



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΣ ΦΙΛΙΚΕΣ ΩΜΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ
ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΠΥΤΙΤΙΟΥ (Si)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΓΕΛΟΣ ΚΑΝΕΛΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΣΚΟΥΡΑΣ

ΠΑΤΡΑ - ΣΕΠΤΕΜΒΡΗΣ 2023

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

Άγγελος Κανέλλος

© 2023 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Το σύνολο της εργασίας αποτελεί πρωτότυπο έργο, παραχθέν από τον Άγγελο Κανέλλο, και δεν παραβιάζει δικαιώματα τρίτων καθ' οιονδήποτε τρόπο. Αν η εργασία περιέχει υλικό, το οποίο δεν έχει παραχθεί από τον ίδιο, αυτό είναι ευδιάκριτο και αναφέρεται ρητώς εντός του κειμένου της εργασίας ως προϊόν εργασίας τρίτου, σημειώνοντας με παρομοίως σαφή τρόπο τα στοιχεία ταυτοποίησής του, ενώ παράλληλα βεβαιώνει πως στην περίπτωση χρήσης αυτούσιων γραφικών αναπαραστάσεων, εικόνων, γραφημάτων κ.λπ., έχει λάβει τη χωρίς περιορισμούς άδεια του κατόχου των πνευματικών δικαιωμάτων για την συμπερίληψη και επακόλουθη δημοσίευση του υλικού αυτού.

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με τίτλο

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΣ ΦΙΛΙΚΕΣ ΩΜΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΠΥΡΥΤΙΟΥ (Si)

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

ΑΓΓΕΛΟΥ ΚΑΝΕΛΛΟΥ ΤΟΥ ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ

Αριθμός Μητρώου: 1046818

Παρουσιάστηκε δημόσια στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

28/09/2023

και εξετάστηκε από την ακόλουθη εξεταστική επιτροπή:

Ελευθέριος Σκούρας, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τομέας Ηλεκτρονικής
και Υπολογιστών (επιβλέπων)

Αλέξιος Μπίρμπας, Καθηγητής, Τομέας Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών
(μέλος επιτροπής)

Ο Επιβλέπων

Ο Διευθυντής του Τομέα

Ελευθέριος Σκούρας
Αναπληρωτής Καθηγητής

Γεώργιος Θεοδωρίδης
Καθηγητής

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Είναι γνωστό ότι οι πρώτες ύλες πρέπει να χρησιμοποιούνται με φειδώ, προκειμένου να μη λείψουν από τις επερχόμενες γενιές. Η τεχνολογία εξελίσσεται και οι εφαρμογές της αποτελούν μέρος της ζωής μας όλο και περισσότερο, διευκολύνοντας την καθημερινότητά μας. Συνεπώς η ανάγκη για παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συνεχώς αυξάνεται, και γι' αυτό η ανθρωπότητα έχει ανάγκη να αξιοποιεί τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), που της προσφέρονται απλόχερα, σε συνδυασμό με τις πρώτες ύλες. Πολλές από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους παραγωγής ενέργειας συνδέονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Δεδομένης της ανησυχίας, αλλά και του ενδιαφέροντος των ανθρώπων για τη διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, η ορθή χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να αποτελέσει πιθανή λύση στα προβλήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει κοινοτική οδηγία να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές ρυπογόνες μορφές αλλά και από πυρηνικά εργοστάσια, και στοχεύει στη βαθμιαία αντικατάστασή τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επικεντρώνοντας στην αιολική ενέργεια και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή ή αλλιώς φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η μετατροπή μέρους της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική γίνεται με την απορρόφηση του φωτός από κατάλληλες διατάξεις όπως είναι τα ηλιακά κύτταρα. Τα ηλιακά κύτταρα είναι φωτοβολταϊκές διατάξεις που βασίζουν τη λειτουργία τους στις διόδους p-n, πρόκειται δηλαδή για διατάξεις ημιαγωγών. Το πυρίτιο (Si) είναι το στοιχείο που χρησιμοποιείται συχνότερα από τα υπόλοιπα για τη δημιουργία ημιαγωγών διότι είναι το δεύτερο πιο κοινό στοιχείο στη φύση- επομένως υπάρχει σε αφθονία-, παραμένει ημιαγωγός σε υψηλές θερμοκρασίες (δεν διαλύεται) και υφίσταται εύκολη επεξεργασία. Σχεδόν το 90% των φωτοβολταϊκών και ηλιακών πάνελ παγκοσμίως χρησιμοποιούν πυρίτιο. Για τα πειράματα που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Οι αρχές των ημιαγωγών που εξηγούνται στη συνέχεια μέσω του πυριτίου ισχύουν ωστόσο και για άλλους ημιαγωγούς όπως για παράδειγμα το γερμάνιο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ πολύ την οικογένειά μου που με βοήθησε ψυχικά αλλά και έμπρακτα να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία και κυρίως που με βοηθάει να προχωράω μπροστά στη ζωή μου.

Ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή μου, κύριο Ελευθέριο Σκούρα, για τη συμβολή του στην εργασία αυτή, τον οποίο συμπάθησα αμέσως μόλις γνώρισα και ήξερα ότι θα είχαμε πολύ καλή συνεργασία.

Είναι πολύ καλός επιστήμονας, και κυρίως ένας εξαίρετος άνθρωπος και αυτό μετράει περισσότερο στην επιστήμη.

Στην οικογένειά μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΣ ΦΙΛΙΚΕΣ ΩΜΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (Si)

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ:

Άγγελος Κανέλλος

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΟΣ:

Ελευθέριος Σκούρας

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται ωμικές συνδέσεις σε ηλιακά κύτταρα πυριτίου, κατά τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν περιβαλλοντικώς φιλικά υλικά αντικαθιστώντας επιβλαβείς ουσίες που χρησιμοποιούνται σήμερα από τις εταιρίες που κατασκευάζουν φωτοβολταϊκά συστήματα. Ύστερα γίνεται σύγκριση των μεγεθών που μετρήθηκαν με τα αντίστοιχα που παρουσιάζουν οι εταιρίες που κατασκευάζουν ηλιακά. Οι δημιουργία ωμικών συνδέσεων στα ηλιακά κύτταρα είναι απαραίτητη, προκειμένου να δημιουργηθεί κύκλωμα και να έχουμε τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει το ηλιακό κύτταρο.

Αρχικά γίνεται μια επιφανειακή παρουσίαση του ηλιακού κυττάρου σαν ηλεκτρονική διάταξη, δηλαδή εξηγείται η χημεία των ημιαγωγών -καθώς το μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού κυττάρου είναι ημιαγωγίμο υλικό- και πώς μπορούν να υποστούν επεξεργασία ώστε να είναι ικανοί να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ακόμα παρουσιάζονται, ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας για να γίνουν οι κολλήσεις και οι μετρήσεις, και τα περιβαλλοντικώς φιλικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για αυτές.

Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του τρόπου κατασκευής των φιλικών προς το περιβάλλον ωμικών συνδέσεων, με σχήματα, όπως αυτές έγιναν σε αυτή την εργασία.

Τέλος γίνεται παρουσίαση των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος τάσης και των κύριων χαρακτηριστικών μεγεθών που μετρήθηκαν ώστε να συγκριθούν με τα ηλιακά που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο σήμερα.

EXTENSIVE ENGLISH SUMMARY

ENVIRONMENTALLY FRIENDLY OHMIC CONTACTS AND CONNECTIONS OF Si SOLAR CELLS

STUDENT NAME, SURNAME:

Angelos Kanellos

SUPERVISOR NAME, SURNAME:

Eleftherios Skuras

In this work we present the fabrication of ohmic connections between flat copper wires, covered with a eutectic alloy friendly to the environment, with the bus bars of Si mono-crystalline Si solar cells. For the fabrication of the ohmic connections we use materials friendly to the environment instead of hazardous substances that are still used today by most companies that manufacture photovoltaic panels. Then there is a comparison of quantities that were measured with the corresponding ones that solar cell manufacturing companies present. The creation of ohmic contacts in solar cells is mandatory in order to have a circuit and flow of the electrical current the solar cell produces.

In the introduction we present a brief theory of a solar cell as an electronic device. The chemistry of semiconductors is explained and how semiconductors can be processed to form p-n junctions that they can convert solar to electric energy.

In the next two chapters we present the lab equipment we used for measuring the characteristic I-V curves of our solar cells along with the friendly to the environment materials that we used for fabricating their friendly to the environment ohmic connections.

In the fourth chapter we present a detailed description of each of the successive steps we used for the fabrication of our RoHS compliant ohmic connections.

Finally, in the fifth chapter we show the measurements of the characteristic current-voltage curves of the solar cells we recorded. Also, we show in tables of data the characteristic quantities we calculated such as the maximum power produced, the efficiency and the Fill Factor of our cells. Analysis of our measurements show that our cells are compared favorably to those with ohmic connections made with materials which are not compliant to the RoHS directive but are still used today by the photovoltaic industry.

Περιεχόμενα

1. Θεωρία Ηλιακών Κυττάρων.....	9
1.1 Ημιαγωγοί και Αγωγιμότητα.....	9
1.2 Ενδογενής Ημιαγωγός και Προσμείξεις Δοτών και Αποδεκτών.....	10
1.3 Ημιαγωγοί τύπου-n και τύπου-p.....	12
1.4 Επαφή Μετάλλου-Ημιαγωγού.....	12
1.5 Φωτοβολταϊκές Διατάξεις – Ηλιακά Κύτταρα	14
1.6 Η Φωτοβολταϊκή Μετατροπή.....	15
1.7 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ηλιακού Κυττάρου	15
1.8 Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσης ενός Ηλιακού Κυττάρου. Απόδοση και Παράγων Πλήρωσης	17
2. Εργαστηριακός Εξοπλισμός	19
2.1 Θερμαντική Εστία (Schott Stirring Hot Plate)	19
2.2 Σταθμός Συγκόλλησης (Weller WSD 50)	21
2.3 Source Measure Unit of Keithley (SMU 2611A).....	23
2.4 Αισθητήρας Μέτρησης της Έντασης της Ηλιακής Ακτινοβολίας (PCE -SPM 1)	25
3. Ωμικές Συνδέσεις Φιλικές προς το Περιβάλλον.....	27
3.1 Κατευθυντήριες Οδηγίες RoHS, Reach & WEEE	27
3.2 Περιβαλλοντικός Φιλική Ροή	30
3.3 Περιβαλλοντικός Φιλική Πάστα Συγκόλλησης.....	31
3.4 Περιβαλλοντικός Φιλικό Επίπεδοι Αγωγοί	33
3.5 Περιβαλλοντικός φιλικό σύρμα συγκόλλησης της Weller	34
3.6 Ηλιακά κύτταρα της γερμανικής εταιρείας Sunways με 3BB και ημιδιαφανή (semi-transparent).....	35
3.7 Αισθητήρες Μέτρησης Θερμοκρασίας.....	40
4. Κατασκευή Φιλικών προς το Περιβάλλον Ωμικών Συνδέσεων Ηλιακών Κυττάρων Πυριτίου	41
4.1 Διαδικασία Κατασκευής των Συνδέσεων.....	41
4.2 Τοποθέτηση Αισθητήρων στο Ηλιακό Κύτταρο	41

