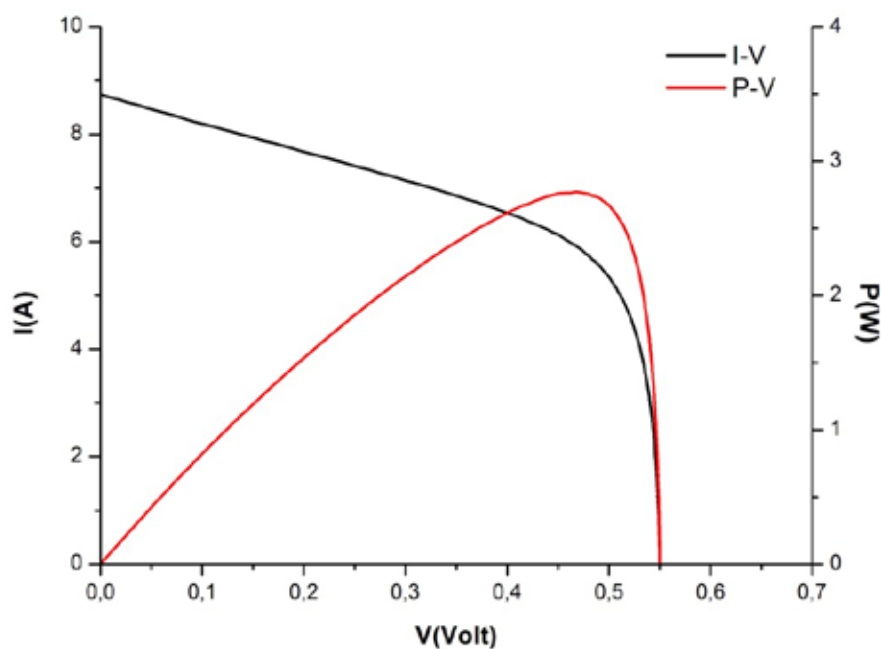
Όπου a είναι η ακτίνα του μεγάλου άξονα της έλλειψης
 b είναι η ακτίνα του μικρού άξονα της έλλειψης



Εικόνα 5.19 Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος τάσης (P-V) ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου επιφάνειας $156 \times 156 \text{mm}^2$ με 91 ελλείψεις.

| Cell Type | FF(%) | I_{sc} (A) | V_{oc} (V) | η (%) | I_m (A) | V_m (A) | P (W) |
|-------------|-------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-------|
| 91 ellipses | 72.8 | 8.32 A | 0.52 V | 14.2 | 7.00 | 0.45 | 3.15 |

Πίνακας 5.2 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δείγματος των 91 ελλείψεων



Εικόνα 5.20 Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος τάσης (P-V) ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου επιφάνειας $156 \times 156 \text{mm}^2$ με 106 ελλείψεις.

| Cell Type | FF(%) | I_{sc} (A) | V_{oc} (V) | η (%) | I_m (A) | V_m (A) | P (W) |
|--------------|-------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-------|
| 106 ellipses | 57.6 | 8.74 | 0.55 | 13.2 | 5.92 | 0.47 | 2.77 |

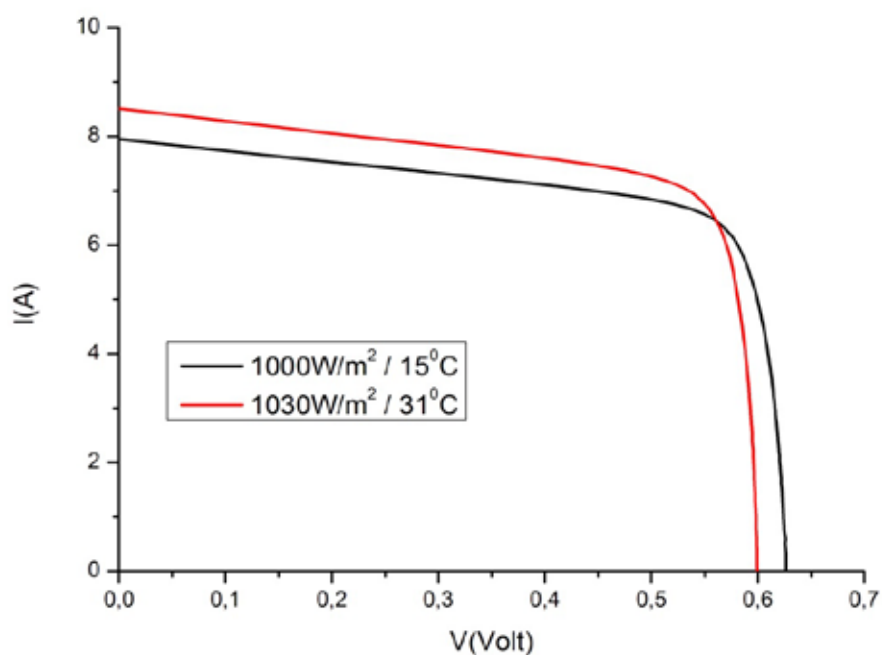
Πίνακας 5.3 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δείγματος των 106 ελλείψεων

Στο δείγμα των 91 ελλείψεων το συνολικό μήκος της διαδρομής του laser υπολογίστηκε ότι είναι 1650 χιλιοστά που αντιστοιχεί σε μείωση της απόδοσής του κατά 1.4% για κάθε 1000 mm. Σε σύγκριση με το προηγούμενο, στο δείγμα των 106 ελλείψεων που φαίνεται στην εικόνα 5.17, η δέσμη καλύπτει συνολικό μήκος διαδρομής 1920 mm που προκαλεί μείωση της απόδοσης του ηλιακού κυττάρου 3.3% δηλαδή μείωση 1.7% για κάθε 1000 mm. Για το δείγμα των 106 οπών μία περαιτέρω μείωση 1% στην απόδοση, λόγω της μείωσης κατά 5.4% της ενεργής επιφάνειας του κυττάρου, οδηγεί σε μία συνολική απόδοση 13.2% σε σύγκριση με την αρχική 17.5% του βιομηχανικού δείγματος πριν την κοπή των ελλείψεων [20].

Όταν κατασκευάζεται ένα ημιδιαφανές ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου από ένα συμβατικό, υπάρχουν δύο παράγοντες που συμβάλλουν στη μείωση της απόδοσής του. Η πρώτη είναι η ζημία που προκαλείται στο υλικό από τη δέσμη λέιζερ, καθώς κόβει

διαδοχικά τις ελλείψεις και είναι ανάλογη, όπως αποδεικνύεται από την προηγηθείσα ανάλυση, προς τη συνολική διαδρομή της δέσμης λέιζερ κατά την κοπή. Η δεύτερη είναι η μείωση της ενεργής επιφάνειας του κυττάρου, επί της οποίας προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, που οφείλεται στην αφαίρεση των στοιχείων του πλέγματος από την κοπή. Για να γίνει σωστός διαχωρισμός μεταξύ της επίδρασης του κάθε παράγοντα στην απόδοση του κυττάρου, ένα ειδικό δείγμα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε. Αποτελείται από ένα συμβατικό φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου 3 bus bar με εμβαδόν $156 \times 156 \text{ mm}^2$ με δύο κύκλους ακτίνας 20 mm ο καθένας που έχουν αφαιρεθεί από την κεντρική περιοχή του με κοπή λέιζερ. Οι κύκλοι έχουν κοπεί συμμετρικά εκατέρωθεν του κεντρικού bus-bar. Αυτό προκαλεί μία μείωση στην ενεργή περιοχή του κυττάρου της τάξης του 10,5% η οποία είναι διπλάσια εκείνης του ημιδιαφανούς με το περιοδικό πλέγμα των 91 ελλείψεων που φαίνεται στην εικόνα 5.16.