4.3 Προετοιμασία Θέρμανσης του Ηλιακού Κυττάρου	46
4.4 Θέρμανση Ηλιακού Κυττάρου	47
4.5 Τοποθέτηση Περιβαλλοντικώς Φιλικούς Ροής στο Ηλιακό Κύτταρο.....	51
4.6 Συγκόλληση των Ωμικών Επαφών στο Ηλιακό Κύτταρο.....	54
5. Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων	58
5.1 Γενικά Περί των Μετρήσεων	58
5.2 Ηλιακό Κύτταρο Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου 156mm x 156mm με 2 Bus Bars. Η ένταση του φυσικού ηλιακού φωτός κατά την διάρκεια καταγραφής της καμπύλης ήταν 1040W/m ²	59
5.3 Ηλιακό Κύτταρο Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου 156mm x 156mm με 2 Bus Bars. Η Ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας κατά την καταγραφή της καμπύλης ήταν 1030W/m ²	61
5.4 Ηλιακό Κύτταρο Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου 156mm x 156mm με 3 Bus Bars και Περιβαλλοντικώς Φιλικές Ωμικές Συνδέσεις υπό Μερική Σκίαση (Ένταση Ηλιακής Ακτινοβολίας 1040W/m ²)	63
Επίλογος	65

1. Θεωρία Ηλιακών Κυττάρων

1.1 Ημιαγωγοί και Αγωγιμότητα

- Στη γενική περίπτωση οι ημιαγωγοί δεν έχουν αγωγιμότητα -οι ημιαγωγοί είναι εν δυνάμει αγωγοί-

Σε ένα τέλειο κρύσταλλο πυριτίου, κάθε άτομο Si ενώνεται με τέσσερα γειτονικά του άτομα και σε κάθε ομοιοπολικό δεσμό υπάρχουν δύο ηλεκτρόνια που μοιράζονται από τα δύο άτομα και σχηματίζουν το δεσμό. Τα άτομα του κρυστάλλου εκτελούν ταλαντώσεις. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία παρατηρούμε ότι κάποια άτομα ταλαντώνονται με αρκετή ενέργεια ώστε να σπάσουν τους δεσμούς τους. Όταν συμβεί αυτό ένα ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται από το δεσμό του και μπορεί να κινείται ελεύθερα εντός του κρυστάλλου. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου το ελεύθερο πλέον ηλεκτρόνιο έχει τη δυνατότητα να ολισθαίνει και γι' αυτό ονομάζεται ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας. Η περιοχή από την οποία απομακρύνθηκε το ηλεκτρόνιο αυτό, και η οποία ήταν αρχικά ηλεκτρικά ουδέτερη, πλέον αποκτά συνολικό θετικό φορτίο. Η περιοχή με το σπασμένο δεσμό καλείται οπή (h^+). Ένα άλλο ηλεκτρόνιο από κάποιο γειτονικό δεσμό μπορεί, μέσω του φαινομένου σήραγγας, να κινηθεί και να αποκαταστήσει αυτό το δεσμό, αλλά με τη σειρά του, δημιουργεί μια οπή στη δική του αρχική θέση. Η μεταγωγή αυτή των δεσμών μετακινεί την οπή σε κατεύθυνση αντίθετη από το άλμα του ηλεκτρονίου. Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι με διαδοχικές μεταγωγές δεσμών οι οπές μπορούν και αυτές να μετακινούνται μέσα στον κρύσταλλο. Εφαρμόζοντας ένα ηλεκτρικό πεδίο τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και οι οπές συνεισφέρουν από κοινού στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για πρακτικούς λόγους θεωρούμε τις οπές ως ελεύθερα, θετικά φορτισμένα σωματίδια εντός του κρυστάλλου.

Εφαρμόζοντας ένα ηλεκτρικό πεδίο E , οι οπές κινούνται (ολισθαίνουν) προς την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου και συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα, ακριβώς όπως συνεισφέρουν και τα ηλεκτρόνια, που έχουν αποδεσμευτεί από κατεστραμμένους ομοιοπολικούς δεσμούς και κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αν οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και των οπών σε έναν ημιαγώγιμο κρύσταλλο είναι n και p αντίστοιχα και τα ηλεκτρόνια και οι οπές έχουν ευκινήσιες αγωγιμότητας μ_e και μ_h τότε η συνολική αγωγιμότητα του κρυστάλλου δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\sigma = ep\mu_h + en\mu_e$$

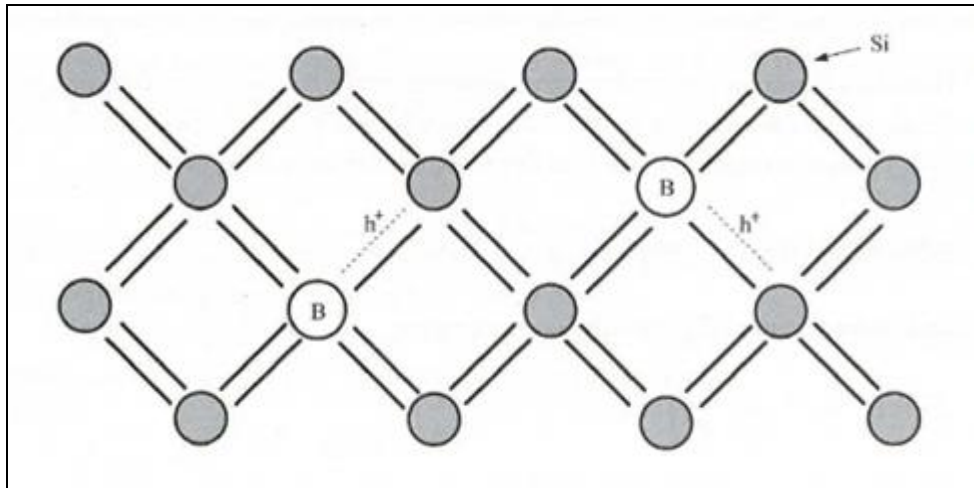
όπου e το φορτίο του ηλεκτρονίου.

1.2 Ενδογενής Ημιαγωγός και Προσμίξεις Δοτών και Αποδεκτών

Ο όρος ενδογενής ημιαγωγός (ενδογενές πυρίτιο) αναφέρεται σε έναν ιδανικό, θεωρητικά τέλειο κρύσταλλο ημιαγωγού (πυριτίου) ο οποίος δεν περιέχει προσμίξεις ή κρυσταλλικές ατέλειες. Μπορούμε να δημιουργήσουμε οπές ή ηλεκτρόνια αγωγιμότητας νοθεύοντας έναν ενδογενή ημιαγωγό με άτομα προσμίξεων, δηλαδή αντικαθιστώντας ορισμένα άτομα Si με άτομα προσμίξεων (**προσδίδοντας αγωγιμότητα στον ημιαγωγό**). Οι προσμίξεις μπορούν να εισαχθούν κατά την ανάπτυξη του μονοκρυστάλλου, ή κατά τα επόμενα κατασκευαστικά στάδια, με διάχυση προσμίξεων ή με εμφύτευση ιόντων ατόμων δοτών (Donors), ή αποδεκτών (Acceptors). Οι δότες και οι αποδέκτες είναι στοιχεία που έχουν διαφορά σθένους 1 σε σχέση με τα βασικά άτομα του κρυστάλλου. Έτσι για το τετρασθενές πυρίτιο (Si), ο πεντασθενής φώσφορος (P) είναι δότης, ενώ το τρισθενές βόριο (B) είναι αποδέκτης. Για να είναι πετυχημένη η ηθελημένη εισαγωγή δοτών ή αποδεκτών θα πρέπει να έχουν τις ίδιες περίπου ατομικές διαστάσεις με το άτομο του μητρικού κρυστάλλου που αντικαθιστούν για να μην διαταράσσεται το περιοδικό δυναμικό του ημιαγωγού που τις φιλοξενεί, και να καταλαμβάνουν πλεγματικές θέσεις στον κρύσταλλο.

Τα άτομα των δοτών (για παράδειγμα φώσφορος, αρσενικό) προσφέρουν τα τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους τους για να σχηματισθούν τέσσερις ομοιοπολικοί δεσμοί με τα τέσσερα γειτονικά άτομα Si. Με τη σύνδεση αυτή το επιπλέον ηλεκτρόνιο του πεντασθενούς δότου, για παράδειγμα φωσφόρου, μένει ασυνόδευτο. Το ηλεκτρόνιο αυτό είναι χαλαρά συνδεδεμένο με το μητρικό άτομο φωσφόρου με δυνάμεις Coulomb. Η ενέργεια που απαιτείται για να αποδεσμευθεί το παραπάνω ηλεκτρόνιο από το άτομο του φωσφόρου είναι πολύ μικρή, και μόλις ελευθερωθεί εισέρχεται στη ζώνη αγωγιμότητας.

Για την περίπτωση των δεκτών (έστω βόριο B), το άτομο του βορίου χρησιμοποιεί τα τρία ηλεκτρόνια σθένους, για να σχηματίσει τους τρεις πλησιέστερους ομοιοπολικούς δεσμούς. Το τέταρτο ηλεκτρόνιο που απαιτείται για να συμπληρωθεί η τοπική γεωμετρική κατασκευή δεσμών, δεν μπορεί να προσφερθεί από το άτομο του βορίου, μπορεί όμως να χορηγηθεί από ένα γειτονικό άτομο πυριτίου. Ο ατελής δεσμός Si (οπή) είναι τώρα ελεύθερος να κινείται εντός του κρυσταλλικού στερεού, συνεισφέροντας στην αγωγιμότητα.



Σχήμα 1.1: Η κατανομή των ηλεκτρονίων σθένους σε τρισθενές άτομο βορίου (B) που έχει αντικαταστήσει άτομο πυριτίου (Si) του μονοκρυστάλλου, οδηγεί στη δημιουργία οπών. [1]

1.3 Ημιαγωγοί τύπου-n και τύπου-p

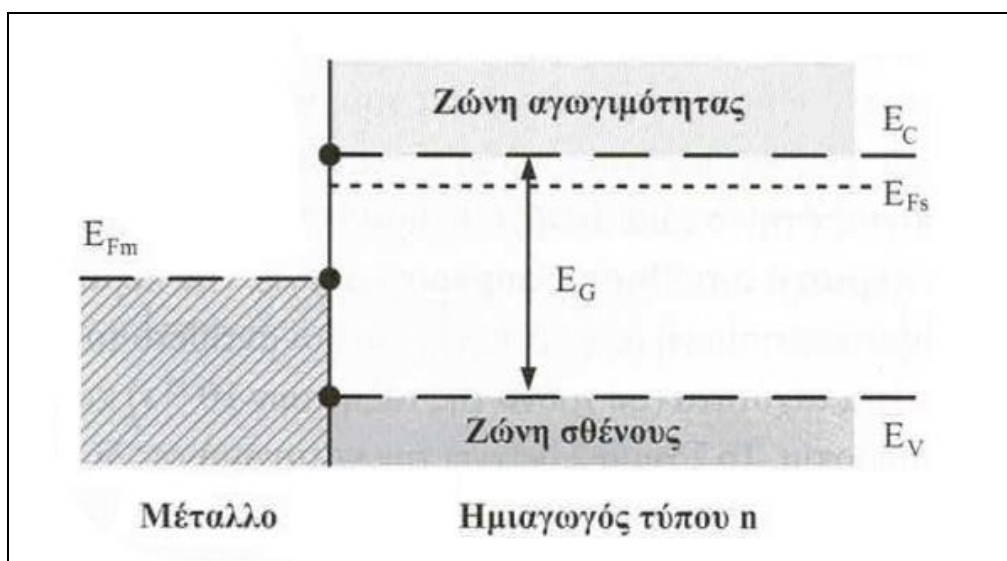
Σε έναν ημιαγωγό μπορούμε να έχουμε και τα δύο είδη προσμείξεων. Ημιαγωγοί για τους οποίους το πλήθος των δοτών είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλήθος των δεκτών ($N_D \gg N_A$) εμφανίζουν αγωγιμότητα που κυριαρχείται από ολίσθηση ηλεκτρονίων, τα οποία καλούνται φορείς πλειονότητας. Ωστόσο, πάντα θα υπάρχει μία μικρή σχετικά συγκέντρωση οπών οι οποίες θα προέρχονται από ενδογενείς διεργασίες στο υλικό όπως θερμικές ή οπτικές διεγέρσεις. Οι οπές εφόσον είναι πολύ λιγότερες από τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας καλούνται φορείς μειονότητας. Ένας ημιαγωγός, στον οποίο η αγωγή ηλεκτρισμού οφείλεται κυρίως στην κίνηση ηλεκτρονίων, χαρακτηρίζεται ως ημιαγωγός τύπου-n (n-type semiconductor).