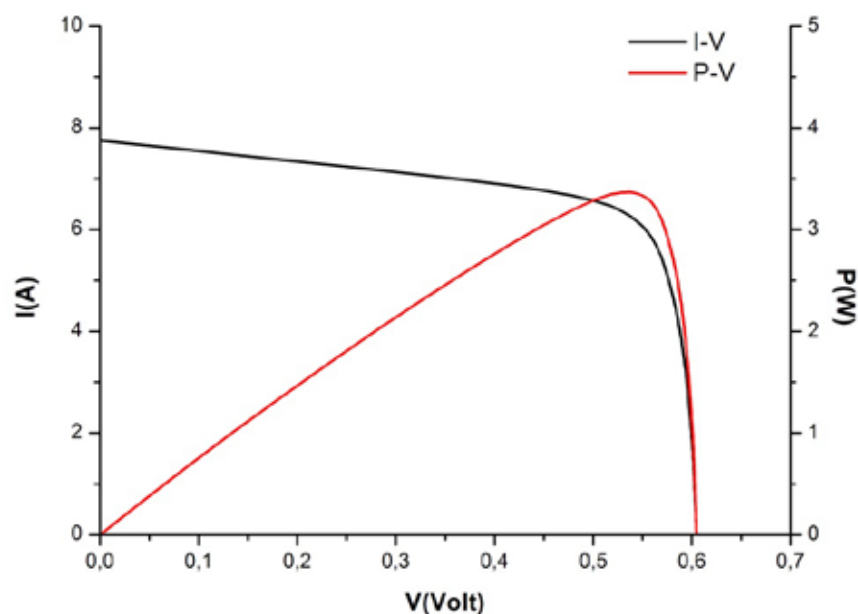
Η εικόνα 5.21 δείχνει τις καμπύλες I-V του δείγματος που κατασκευάστηκε με τους δύο κύκλους οι οποίες καταγράφονται για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες. Από την ανάλυση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που φαίνονται στον πίνακα 5.4 η απόδοσή του είναι υψηλή με τιμή 15.2% - 15.3%. Η μείωση της ενεργής περιοχής κατά 10.5% εξηγεί και τη κύρια μείωση στην απόδοση του από την αρχική τιμή του 18.6%, πριν από την κοπή των κύκλων στο κέντρο του, σε 16.6%. Η συνολική διαδρομή της δέσμης λέιζερ κατά μήκος της περιμέτρου των δύο κύκλων είναι 250 mm δηλαδή σημαντικά μικρότερη από το μήκος των 1650 χιλιοστών όπου η ακτίνα λέιζερ κινείται κατά την κοπή 91 ελλείψεων στο ημιδιαφανές κυττάρο της εικόνας 5.16.



Εικόνα 5.21 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V, P-V ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου επιφάνειας $156 \times 156 \text{mm}^2$ με 2 κύκλους στο κέντρο του ακτίνας 20mm ο καθένας σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

| Cell Type | FF(%) | I_{sc} (A) | V_{oc} (V) | η (%) | I_m (A) | V_m (A) | P (W) |
|-------------------|-------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-------|
| 2 circles (black) | 72.8 | 7.94 | 0.626 | 15.2 | 6.46 | 0.560 | 3.62 |
| 2 circles (red) | 74.2 | 8.58 | 0.59 | 15.3 | 6.96 | 0.540 | 3.76 |

Πίνακας 5.4 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δείγματος με τους 2 κύκλους.



Εικόνα 5.22 Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος τάσης (P-V) ημιδιαφανούς ηλιακού κυττάρου επιφάνειας $156 \times 156 \text{ mm}^2$ με 2 παραλληλόγραμμα στο κέντρο του διαστάσεων $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ το καθένα.

| Cell Type | FF(%) | I_{sc} (A) | V_{oc} (V) | η (%) | I_m (A) | V_m (A) | P (W) |
|------------------|-------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-------|
| 2 parallelograms | 72.5 | 7.77 | 0.604 | 13.7 | 6.26 | 0.540 | 3.38 |

Πίνακας 5.5 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δείγματος με τα 2 παραλληλόγραμμα.

Η εικόνα 5.22 δείχνει τις καμπύλες I-V και P-V σε ηλιακή ακτινοβολία 1030 Watt/m^2 , του δείγματος που κατασκευάστηκε με τα δύο ορθογώνια παραλληλόγραμμα εκατέρωθεν του κεντρικού μεταλλικού αγωγού συλλογής ρεύματος (bus bar). Τα παραλληλόγραμμα είχαν διαστάσεις $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ που αντιστοιχεί σε μείωση της ενεργής περιοχής του κυττάρου κατά 16.7%. Από τις τιμές του πίνακα 5.5 η τελική τιμή της απόδοσης είναι 13.7%. Η μείωση της ενεργής επιφάνειας κατά 16.7% προκαλεί την μεγαλύτερη αναλογικά μείωση της απόδοσης από 18.6% που είναι η απόδοση του standard κυττάρου πριν τις κοπές των δύο ορθογωνίων παραλληλογράμμων σε 15.5%, δηλαδή μειωμένη κατά 3.1%. Η επιπρόσθετη μείωση από 15.5% σε 13.7% ,δηλαδή κατά 1.8% ,οφείλεται στην βλάβη που προκαλεί η δέσμη laser. Η ιδιαιτερότητα αυτής της κοπής, όπως και αυτής των δύο κύκλων, είναι ότι η δέσμη laser κατά την κίνησή της κατά μήκος της περιμέτρου των δύο παραλληλογράμων συνολικού μήκους 360 mm αναπόφευκτα κόβει μεγάλο αριθμό grid fingers του πλέγματος της ωμικής επαφής της επιφάνειας του κυττάρου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία.

Για τα καλύτερα ημιδιαφανή κύτταρα πυριτίου που κατασκευάστηκαν, η απόδοση μειώνεται από 1% έως 2% για κάθε 1000 mm διαδρομής της δέσμης laser καθώς κόβει τα περιοδικά πλέγματα των ελλείψεων. Η βλάβη που προκαλείται στα συγκεκριμένα υλικά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται, πρώτον από την καταλληλότητα του συστήματος laser που χρησιμοποιείται, από το υλικό και το πάχος των διαφόρων μερών του κυττάρου, από την μηχανική σταθερότητα και την επίπεδη τοποθέτηση του δείγματος, από την ταχύτητα της κοπής (που εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων που επιλέγονται για να ορισθεί κάθε στοιχείο κοπής του περιοδικού πλέγματος) και από την τιμή της πίεσης του αδρανούς αερίου. Λόγω της σχετικά μεγάλης απόστασης που διανύει (1650 mm) η δέσμη laser κατά την κοπή των 91 ελλείψεων η μείωση της απόδοσης ως προς την αρχική υπολογίζεται ότι είναι ίση με 2.3%. Αντιθέτως, στο δείγμα που προέκυψε από την κοπή των δύο κύκλων αφαιρέθηκε ενεργή επιφάνεια ισοδύναμη με το 10.5% της συνολικής επιφάνειας του κυττάρου, η δέσμη κάλυψε μία απόσταση μόλις 250 mm και η απόδοση μειώθηκε κατά 1.2%.

Στο τελευταίο κύτταρο, η συνολική μείωση της απόδοσης οφείλεται κυρίως στη μείωση της ενεργής περιοχής του κυττάρου κατά 10.5% και υπερκαλύπτει τη μείωση, λόγω της καταστροφής του υλικού, που προκαλείται από την δέσμη λέιζερ. Η υψηλή απόδοση 15.3% που υπολογίζεται από τις ηλεκτρικές μετρήσεις αυτού του ειδικού κυττάρου οφείλεται στην έλλειψη ομοιόμορφης διαπερατότητας από το φως του ήλιου. Για τα ημιδιαφανή κύτταρα Si με τις 91 ελλείψεις, η μείωση της απόδοσης που οφείλεται σε καταστροφή του υλικού είναι 2.3% σε σύγκριση με μόνον 0.8% που οφείλεται στη μείωση της ενεργής επιφάνειάς του.

Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων κοπής και όσο περισσότερο ομοιόμορφη η κατανομή τους επί της επιφάνειας ενός κυττάρου, τόσο καλύτερη είναι η διαπερατότητα του φυσικού φωτός. Όσα περισσότερα είναι τα στοιχεία κοπής (ελλείψεις, κύκλοι, τετράγωνα κλπ) και όσο μεγαλύτερο το μήκος της περιμέτρου τους, τόσο το συνολικό μήκος της διαδρομής της δέσμης laser αυξάνεται με συνέπεια την μικρότερη απόδοση του κυττάρου. Παρά τον μεγάλο αριθμό των στοιχείων κοπής (περισσότερα από 100), τα ημιδιαφανή ηλιακά κύτταρα που κατασκευάστηκαν παρουσιάζουν αποδόσεις από 13.2% μέχρι 14.2% για τιμές διαπερατότητας από 4.6% μέχρι 5.4% όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.6 [24].

| Design dimensions of ellipses | | Dimensions of ellipses after laser cutting | | Number of ellipses | Number of bus bars | Solar cell area removed (%) | Efficiency η (%) |
|-------------------------------|-----------------|--|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Minor Axis(mm) | Major Axis (mm) | Minor Axis (mm) | Major Axis (mm) | | | | |
| 1.2 | 8.0 | 1.8 | 8.6 | 91 | 2 | 4.6 | 14.2 |
| 1.5 | 8.0 | 1.8 | 8.3 | 104 | 3 | 5.1 | 13.5 |
| 1.5 | 8.3 | 1.8 | 8.6 | 106 | 3 | 5.4 | 13.2 |

Πίνακας 5.6 Σχεδιαστικές και πειραματικές παράμετροι καθώς και αποδόσεις των κατασκευασμένων ημι-διαφανών ηλιακών κυττάρων με τιμές διαπερατότητας από 4.6% μέχρι 5.4%.

Εν κατακλείδι, η λεπτομερής ανάλυση των ηλεκτρικών στοιχείων μας δείχνει ότι οι αποδόσεις των 156x156 mm² ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων, με τιμές διαπερατότητας από σχεδόν 5% έως 10%, θα κυμαίνονται μεταξύ 13% και 15%, όταν κατασκευάζονται από βιομηχανικά μονοκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου με αποδόσεις της τάξεως από 17.3% σε 18.7%. Από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει σαφώς ότι η απόδοση ενός ημιδιαφανούς κυττάρου Si δεν εξαρτάται μόνο από το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας των στοιχείων που πρέπει να αφαιρεθούν με κοπή λέιζερ, αλλά και από το συνολικό μήκος των περιμέτρων τους. Συνεπώς για ένα συγκεκριμένο σύστημα laser όσο μεγαλύτερο είναι το συνολικό μήκος κίνησης της δέσμης του πάνω στον ημιαγωγό, τόσο μικρότερη είναι η απόδοσή του ηλιακού κυττάρου, εάν αφαιρείται η ίδια επιφάνεια της ενεργής περιοχής του.

5.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο 5 έγινε περιγραφή του σχεδιασμού, της κατασκευής και του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων μονο-κρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας (156x156 mm²) και υψηλής απόδοσης. Η διαπερατότητα των ηλιακών κυττάρων επιτεύχθηκε με την κοπή, με δέσμη λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), περιοδικών πλεγμάτων ελλείψεων επί συμβατικών ηλιακών κυττάρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Η κοπή των ελλείψεων έγινε από την εταιρεία Μεταλλεμπορική Α.Ε. που έχει την έδρα της στην Βιομηχανική Περιοχή Πατρών και διαθέτει το σύγχρονο σύστημα κοπής laser Bystar 4020 της εταιρείας Bystronic το οποίο περιλαμβάνει ένα λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ laser) υψηλής ισχύος (6kW) τα χαρακτηριστικά μεγέθη κοπής του οποίου είναι : α) position accuracy of ± 0.1 mm, β) repeatability of ± 0.05 mm και γ) edge detection precision of ± 0.5 m.

Ο σχεδιασμός των ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων έγινε έτσι ώστε να παρουσιάζουν ομοιόμορφη διαπερατότητα φυσικού φωτός και υψηλή απόδοση σε συνδυασμό με χαμηλή δαπάνη παραγωγής. Για το λόγο αυτό τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία που επιλέχθηκαν

για να κατασκευαστούν τα αντίστοιχα ημιδιαφανή είναι βιομηχανικής παραγωγής, διαθέτουν έως και τρία bus bars για την διαχείριση των υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων που παράγονται κατά την λειτουργία τους, έχουν μεγάλη επιφάνεια ($156 \times 156 \text{ mm}^2$), μικρό πάχος και υψηλές αποδόσεις που κυμαίνονται από 17.3% έως 18.7% πριν από την διάνοιξη των ελλείψεων. Λόγω της μορφής του πλέγματος των μεταλλικών επαφών στα βιομηχανικώς παραγόμενα ηλιακά κύτταρα, επιλέχθηκε το σχήμα των ελλείψεων για τα στοιχεία κοπής κυρίως για την ευελιξία που προσφέρουν στην επιλογή διαφορετικών μηκών για τον μικρό και μεγάλο άξονά τους.

Στην κατασκευή των δειγμάτων αρχικά καταφέραμε να κατανεμηθούν ομοιόμορφα και σε ακριβείς θέσεις επί της επιφάνειας τα πολυάριθμα και πολύ μικρών διαστάσεων στοιχεία που απαρτίζουν τα περιοδικά πλέγματα των ελλείψεων ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη διαπερατότητα ηλιακού φωτός. Δεύτερον, αλλά πολύ σημαντικό αποτέλεσμα της συγκεκριμένης έρευνας, είναι ότι μειώθηκε αποτελεσματικά η θραύση τους κατά τη διάρκεια κοπής των στοιχείων των πλεγμάτων με την επινόηση και κατασκευή μιας μεταλλικής βάσης δύο επιπέδων. Η βάση αυτή προσφέρει αρχικά μηχανική σταθερότητα στο φωτοβολταϊκό κύτταρο κατά τη διάρκεια της κοπής και δεύτερον εξασφαλίζει ότι η διαδρομή της δέσμης laser, καθώς κόβει τις ελλείψεις ενός κυττάρου, δεν παρεμποδίζεται όταν εξέρχεται από την πίσω πλευρά του ενώ παράλληλα βοηθάει στην εκτόνωσή της για την αποφυγή καταστροφής του δείγματος.