Αν αντίστοιχα σε έναν ημιαγωγό έχουμε $N_D \ll N_A$, τότε τα ηλεκτρόνια είναι οι φορείς μειονότητας και οι οπές είναι οι φορείς πλειονότητας. Σε αυτό τον ημιαγωγό η αγωγή του ηλεκτρισμού οφείλεται κυρίως στην κίνηση των οπών και γι' αυτό χαρακτηρίζεται ως ημιαγωγός τύπου-p (p-type semiconductor).

Φορείς αγωγιμότητας, δηλαδή ηλεκτρόνια και οπές, μπορούν επίσης να δημιουργηθούν από εισαγωγή μη ηθελημένων προσμείξεων κατά την σύνθεση του ημιαγωγού ή από διάφορες ατέλειες του κρυστάλλου, χωρίς δηλαδή να έχουμε ηθελημένη νόθευση του.

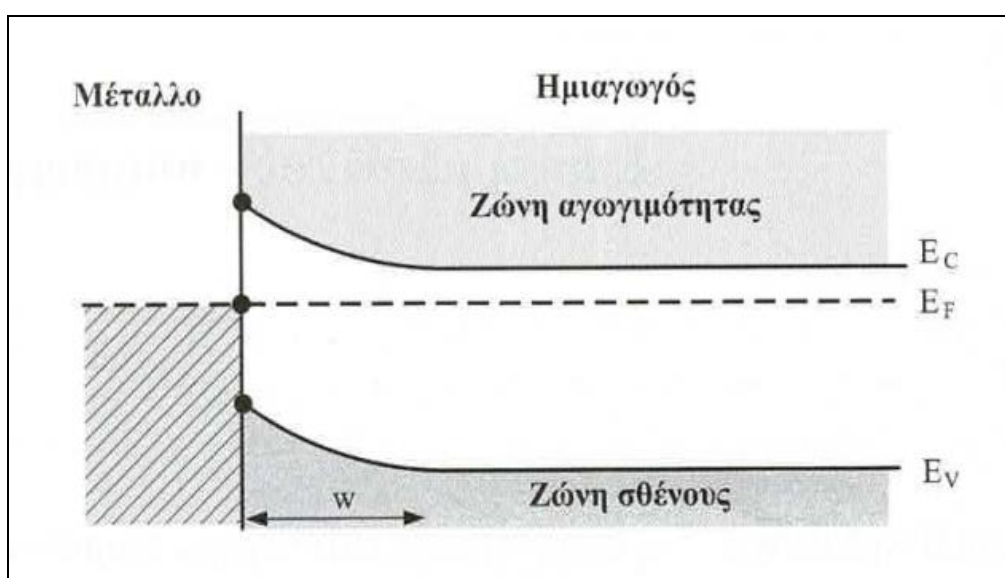
1.4 Επαφή Μετάλλου-Ημιαγωγού

Το σχήμα 1.2 δείχνει τις χαρακτηριστικές ενεργειακές στάθμες για τα δύο υλικά (μέταλλο – ημιαγωγός) πριν την μεταξύ τους επαφή και την αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας του συστήματος.



Σχήμα 1.2: Ενεργειακές στάθμες Fermi, μετάλλου και ημιαγωγού τύπου n, πριν από την αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας στην περιοχή της επαφής. [1]

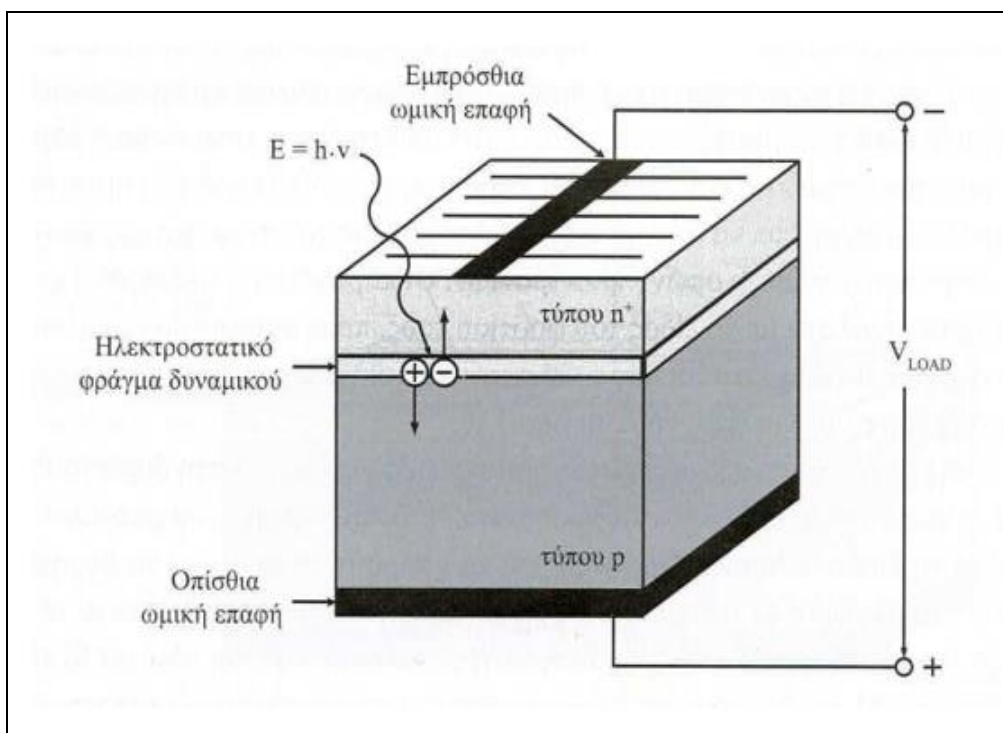
Οι στάθμες Fermi στα μέταλλα βρίσκονται κατά κανόνα χαμηλότερα από τη στάθμη Fermi ενός ημιαγωγού τύπου n. Μετά την ηλεκτρική επαφή μεταξύ των δύο υλικών, γίνεται ταχύτατη μεταφορά ηλεκτρονίων από το υλικό που έχει την υψηλότερη στάθμη Fermi προς το υλικό που έχει τη χαμηλότερη στάθμη (στην περίπτωσή μας το μέταλλο). Τα ηλεκτρόνια που μεταβαίνουν στο μέταλλο προσκολλώνται στην επιφάνειά του, δημιουργώντας ένα στρώμα αρνητικού φορτίου Q_m , αφήνοντας πίσω στον ημιαγωγό μια περιοχή κενή από ελεύθερα ηλεκτρόνια, στην οποία υπάρχουν μόνο θετικά φορτισμένα ιόντα δοτών. Η περιοχή αυτή του ημιαγωγού τύπου-n ονομάζεται περιοχή απώθησης φορέων και είναι θετικά φορτισμένη με φορτίο Q_s , ίσο και αντίθετο του Q_m . Η παραπάνω διαδικασία συμβαίνει ταχύτατα και αποκαθίσταται η θερμοδυναμική ισορροπία όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3, κατά τη διάρκεια της οποίας το σύστημα των ηλεκτρονίων πρέπει να χαρακτηρίζεται από μία σταθερή και οριζόντια στάθμη Fermi.



Σχήμα 1.3: Κατανομή για τη δυναμική ενέργεια των ηλεκτρονίων στην περιοχή της επαφής μετάλλου – ημιαγωγού τύπου n, μετά την αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας. [1]

1.5 Φωτοβολταϊκές Διατάξεις – Ηλιακά Κύτταρα

Στις φωτοβολταϊκές διατάξεις (π.χ. ηλιακά κύτταρα) που βασίζουν τις λειτουργίες τους σε διόδους p-n τα φωτόνια απορροφώνται μέσα ή γύρω από την περιοχή της επαφής p-n και σχηματίζουν ζεύγη ηλεκτρονίων–οπών, τα οποία διαχωρίζονται από το ηλεκτροστατικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια μετακινούνται προς τον ημιαγωγό τύπου n, ενώ οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Οι ηλεκτρικοί φορείς που δημιουργούνται κατευθύνονται προς τα εξωτερικά ηλεκτρόδια μέσω των ωμικών επαφών. Η ωμική επαφή της άνω όψης έχει μεγάλα ανοίγματα, ώστε να επιτρέπει στο φως να απορροφάται απευθείας από τον ημιαγωγό. Στους ακροδέκτες του εξωτερικού κυκλώματος εμφανίζεται τάση V_{LOAD} , που μπορεί να τροφοδοτήσει κάποιο ηλεκτρικό φορτίο. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (Si), που περιλαμβάνουν στο εσωτερικό τους τη δίοδο p-n, δέχονται τα φωτόνια από την μεριά του ημιαγωγού τύπου n. Έτσι διασφαλίζεται μεγαλύτερη απόδοση για τη μετατροπή ενέργειας. Το συνολικό ενεργό εύρος της διάταξης στο οποίο συμβαίνει αποτελεσματικά η οπτοηλεκτρική μετατροπή, περιλαμβάνει το μήκος w του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού της επαφής p-n, συμπεριλαμβανομένων των μηκών διάχυσης των φορέων μειονότητας L_n και L_p για τους ημιαγωγούς τύπου n και τύπου p αντίστοιχα. Για τη δίοδο p-n το ρεύμα εξαρτάται από τους φορείς μειονότητας που υπάρχουν στους ημιαγωγούς τύπου p και τύπου n αντίστοιχα.



Σχήμα 1.4: Η τυπική γεωμετρία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου που βασίζει τη λειτουργία του στη δίοδο επαφής p-n. [1]

Το ενεργειακό διάκενο είναι η διαφορά μεταξύ του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας E_C και της κορυφής της ζώνης σθένους E_V , δηλαδή $E_G = E_C - E_V$. Εντός του ενεργειακού διακένου δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού

φορτίου, διότι δεν προβλέπονται ηλεκτρόνια σε αυτές τις τιμές ενέργειας από τις λύσεις της εξίσωσης Schrödinger. Η τιμή του ενεργειακού διακένου αντιστοιχεί στην ενέργεια του ομοιοπολικού χημικού δεσμού που συνδέει τα άτομα του ημιαγωγού μεταξύ τους (1,1 eV για το πυρίτιο).