Τα καλύτερα ημιδιαφανή κύτταρα πυριτίου που κατασκευάστηκαν παρουσιάζουν αποδόσεις από 13.2% μέχρι 14.2% για τιμές διαπερατότητας από 4.6% μέχρι 5.4%. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προέκυψε από την ανάλυσή των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ότι η απόδοση ενός ημιδιαφανούς κυττάρου Si δεν εξαρτάται μόνο από το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας των στοιχείων που αφαιρούνται με κοπή laser, αλλά και από το συνολικό μήκος των περιμέτρων τους. Όσο μεγαλύτερο είναι το συνολικό μήκος κίνησης του laser πάνω στον ημιαγωγό, τόσο μικρότερη είναι η απόδοση του ηλιακού κυττάρου, με την ίδια αφαιρούμενη επιφάνεια στην ενεργή περιοχή του

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

- [1] G. Giordano, "Photovoltaics and lasers: PV production looking to make a mark this year," *LIA Today*, vol. 18, 2010.
- [2] A.Niyibizi, B.W.Ikua and P.K.Kihato "Laser material processing in Crystalline Silicon Photovoltaics," in *Mechanical Engineering Conference on Sustainable Research and Innovation*, 2012.
- [3] Advantages of Laser Processing,
www.laserdeal.com/technoFiles/Laser%20Advantages%202.doc.
- [4] C. M. Dunskey, "The promise of solar energy: Applications and opportunities for laser processing in the manufacturing of solar cells," San Jose, CA, 2007.
- [5] F. Colville, "A sunny outlook for lasers in solar," *Laser Focus World*, vol. 45, pp. 39-43, 2009.
- [6] R. Hendel, "Laser Applications in Solar Cell Manufacturing," *Laser Technik Journal*, pp. 32-35, 2008.
- [7] R.Hendel, B.Lehner and C.Ruttimann, "Faster and reliable joining of solar cells bi-wavelength laser welding for photovoltaic module intergration," *Laser Technik Journal*, vol. 9, pp. 20-23, 2012.
- [8] F. Colville, "Ultrafast laser-based tools enhance solar cell efficiencies," San Francisco, CA, 2010.
- [9] R. Bartlome, *et al.*, "Laser applications in thin-film photovoltaics," *Applied Physics B: Lasers and Optics*, pp. 1-10, 2010.
- [10] A. Schoonderbeek, *et al.*, "Laser technology for solar cells and solar receivers," 26th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2007 Orlando, FL, 2007.
- [11] J. Stollhof, *et al.*, "Customized short and ultrashort laser pulses for the photovoltaics industry," 26th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2007, Orlando, FL, 2007.
- [12] A. Ostendorf and A. Schoonderbeek, "Lasers in energy device manufacturing," Laser-based Micro- and Nanopackaging and Assembly II, San Jose, CA, 2008.
- [13] S.Roberts and N.Guarlento, *Building Intergrated Photovoltaics / A Handbook*: Birkhauser Verlag AG, 2009.
- [14] A. Takeoka, S. Kouzuma, H. Tanaka, H. Inoue, K. Murata, M. Morizane, N. Nakamura, H. Nishiwaki, M. Ohnishi, S. Nakano and Y. Kuwano, "Development and

- application of see-through a-Si solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29, pp. 243-252, 1993.
- [15] G. Willeke, P. Fath, "Mechanical wafer engineering for semitransparent polycrystalline silicon solar cells," *Applied Physics Letters*, 64, pp. 1274-1276, 1994.
- [16] A. Boueke, R. Kühn, P. Fath, G. Willeke and E. Bucher, "Latest results on semitransparent POWER silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 65, pp. 549-553, 2001.
- [17] P. Fath, H. Nussbaumer, R. Burkhardt, "Industrial manufacturing of semitransparent crystalline silicon POWER solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 74 pp. 127-131, 2002.
- [18] W. Jooss, M. Klenk, J. Isenbart, S. Keller, C. Marckmann, L. Weber, P. Fath, A. Boueke, H. Nussbaumer, R. Burkhardt, "Recent Results on Semitransparent Power Cells," in *Proceedings of the Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, 2003, pp. 1439-1442.
- [19] <http://www.sunways.eu/en/products/solar-cells/transparent-cells/>
- [20] Th. Makris and E. Skuras, "Electrical Characterization of Large surface Area Semi-transparent Si Solar cells," AIP Conf. Proc 1566, 397 (2013), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4848453>
- [21] Th. Makris and E. Skuras, "Electrical Characterization of Large Surface Area semi-transparent Silicon solar cells," *Proceedings 27th European Photo-voltaic Solar Energy Conference*, Frankfurt, Germany, 2012, pp. 2072-2074 ISBN:3-936338-28-0,
- [22] Th. Makris, K. Tsevas, D. Anagnostopoulos and E. Skuras, "Fabrication of transparent monocrystalline silicon solar cells," in *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 2009, pp. 1323-1325 ISBN:3-936338-25-6.
- [23] http://www.bystronic.com/cutting_and_bendings/us/en/products [Online].
- [24] Th. Makris, K. Tsevas, L. Kadylis, L. Mprechas, E. Skuras, "Fabrication of large surface area semi-transparent mono-crystalline Si solar cells", *Journal of Solar Energy Engineering*, 135(3), 034503, 2013, doi:10.1115/1.4024241.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

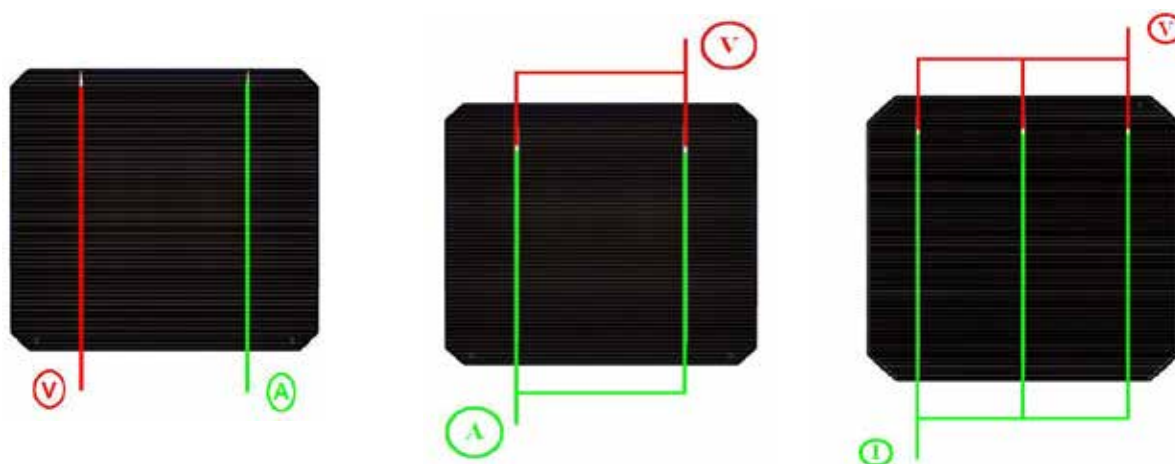
Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκαν τρεις τομείς. Η κατασκευή ωμικών συνδέσεων με φιλικά προς το περιβάλλον κράματα σε μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου, η έκθεση των ωμικών συνδέσεων σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία για να διαπιστωθεί η αντοχή τους σε ακραίες συνθήκες καθώς και η κατασκευή ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλης επιφάνειας.