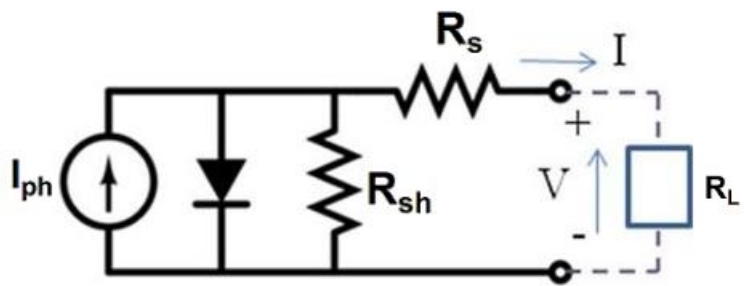
1.6 Η Φωτοβολταϊκή Μετατροπή

Τα φωτόνια ενέργειας $E=h*\nu$ προσπίπτουν στον ημιαγωγό τύπου n. Η ενεργός περιοχή για να λάβει μέρος η φωτοβολταϊκή μετατροπή, ή αλλιώς το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, αναπτύσσεται αρχικά στο στενό τμήμα που βρίσκεται το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού και εκτείνεται σε όλο το εύρος των $w + L_n + L_p$, όπου L_n και L_p αντίστοιχα είναι τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας των ημιαγωγών τύπου n και τύπου p.

Η αλληλεπίδραση των φωτονίων με την διάταξη θα γίνεται κυρίως μέσω των δεσμευμένων ηλεκτρονίων στη ζώνη σθένους, των ηλεκτρονίων δηλαδή που συμβάλλουν στους χημικούς δεσμούς που συγκρατούν τα άτομα πυριτίου (Si) μεταξύ τους. Αν η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, τότε το φωτόνιο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους που βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Το ηλεκτρόνιο διεγείρεται προς τη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω ένα κενό ηλεκτρονίου δηλαδή μία οπή. Με την πρόσπτωση λοιπόν πολλών φωτονίων δημιουργούνται ταυτόχρονα ζεύγη οπών (στη ζώνη σθένους) και ηλεκτρονίων (στη ζώνη αγωγιμότητας) σε όλο το εύρος της επαφής p-n συμπεριλαμβανομένου και του ηλεκτροστατικού φράγματος. Έτσι έχουμε τη δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου στο ηλιακό και κατά συνέπεια με την κατάλληλη τοποθέτηση ηλεκτροδίων την παραγωγή ρεύματος.

1.7 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ηλιακού Κυττάρου

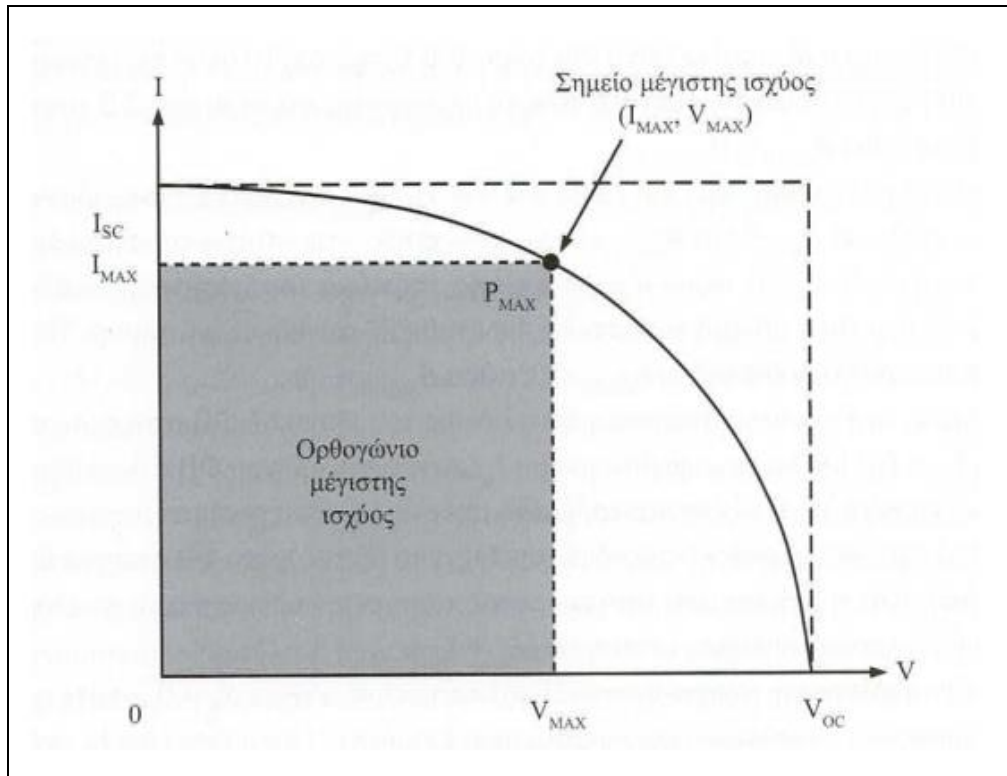
Στο σχήμα 1.5 απεικονίζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου (μη ιδανική φωτιζόμενη δίοδος p-n). Το κύκλωμα περιλαμβάνει την πηγή που παράγει το φωτόρευμα, I_{ph} , παράλληλα με μια ιδανική δίοδο. Μέρος του φωτορεύματος ρέει μέσω της διόδου, ώστε να διατηρείται το δυναμικό στα άκρα της διόδου, που αναλογεί στο σημείο λειτουργίας, ενώ το υπόλοιπο ρεύμα ρέει προς την αντίσταση φορτίου. Η μη ιδανική συνιστώσα της διόδου εκφράζεται μέσω της παράλληλης αντίστασης διαρροής ($R_{sh} = R_{shunt}$). Η παράλληλη αντίσταση αυτή αποδίδει τους πρόσθετους μηχανισμούς μεταφοράς ηλεκτρικών φορέων εκατέρωθεν του φράγματος, και καθίσταται σημαντική κυρίως στην ανάστροφη πόλωση. Ακόμα, το υπόστρωμα και οι ωμικές επαφές εισάγουν την αντίσταση σειράς R_s , η οποία καθίσταται σημαντική κατά την ορθή πόλωση.



Σχήμα 1.5: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού κυττάρου.

Για ένα ιδανικό ηλιακό κύτταρο ισχύει ότι $R_s \rightarrow 0$ και $R_{sh} \rightarrow \infty$.

1.8 Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσης ενός Ηλιακού Κυττάρου. Απόδοση και Παράγων Πλήρωσης



Σχήμα 1.6: Χαρακτηριστική καμπύλη I - V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. [1]

Ρεύμα Βραχυκύκλωσης (I_{sc}): Βραχυκυκλώνοντας τους ακροδέκτες του ηλιακού κυττάρου, δηλαδή για μηδενική τάση εξόδου ($V=0$), αναλογεί η μέγιστη δυνατή τιμή ρεύματος που ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc}): Όταν οι ακροδέκτες εξόδου του ηλιακού κυττάρου ανοιχτοκυκλωθούν, τότε η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου μεγιστοποιείται.

Παρεχόμενη ισχύς (P): Για συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού, το σκιασμένο εμβαδόν της καμπύλης εκφράζει την ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να παρέχεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο προς το ηλεκτρικό φορτίο R_L με το οποίο συνδέεται.

Μέγιστη Παροχή Ισχύος (P_{max}): Για τις διάφορες τιμές της αντίστασης φορτίου R_L , οι τιμές λειτουργίας για την τιμή ρεύματος θα κυμαίνονται από I_{sc} έως 0, ενώ αντίστοιχα για την τάση θα μεταβάλλονται από 0 έως V_{oc} αντίστοιχα. Τα δυνατά ζεύγη τιμών ρεύματος-τάσεως μεταβάλλουν το εμβαδόν του ορθογωνίου της

καμπύλης $I-V$ ηλιακού κυττάρου όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6 -το οποίο ουσιαστικά είναι το γινόμενο ρεύματος-τάσης ($I-V$). Υπάρχει συνεπώς ζεύγος τιμών I_{max} , V_{max} , για το οποίο η παρεχόμενη ισχύς μεγιστοποιείται (P_{max}) (βλ. σχήμα).

Απόδοση (η): Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου αντικατοπτρίζει το ποσοστό της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας που το ηλιακό κύτταρο μπορεί να μετατρέψει σε ηλεκτρική ισχύ. Είναι δηλαδή ο λόγος της προστιδόμενης ισχύος προς την ισχύ εισόδου. Το εύρος απόδοσης των ηλιακών κυττάρων συνήθως κυμαίνεται από 11% έως 15%. Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

όπου P_{in} η ισχύς εισόδου.

Παράγων πλήρωσης ($F.F.$): Δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$Fill\ Factor\ (FF) = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}}$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο παράγων πλήρωσης τόσο μεγαλύτερη η απόδοση του ηλιακού κυττάρου.

2. Εργαστηριακός Εξοπλισμός

2.1 Θερμαντική Εστία (Schott Stirring Hot Plate)



Σχήμα 2.1: Schott Stirring Hot Plate

Description

Glass-ceramic top-plate provides efficient heat transfer. Stirring action and heat level are controlled separately with individual control knobs. A visual indicator warns users that the heating surface is still hot—even after the unit is turned off. This stirring hot plate features a range of 100 to 1100 rpm and is adjustable in increments of 10 rpm.

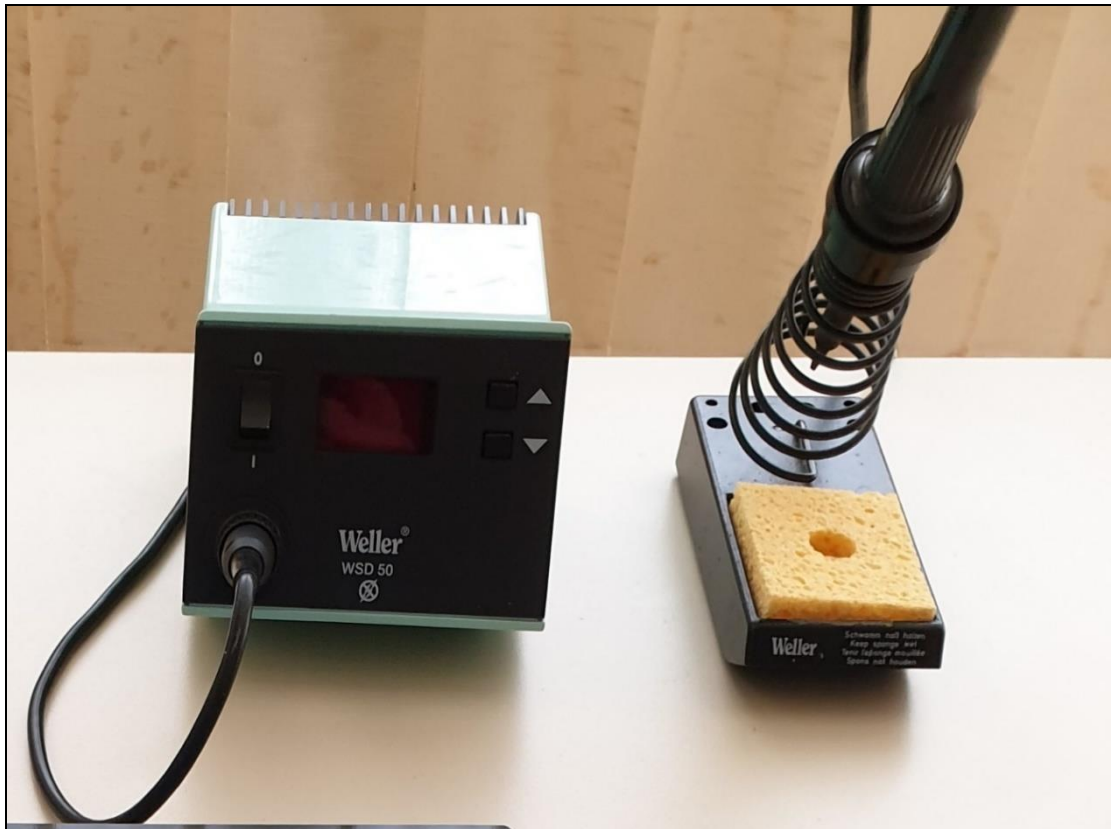
The heating range is from 65⁰ to 555°C and can be set in 24 increments across that range. For more precise temperature control a Pt1000 temperature sensor is used. This sensor allows you to control temperature fluctuations as small as 2 to 5°C. With the sensor attached, the display alternates between the set temperature and the actual temperature in six second intervals. 230 VAC models include a 6-½-ft cord with European standard plug.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Top Plate Length (cm) :	23.5
Top Plate Width (cm) :	23.5
Top Plate Material :	Glass Ceramic
MinTemperature (° C) :	65
MaxTemperature (° C) :	555
Low Speed (rpm) :	100
High Speed (rpm) :	1100
Number Of Stirring Positions :	1
Minimum Operating Temperature (° C) :	10
Maximum Operating Temperature (° C) :	40
Length (cm) :	36.83
Width (cm) :	24.1
Height (cm) :	8.46

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Hot Plate and Magnetic Stirrer της Schott

2.2 Σταθμός Συγκόλλησης (Weller WSD 50)



Σχήμα 2.2: Weller WSD 50

Περιγραφή

Ο Σταθμός Συγκόλλησης χρησιμοποιείται για την ένωση διαφορετικών τύπων μετάλλων μεταξύ τους τήκοντας κράμα μετάλλου -για παράδειγμα κασσίτερου και μόλυβδου- προκειμένου να δημιουργηθούν ισχυροί ηλεκτρικοί δεσμοί. Αποτελείται από τη μονάδα ελέγχου, την ακίδα συγκόλλησης (soldering tip), τη βάση της ακίδας, και το καθαριστικό της ακίδας συγκόλλησης. Στην ακίδα αναπτύσσεται η θερμοκρασία που επιλέγεται από τη μονάδα ελέγχου και χρησιμοποιείται για την τήξη του κράματος μετάλλου. Μεταξύ των χρήσεων, η ακίδα καθαρίζεται σε βρεγμένο καθαριστικό σφουγγάρι.

Weller WSD 50

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Dimensions in mm:	166x155x101 (l x w x h)
Supply voltage (7):	230 V / 50 Hz (115 V / 60 Hz for dual-voltage Version)
Power input:	WSD 50: 55 Watts
Class:	1 (control unit) and 3 (soldering iron)
Fuse (8):	WSD 50: T315mA
Temp. control:	50 °C - 450 °C
Precision:	+/- 2% from target value
Equipotential bonding (10):	Via a 3.5 mm jack bush on the back of unit (initial state - hard-grounded)

Πίνακας 2.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Weller WSD 50

2.3 Source Measure Unit of Keithley (SMU 2611A)



Σχήμα 2.3: Source Measure Unit of Keithley (SMU 2611A) (Μπροστινή όψη)



Σχήμα 2.4: Η πίσω όψη του Source Measure Unit (SMU 2611A) της Keithley

2.4 Αισθητήρας Μέτρησης της Έντασης της Ηλιακής Ακτινοβολίας (PCE-SPM 1)



Σχήμα 2.5: Αισθητήρας Μέτρησης της Έντασης της Ηλιακής Ακτινοβολίας (PCE-SPM 1). Η μέτρηση έγινε έξω από το εργαστήριο στο οποίο έγιναν οι κολλήσεις των ωμικών συνδέσεων, 1024 W/m^2 .

Περιγραφή

Το PCE-SPM 1 είναι μετρητής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, πολύ σημαντικού μεγέθους για τα ηλιακά κύτταρα. Το όργανο μετράει την ένταση του φωτός χρησιμοποιώντας κρύσταλλο πυριτίου. Ο ενσωματωμένος στο μετρητή επεξεργαστής είναι υπεύθυνος να κάνει αυτόματες διορθώσεις για να διασφαλίσει την ακρίβεια μετά τη βαθμονόμηση της συσκευής στον ηλιακό προσομοιωτή.

Environmental Meter PCE-SPM 1

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Measuring range	0 ... 2000 W/m ²
Resolution	1 W/m ²
Accuracy	±10 W/m ² or ±5 % (the higher value applies)
Spectral range	400 ... 1100 nm
Data memory	32,000 measured values
Measuring rate	adjustable
Data transmission	serial RS232 interface
Display	LCD
Ambient temperature range	0 ... +50 °C / 32 ... 122 °F
Max. humidity	<80 % RH
Power supply	4 x 1.5 V AAA Li-ion battery (for ca. 16 days of continuous use)
Dimensions	111 x 64 x 34 mm / 4.37 x 2.52 x 1.34"
Weight	165 g / 5.8 oz

Πίνακας 2.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Environmental Meter PCE-SPM 1

3. Ωμικές Συνδέσεις Φιλικές προς το Περιβάλλον

3.1 Κατευθυντήριες Οδηγίες RoHS, Reach & WEEE

Εταιρίες και βιομηχανίες που κατασκευάζουν εξοπλισμό ή καταναλωτικά υλικά και κατά τη βιομηχανική τους παραγωγή χρησιμοποιούν επιβλαβή υλικά καλούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω των παρακάτω κατευθυντήριων οδηγιών να συμμορφώνονται με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.

RoHS

“Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances”

Η συμμόρφωση με την οδηγία RoHS της ΕΕ απαιτεί από τους κατασκευαστές να παρακολουθούν της ποσότητες κάθε περιορισμένης ουσίας στα τελικά προϊόντα τους, να διατηρούν αρχεία και να ελέγχονται όπως απαιτείται από τις κρατικές υπηρεσίες.

Παρακάτω φαίνονται ουσίες που υπόκεινται σε περιορισμό, και η μέγιστη ανεκτή συγκέντρωση κατά βάρος ομοιογενούς υλικού για το καθένα από αυτά.

Μόλυβδος (0,1 %)
Υδράργυρος (0,1 %)
Κάδμιο (0,01 %)
Εξασθενές χρώμιο (0,1 %)
Πολυβρωμοδιφαινύλια (PBB) (0,1 %)
Πολυβρωμοδιφαιθυλαίθρες (PBDE) (0,1 %)

Πίνακας 3.1 : Ουσίες που υπόκεινται σε περιορισμό (RoHS)

Reach

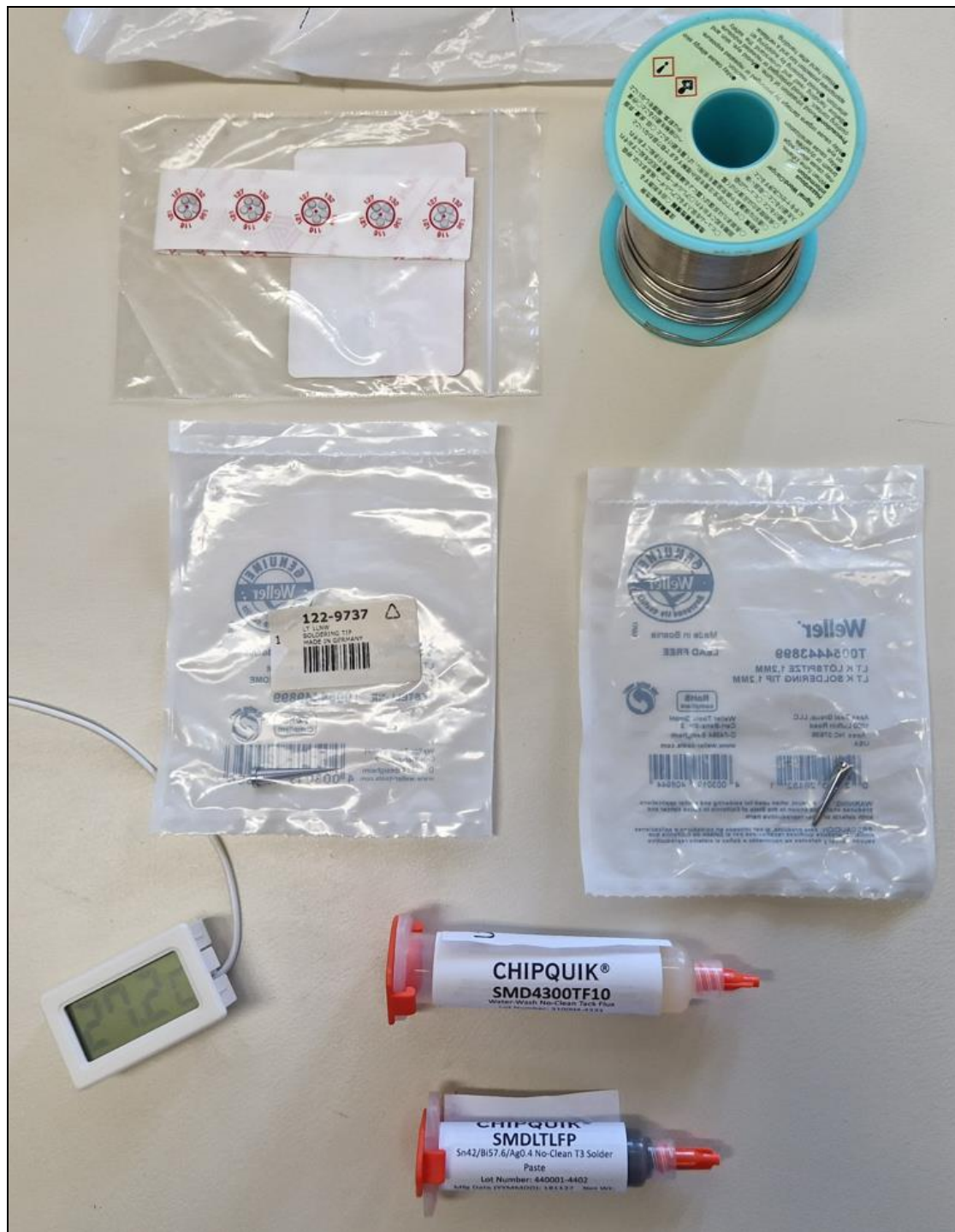
Πρόκειται για μια διαδικασία την οποία διαχειρίζεται και επιβλέπει ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Χημικών Προϊόντων (ECHA) στο Ελσίνκι της Φινλανδίας. Το πρακτορείο είναι επίσης υπεύθυνο για τη διατήρηση μιας δημόσιας βάσης δεδομένων με πληροφορίες ασφάλειας για όλες τις καταχωρημένες ουσίες.