Στο πρώτο κομμάτι της εργασίας καθορίστηκαν οι ιδανικότερες συνθήκες συγκολλήσεως για την κατασκευή ωμικών συνδέσεων επίπεδων αγωγών χαλκού που επικαλύπτονται από φιλικά προς το περιβάλλον κράματα επί φωτοβολταϊκών στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα κράματα που μελετήθηκαν για να αντικαταστήσουν την παραδοσιακά χρησιμοποιούμενη ύλη συγκολλήσεως ήταν τα Sn(96.5%)/Ag(3.5%) και Bi(58%)/Sn(42%). Και για τα δύο κράματα καθορίστηκαν οι θερμοκρασίες προθέρμανσης του δείγματος καθώς και οι θερμοκρασίες συγκολλήσεως ώστε να μειωθούν οι μηχανικές τάσεις, που οφείλονται στο διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής του επίπεδου καλωδίου με το μεταλλικό αγωγό στο ηλιακό κύτταρο, οι οποίες οδηγούν στην ανάπτυξη μικρών ή μεγάλων ρωγμών στο δείγμα. Σύμφωνα με τα πειράματά μας οι καταλληλότερες θερμοκρασίες συγκόλλησης για τα κράματα Sn(96.5%)/Ag(3.5%) και Bi(58%)/Sn(42%) είναι 240 °C και 150 °C αντίστοιχα με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες προθέρμανσης να είναι για το πρώτο 120°C και για το δεύτερο 80°C.

| Alloy | Hotplate Temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Tabbing Machine Temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Time (sec) |
|--------------|---|--|------------|
| Sn96.5/Ag3.5 | 120 | 240 | 10 |
| Bi58/Sn42 | 80 | 150 | 8 |

Πίνακας 6.1 Ιδανικότερες συνθήκες συγκόλλησης των κραμάτων Sn/Ag και Bi/Sn.

Αφού καθορίστηκαν οι ιδανικότερες συνθήκες συγκόλλησης, στη συνέχεια η μελέτη επικεντρώθηκε σε τρεις διαφορετικές συνδεσμολογίες 4 επαφών - διπλού ribbon και 8 επαφών σε δείγματα 2 busbars καθώς και 12 επαφών σε 3 busbars και για τα δύο κράματα. Από τις συστηματικές μετρήσεις χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης σε εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι $1000\text{W}/\text{m}^2$, η συνδεσμολογία των 12 επαφών με το κράμα Bi(58%)/Sn(42%) έδωσε την μικρότερη αντίσταση σε σειρά και καλές ηλεκτρικές ιδιότητες.



Εικόνα 6.1 . Διαφορετικοί τρόποι συνδεσμολογίας σε μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής δείγματα με ωμικές συνδέσεις και από τα δύο κράματα δέχτηκαν συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας έως 16X με την χρησιμοποίηση φακών Fresnel. Οι επίπεδοι αγωγοί χαλκού με το κράμα Sn/Ag εκτέθηκαν σε συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας από 2.5X μέχρι 5.5X και το κράμα Bi/Sn σε διάφορες συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας με τιμές από 4X μέχρι 16X. Οι ωμικές συνδέσεις ανταποκρίθηκαν πλήρως στην διαχείριση υψηλών ρευμάτων ενώ ταυτοχρόνως επέδειξαν μηχανική αντοχή δεδομένης της ραγδαίας αύξησης της θερμοκρασίας τους με την εφαρμογή υψηλών συγκεντρώσεων. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της παθητικής απαγωγής θερμότητας στην αύξηση της θερμοκρασίας

των κυττάρων υπό την επίδραση συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και η έκθεση των ομικών συνδέσεων σε σταθερή τιμή συγκέντρωσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μεταλλική δεξαμενή απαγωγής θερμότητας περιόρισε την μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και οι ομικές συνδέσεις ανταποκρίθηκαν στη συνεχή έκθεση συγκεντρωμένης ακτινοβολίας μέχρι και 10X.

Στο τελευταίο μέρος της διατριβής πραγματοποιήθηκε η κατασκευή των ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων μεγάλης επιφάνειας και υψηλής απόδοσης. Η διαπερατότητα των ηλιακών κυττάρων επιτεύχθηκε με την διάνοιξη, με δέσμη λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), περιοδικών πλεγμάτων οπών επί συμβατικών ηλιακών κυττάρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Στην κατασκευή των δειγμάτων αρχικά καταφέραμε να κατανεμηθούν ομοιόμορφα και σε ακριβείς θέσεις επί της επιφάνειας τα πολυάριθμα και πολύ μικρών διαστάσεων στοιχεία που απαρτίζουν τα περιοδικά πλέγματα των ελλείψεων ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη διαπερατότητα ηλιακού φωτός. Δεύτερον, ελαχιστοποιήθηκε η θραύση τους κατά τη διάρκεια διάτρησής τους με την επινόηση και κατασκευή μιας μεταλλικής βάσης δύο επιπέδων. Η βάση αυτή προσφέρει αρχικά μηχανική σταθερότητα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο κατά τη διάρκεια της κοπής και δεύτερον εξασφαλίζει ότι η διαδρομή της δέσμης λέιζερ, καθώς κόβει τις ελλείψεις ενός κυττάρου, δεν παρεμποδίζεται όταν εξέρχεται από την οπίσθια πλευρά του ενώ παράλληλα βοηθάει στην εκτόνωσή της για την αποφυγή θραύσης του δείγματος.

Τα καλύτερα ημιδιαφανή κύτταρα πυριτίου που κατασκευάστηκαν παρουσιάζουν αποδόσεις από 13.2% μέχρι 14.2% για τιμές διαπερατότητας από 4.6% μέχρι 5.4%. Τέλος, από την ανάλυσή των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η απόδοση ενός ημι-διαφανούς κυττάρου Si δεν εξαρτάται μόνο από το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας των στοιχείων που πρέπει να αφαιρεθούν με κοπή λέιζερ, αλλά και από το συνολικό μήκος των περιμέτρων τους. Όσο μεγαλύτερο είναι το συνολικό μήκος κίνησης του laser πάνω στον ημιαγωγό, τόσο μικρότερη είναι η απόδοση του ηλιακού κυττάρου, με την ίδια αφαιρούμενη επιφάνεια στην ενεργή περιοχή του.

| Design dimensions of ellipses | | Dimensions of ellipses after laser cutting | | Number of ellipses | Number of bus bars | Solar cell area removed (%) | Efficiency η (%) |
|-------------------------------|-----------------|--|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|
| Minor Axis(mm) | Major Axis (mm) | Minor Axis (mm) | Major Axis (mm) | | | | |
| 1.2 | 8.0 | 1.8 | 8.6 | 91 | 2 | 4.6 | 14.2 |
| 1.5 | 8.0 | 1.8 | 8.3 | 104 | 3 | 5.1 | 13.5 |
| 1.5 | 8.3 | 1.8 | 8.6 | 106 | 3 | 5.4 | 13.2 |

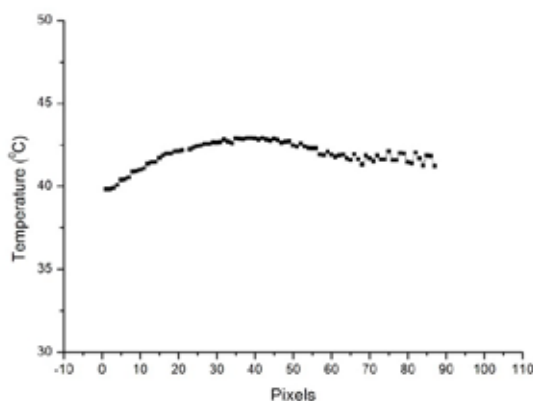
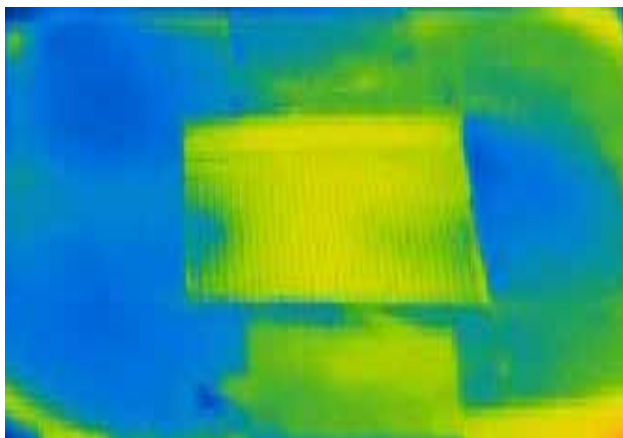
Πίνακας 6.2 Σχεδιαστικές και πειραματικές παράμετροι καθώς και αποδόσεις των κατασκευασμένων ημι-διαφανών ηλιακών κυττάρων με τιμές διαπερατότητας από 4.6% μέχρι 5.4%.

Τέλος, προτείνονται κάποια θέματα τα οποία χρίζουν περαιτέρω μελέτη και έρευνα. Καταρχήν να εφαρμοστεί κάποια άλλη πηγή λέιζερ στη μέθοδο κατασκευής των διαφανών στοιχείων πυριτίου που προτείνεται στην παρούσα διατριβή. Η αντικατάσταση του λέιζερ CO₂ κατά προτίμηση με παλμικό Nd:YAG ή Q-switched Nd:YAG θα προκαλέσει μικρότερη καταστροφή στο πυρίτιο. Σαν άμεσο επόμενο βήμα προτείνεται η μελέτη των διαφανών φωτοβολταϊκών στοιχείων μέσω Dark Lock In Thermography (DLIN) για την εύρεση της παράλληλης αντίστασης η οποία ευθύνεται κατά κύριο λόγο για την πτώση της απόδοσης του ηλιακού κυττάρου. Επίσης, προτείνεται σαν επόμενος στόχος η συνδεσμολογία δύο SMU KEITHLEY 2611A ώστε να καταστεί δυνατή η μέτρηση ρεύματος βραχυκύκλωσης μέχρι 20 A από δείγματα τα οποία δέχονται συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία.

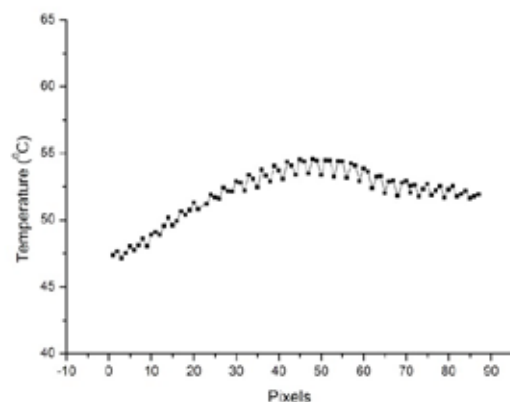
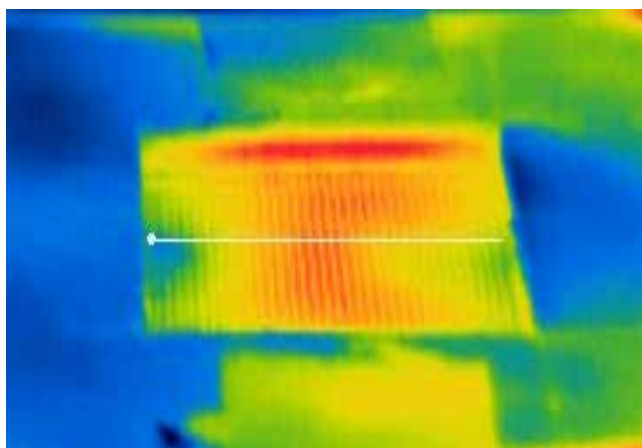
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται μετρήσεις θερμοκρασίας για τις ωμικές συνδέσεις του κράματος Sn/Ag σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας 4X για ενεργό επιφάνεια 70X70 mm² και σε συγκέντρωση 3.6X για ενεργό επιφάνεια 85x85 mm². Και στις δύο περιπτώσεις οι μετρήσεις θερμοκρασίας είχαν διάρκεια 30 λεπτών με καταγραφή χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης κάθε πέντε ή δέκα λεπτά και ταυτόχρονη μέτρηση θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο passive thermography. Στις παρακάτω εικόνες και γραφικές παραστάσεις είναι οι μετρήσεις θερμοκρασίας από τη θερμοκάμερα μέχρι την τελική μετά το πέρας τριάντα λεπτών.

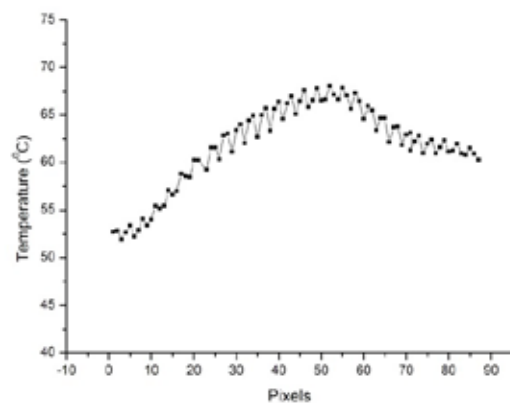
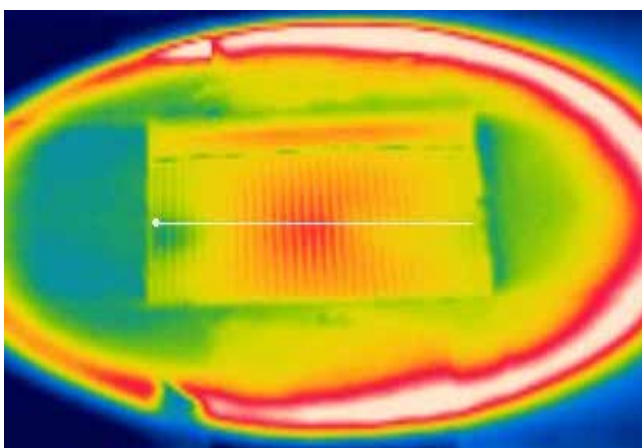
Μετρήσεις θερμοκρασίας για ενεργό επιφάνεια 85X85mm² σε συγκέντρωση 3.6X.