Εταιρείες που κατασκευάζουν, εισάγουν ή προμηθεύουν προϊόντα με ουσίες σε ποσότητες ενός τόνου ή περισσότερου ετησίως απαιτείται να εγγραφούν στον ECHA. Η εγγραφή περιλαμβάνει την προετοιμασία ενός τεχνικού φάκελο και αναφορά χημικής ασφάλειας.

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Χημικών Προϊόντων μαζί με αρμόδιες αρχές των κρατών μελών αξιολογούν όλες τις καταχωρημένες ουσίες και φακέλους για πιθανούς κινδύνους.

Χημικά που περιέχουν ουσίες υψηλής ανησυχία (SVHC), όπως π.χ Τερεφθαλικό πολυβουτυλένιο (PBT), καθώς ουσίες που είναι πολύ ανθεκτικές και βιοσυσσωρευτικές (vPvBs) ή που προσδιορίζονται ως επικίνδυνες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, υπόκεινται σε εξουσιοδότηση. Οι εταιρείες υποχρεούνται να υποβάλουν σχέδια για αντικατάσταση ουσιών SVHC με ασφαλέστερες εναλλακτικές λύσεις.

Χημικές ουσίες που θέτουν ανεξέλεγκτους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον μπορεί να περιοριστούν από την ΕΕ.



Σχήμα 3.1: Εργαστηριακός Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις Κολλήσεις των Ωμικών Συνδέσεων και τις Μετρήσεις των Θερμοκρασιών και των Χαρακτηριστικών Καμπυλών που είναι συμβατά κατά RoHS.

3.2 Περιβαλλοντικώς Φιλική Ροή



Σχήμα 3.2: CircuitWorks No-Clean Tacky Flux

Περιγραφή

Η ροή CircuitWorks No-Clean Tacky Flux (που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία) είναι μια σύνθεση τύπου ROL0 σχεδιασμένη για επανεπεξεργασία BGA που απαιτεί υψηλή αξιοπιστία, σταθερότητα και καθαριότητα. Η σύνθεση της γέλης CircuitWorks No-Clean Tacky Flux κρατά το εξάρτημα BGA στη θέση του ακόμα και με κίνηση της πλακέτας. Είναι ελαφρά κολλώδης που επιτρέπει την εύκολη εφαρμογή και δεν περιέχει ιοντικό υλικό. Η ροή αυτή είναι συμβατή με τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ηλεκτρονικών. Όπως και με οποιοδήποτε καθαριστικό, θα πρέπει να ελέγχεται αν υπάρχει συμβατότητα υλικού σε μη κρίσιμη περιοχή πριν από τη χρήση.

Typical Product Data and Physical Properties	
Flux Type:	No-Clean ROL0
Flash Point (TCC):	>284°F (140°C)
Appearance:	Light tan to dark brown
Odor:	Slight
Shelflife	2 years
RoHS Compliant	Yes

3.3 Περιβαλλοντικώς Φιλική Πάστα Συγκόλλησης

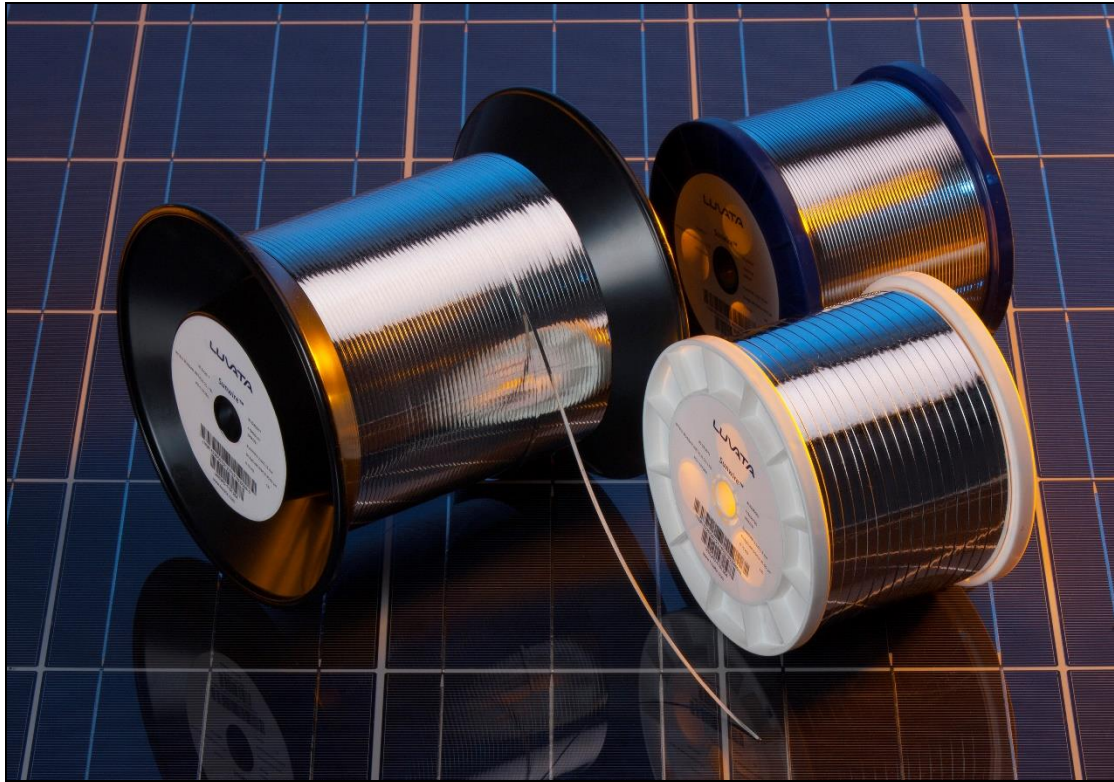


Σχήμα 3.3: CHIPQUIK SMDTLFP Sn42/Bi7.6/Ag0.4 No-Clean T3 Solder Paste

Specifications	
Alloy:	Sn42/Bi57.6/Ag0.4
Mesh Size:	T3
Micron (μm) Range:	25-45
Flux Type:	Synthetic No-Clean
Flux Classification:	RELO
Metal Load:	87% Metal by Weight
Melting Point:	138°C (281°F)

Packaging:	5cc/15g Syringe
Shelf Life:	Refrigerated >6 months, Unrefrigerated >2 months

3.4 Περιβαλλοντικώς Φιλικοί Επίπεδοι Αγωγοί



Σχήμα 3.4: Επίπεδοι Αγωγοί Luvata Sunwire

Περιγραφή

Πρόκειται για μια αγώγιμη, επίπεδη και ευλύγιστη ταινία χαλκού υψηλής καθαρότητας και χωρίς γρέζια που δημιουργήθηκε για να ενώνει ηλιακά κύτταρα χωρίς να τα σπάει. Η εταιρία παρέχει επιστρώσεις της ταινίας χωρίς μόλυβδο συμβατές με RoHS. Ο μαλακός χαλκός της Sunwire έχει αντοχή πολύ κάτω από 60 N/mm² σε κανονική παραγωγή, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει λιγότερη πίεση στο ηλιακό κύτταρο κατά τη συγκόλληση -επομένως η θραύση του κυττάρου είναι πολύ λιγότερο πιθανή.

3.5 Περιβαλλοντικώς φιλικό σύρμα συγκόλλησης της Weller



Το περιβαλλοντικώς φιλικό σύρμα που χρησιμοποιήθηκε για τις κολλήσεις αυτής της εργασίας είναι το Weller-Solder Wire WSW SAC L0. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες και η χημική σύνθεση του.

Σχήμα 3.5:Weller-Solder Wire WSW SAC L0.

Solidus °C	Liquidus °C	Specific Gravity
217	221	7.4

Πίνακας 3.2: Φυσικές ιδιότητες σύρματος.

Composition	Main components		
	Sn	Ag	Cu
Standard	Rest	3.0	5.0

Πίνακας 3.3: Χημική σύνθεση σύρματος.

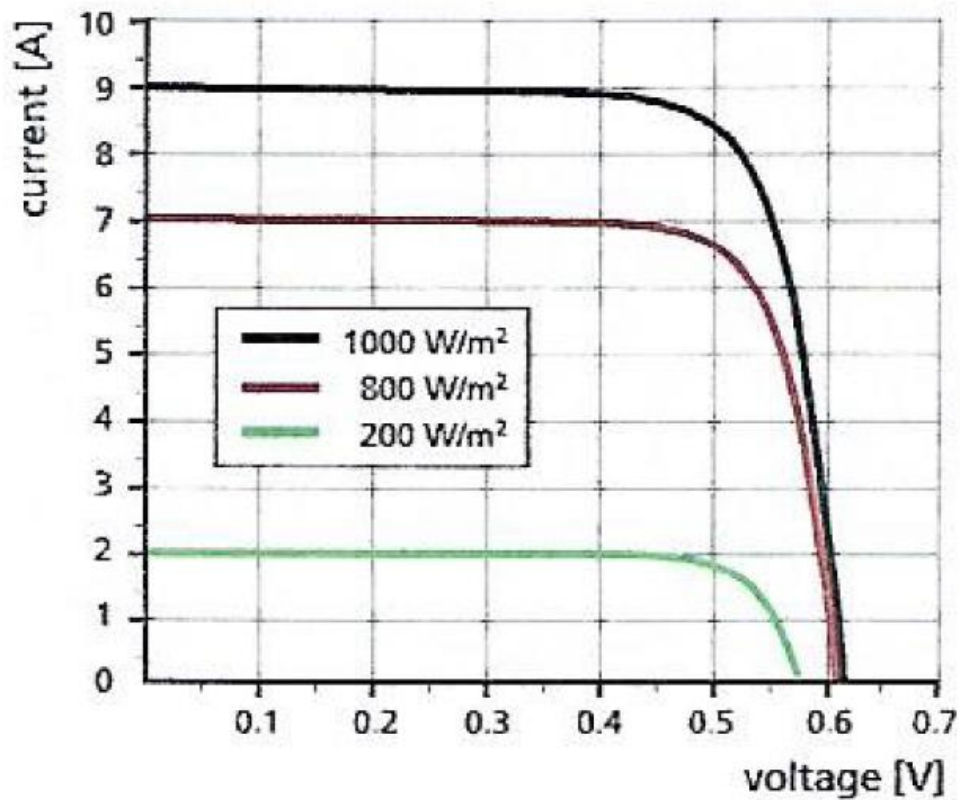
Οι ακίδες για τον βραχίονα συγκόλλησης του σταθμού συγκόλλησης επίσης συμμορφώνονται στις οδηγίες RoHS.

3.6 Ηλιακά κύτταρα της γερμανικής εταιρείας Sunways με 3BB και ημιδιαφανή (semi-transparent)



Σχήμα 3.6: Ηλιακό Κύτταρο της Sunways με 3BB.