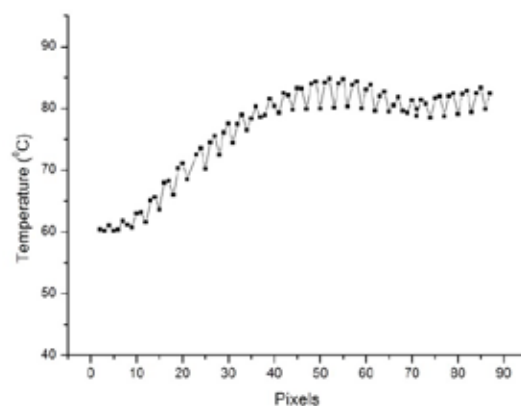
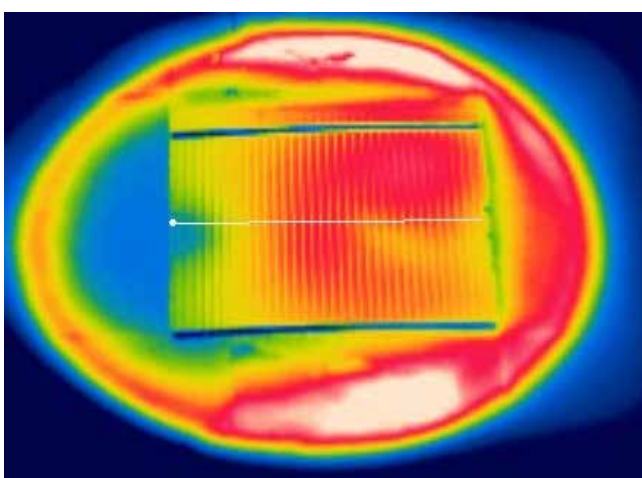
Εικόνα Α.1:Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος στην πρώτη χρονικά μέτρηση σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 3.6X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.



Εικόνα Α.2:Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος μετά από πέντε λεπτά έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 3.6X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.

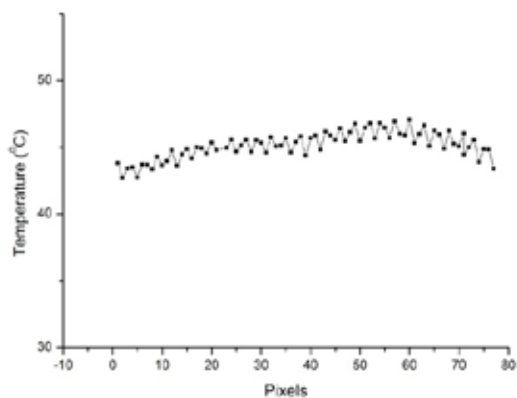
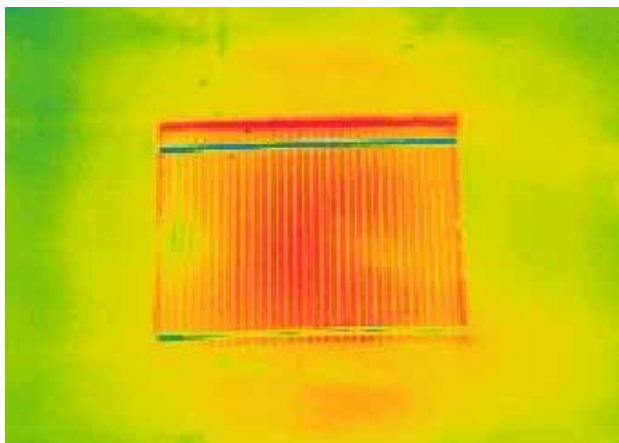


Εικόνα Α.3:Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος μετά από δεκαπέντε λεπτά έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 3.6X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.

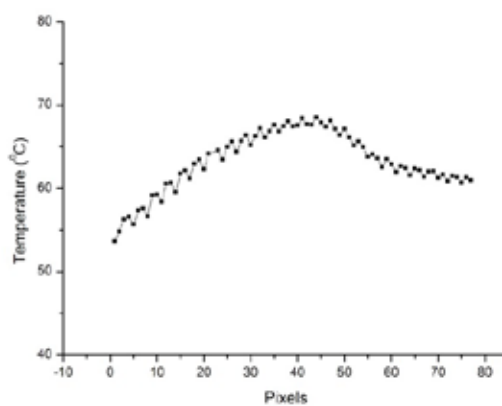
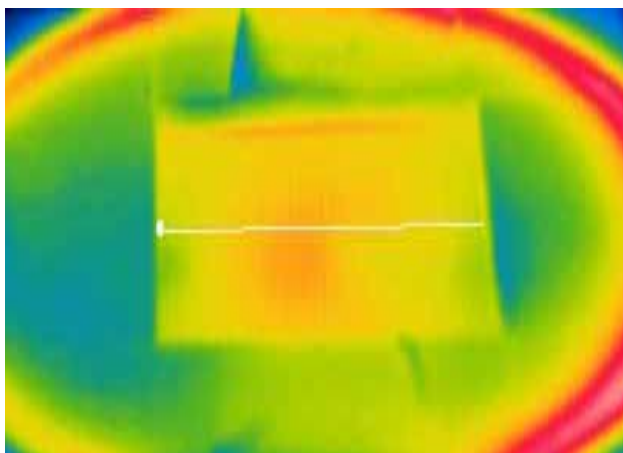


Εικόνα Α.4:Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος μετά από είκοσι λεπτά έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 3.6X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.

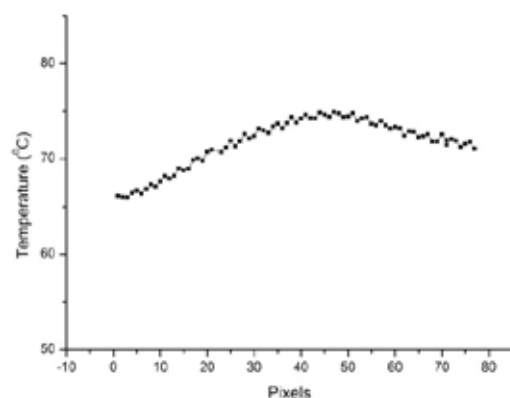
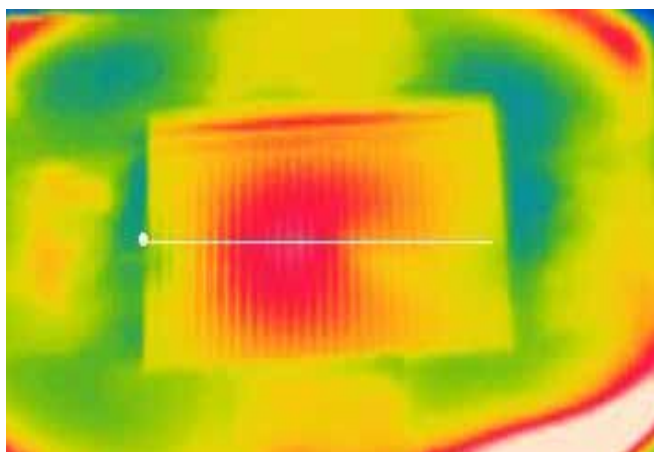
Μετρήσεις θερμοκρασίας για ενεργό επιφάνεια $70 \times 70 \text{mm}^2$ σε συγκεντρωση 4X.



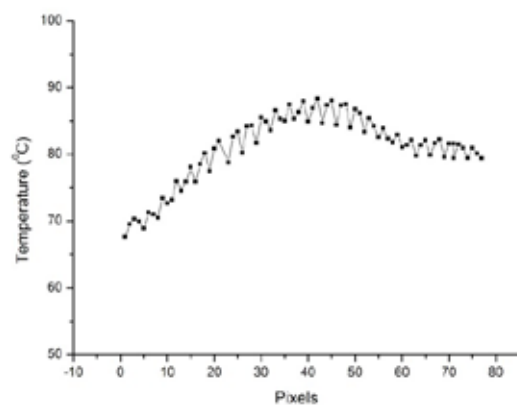
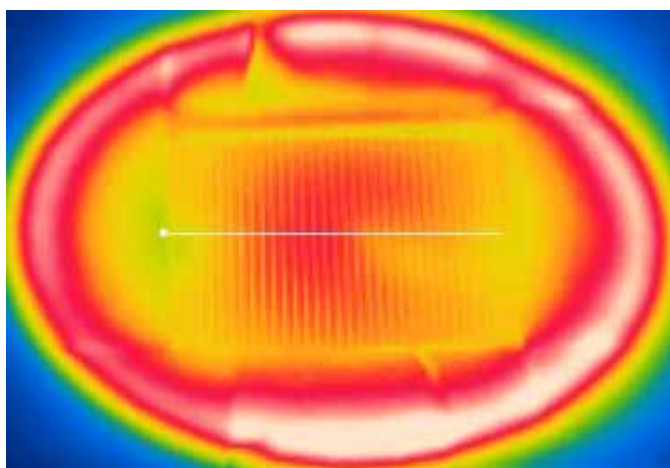
Εικόνα Α.5:Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος στην πρώτη χρονικά μέτρηση σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 4X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.



Εικόνα Α.6:Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος μετά από πέντε λεπτά έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 4X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.



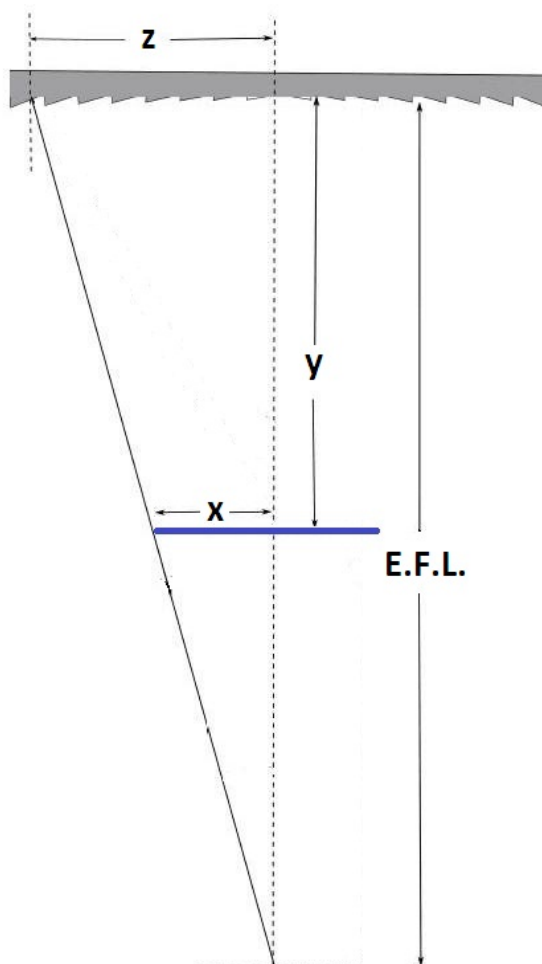
Εικόνα Α.7:Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος μετά δέκα λεπτά έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 4X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.



Εικόνα Α.8:Αριστερά: εικόνα passive thermography του μετρούμενου δείγματος μετά από είκοσι λεπτά έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία 4X. Δεξιά: Το profile line της εικόνας από τη μέτρηση της θερμογραφίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για την τιμή της συγκέντρωσης σε ένα σύστημα με φακούς fresnel. Ο πιο κοινός ορισμός είναι η γεωμετρική συγκέντρωση η οποία ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού του φακού με το εμβαδό της ενεργού περιοχής που δημιουργεί το στίγμα του φακού στο ηλιακό κύτταρο. Συνήθως η τιμή που υπολογίζεται στην πραγματικότητα είναι μικρότερη γιατί οι φακοί δεν έχουν διαπερατότητα 100%. Στους φακούς Fresnel που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία η διαπερατότητά τους ήταν 90%. Για να υπολογιστεί η τιμή της συγκέντρωσης για τις μετρήσεις του κεφαλαίου 4 χρησιμοποιήθηκε ο όρος γεωμετρική συγκέντρωση. Γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά του φακού από την κατασκευάστρια εταιρεία και από το θεώρημα των ομοίων τριγώνων υπολογίστηκε το ύψος που πρέπει να τοποθετηθεί ο φακός Fresnel για τις διάφορες τιμές συγκέντρωσης.



Εικόνα Β.1: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του φακού Fresnel (γκρι χρώμα) με το ηλιακό κύτταρο (μπλε χρώμα) για την εύρεση της τιμής συγκέντρωσης.

Στην εικόνα B.1 φαίνεται γραφικά η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στο ηλιακό κύτταρο το οποίο είναι συμμετρικά τοποθετημένο κάτω από το συγκεντρωτικό φακό. Το effective focus length (E.F.L) καθώς και effective diameter δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία. Άρα λοιπόν όπως φαίνεται στην εικόνα το z ορίζεται ως

$$z = \frac{Eff. Diameter}{2} \quad (B.1)$$

Από τη θεωρία όμοιων τριγώνων στα αριστερά του σχήματος προκύπτει ότι

$$\frac{x}{z} = \frac{E.F.L - y}{E.F.L} \quad \text{ή} \quad x = \frac{z(E.F.L - y)}{E.F.L} \quad (B.2)$$

Άρα λοιπόν το εμβαδόν της περιοχής του φακού και της ενεργού περιοχής δίνεται από τις σχέσεις

$$E_{total} = \rho \times z^2 \quad (B.3)$$

$$E_{active} = \rho \times x^2 \quad (B.4)$$

Η τιμή της συγκέντρωσης δίνεται από τον τύπο

$$Concentration = \frac{E_{total}}{E_{active}} \times 0.9 \quad (B.5)$$