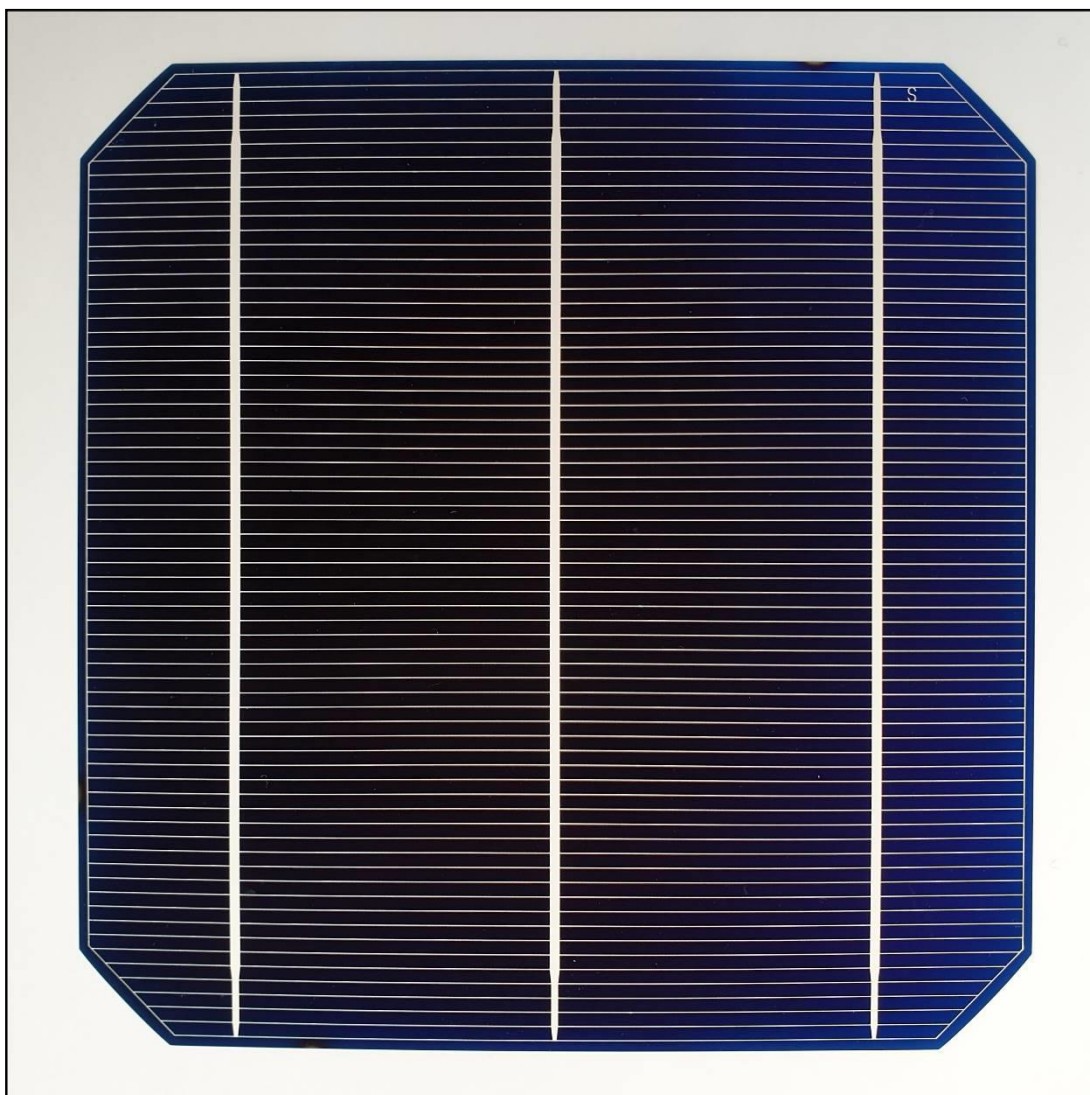
IV curves



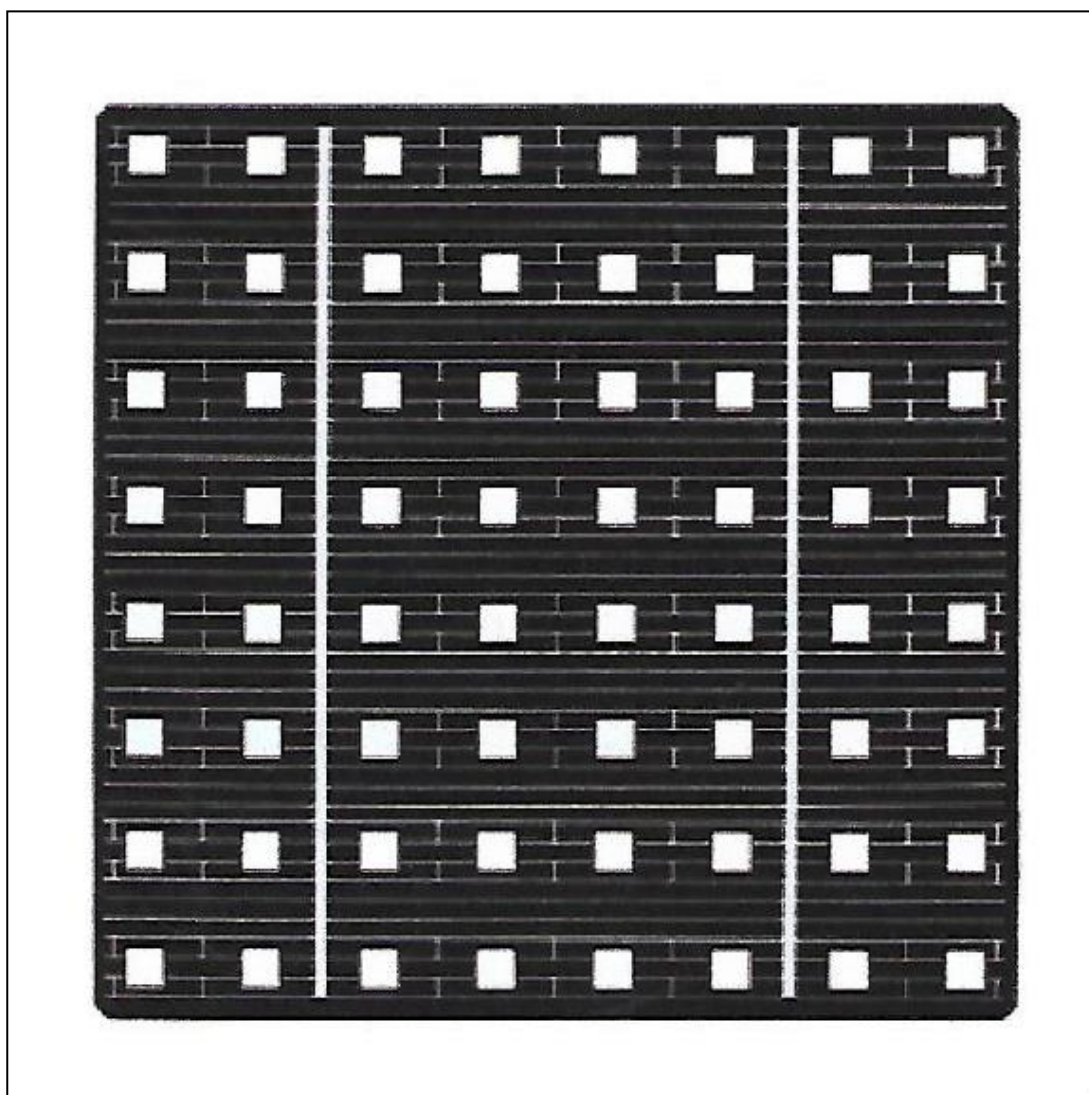
Σχήμα 3.7: Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V για διαφορετικές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Electrical key data						
Current class acc. to I (V _{RX})	Efficiency rate [%]	Power at V _{RX} [W]	I (V _{RX} = 525 mV) [A]	Fill factor [%]	V _{OC} [mV]	I _{SC} [A]
AH508680H	19,1	4,55	8,68	78,8	638	9,07
AH508630H	19,0	4,53	8,63	78,7	637	9,05
AH508580H	18,8	4,50	8,58	78,5	636	9,03
AH508530H	18,7	4,48	8,53	78,4	635	9,01
AH508480H	18,6	4,45	8,48	78,2	634	8,99
AH508430H	18,5	4,42	8,43	77,9	633	8,99

All figures are averages (Fill factor, V_{OC} and I_{SC} are preliminary), all figures +/- 3 %. Cell class measurement at V_{RX} = 525 mV.



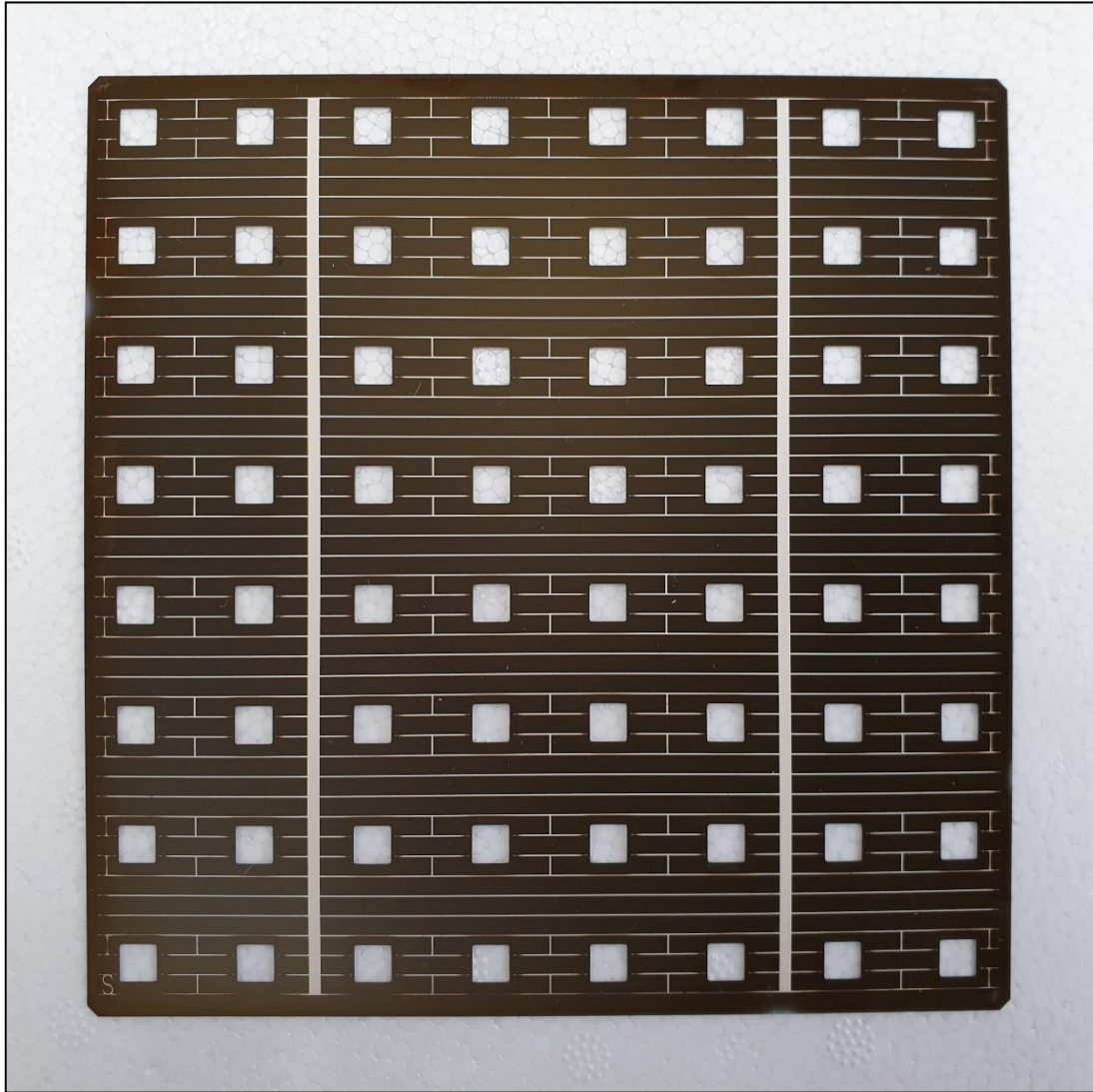
Σχήμα 3.8: Ηλιακό Κύτταρο της Sunways με 3BB που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία.



Σχήμα 3.9: Ημιδιαφανές Ηλιακό Κύτταρο της Sunways με 2BB.

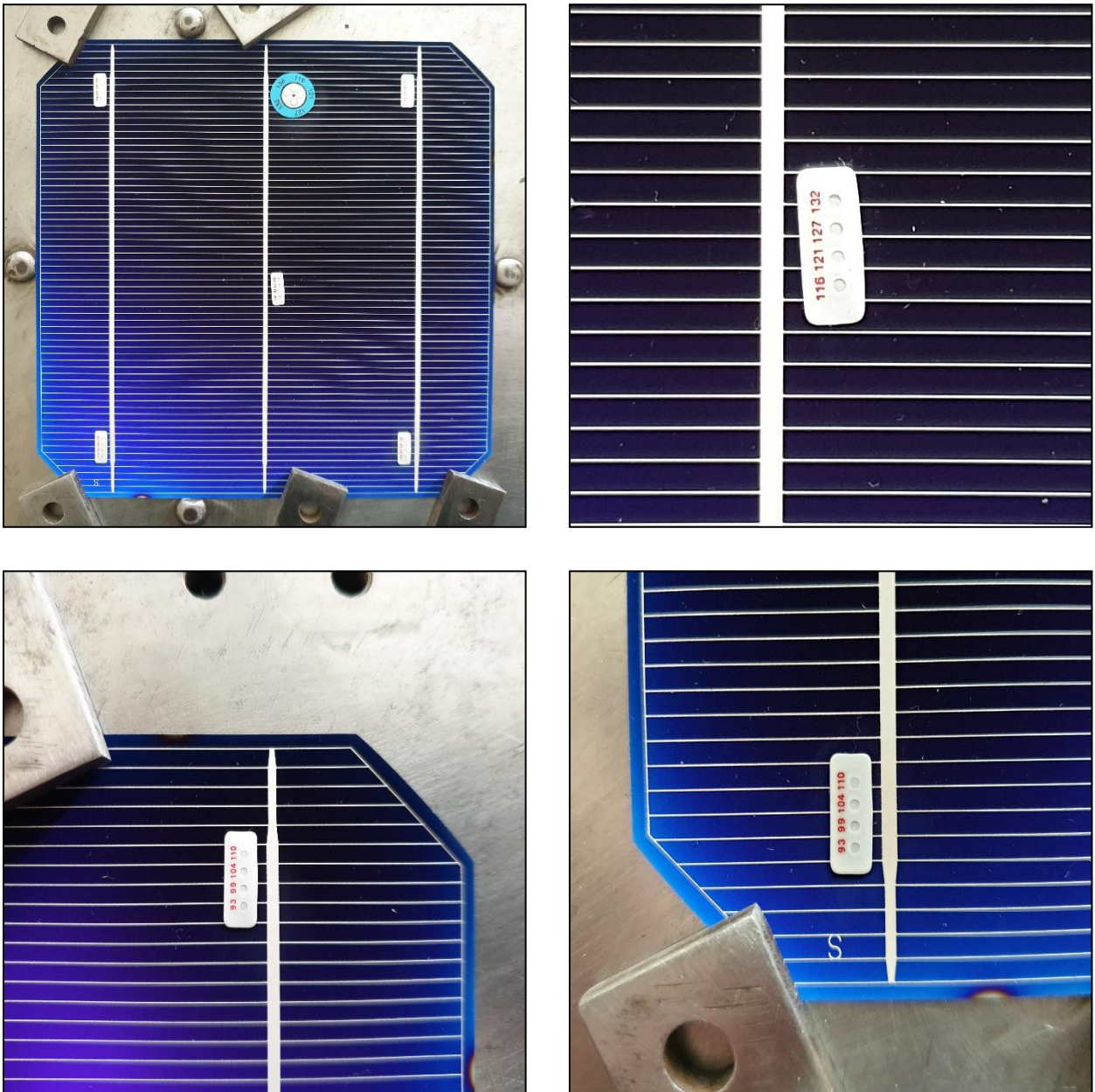
Electrical key data						
Current class as per I (V _{FIX})	Efficiency [%]	Output at V _{FIX} [W]	I (V _{FIX} = 490 mV) [A]	Fill factor [%]	V _{OC} [mV]	I _{SC} [A]
AH814400	13,7	2,14	4,37	74,6	603	4,76
AH814300	13,4	2,10	4,28	74,2	600	4,71
AH814200	13,2	2,06	4,20	73,5	598	4,68
AH814100	12,9	2,01	4,11	72,5	596	4,66
AH814000	12,6	1,96	4,01	71,4	595	4,64
AH813900	12,3	1,92	3,91	69,6	594	4,64

All figures are averages, all figures +/- 3 %. Cell class measurement at V_{FIX} = 490 mV.



Σχήμα 3.10: Ημιδιαφανές Ηλιακό Κύτταρο της Sunways με 2BB που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία.

3.7 Αισθητήρες Μέτρησης Θερμοκρασίας



Σχήμα 3.11: Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας.

Αισθητήρες θερμοκρασίας μη αναστρέψιμοι - με μικρό εμβαδόν και μικρή δαπάνη αγοράς για την μέτρηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των κυττάρων κατά την διαδικασία της θέρμανσής τους πριν την συγκόλληση των ωμικών συνδέσεων. (Irreversible temperature sensors)

4. Κατασκευή Φιλικών προς το Περιβάλλον Ωμικών Συνδέσεων Ηλιακών Κυττάρων Πυριτίου

4.1 Διαδικασία Κατασκευής των Συνδέσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα βήματα για τη δημιουργία των ωμικών συνδέσεων, δηλαδή την κόλληση των επίπεδων αγωγών με τις ράβδους συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος (bus bars) του ηλιακού κυττάρου.

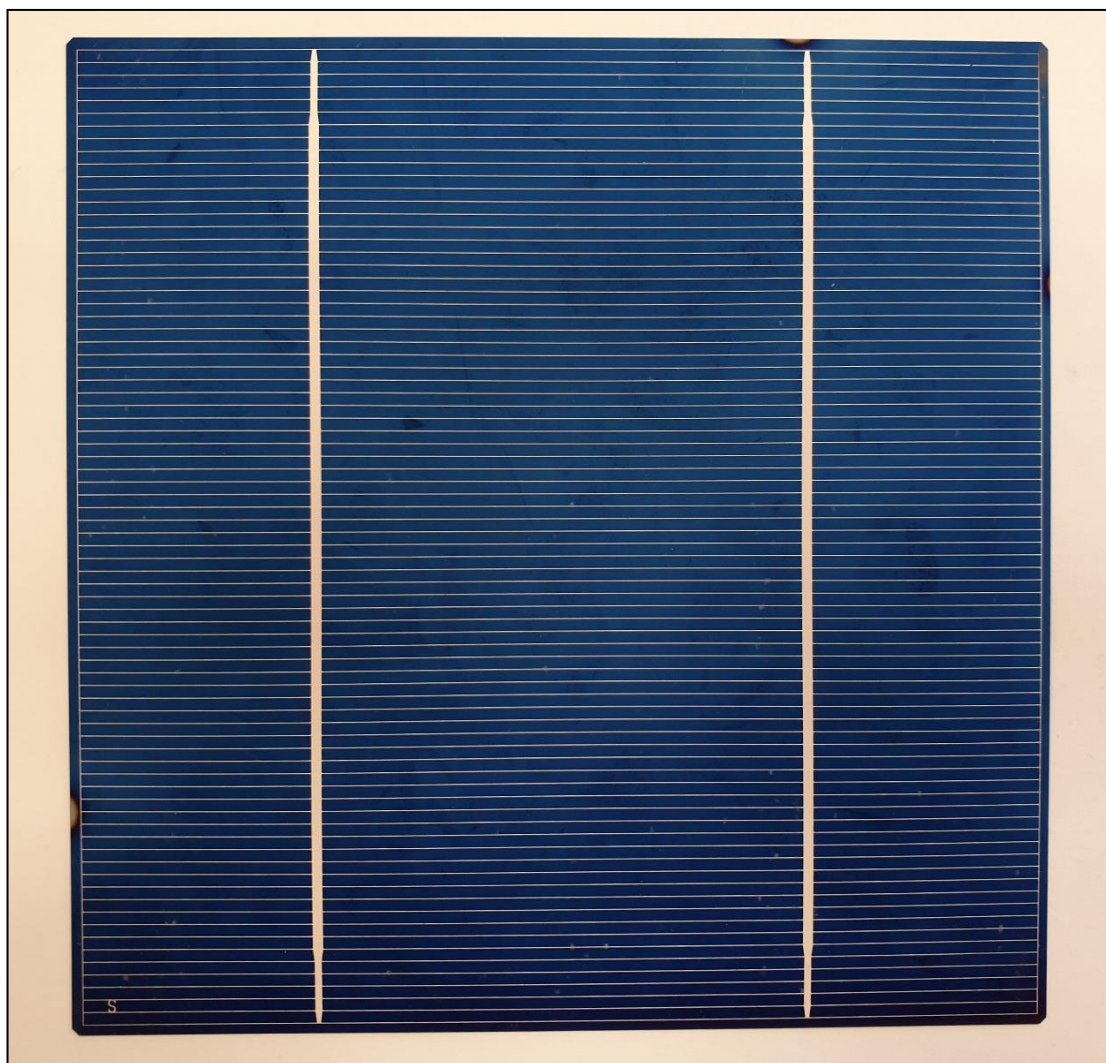
Αυτή γίνεται με τη σταδιακή θέρμανση του ηλιακού κυττάρου, προκειμένου να μην υπάρξουν μικρορωγμές -microcracks- στο ηλιακό κύτταρο -στα πλαίσια αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες για την παρακολούθηση της αύξησης της θερμοκρασίας του ηλιακού κυττάρου-, κατόπιν γίνεται προετοιμασία των επίπεδων αγωγών, δηλαδή απομακρύνουμε πιθανές οξειδώσεις τους, και στη συνέχεια γίνονται οι συγκολλήσεις μέσω του σταθμού συγκόλλησης. Τέλος αφήνουμε το ηλιακό κύτταρο να επανέλθει σταδιακά -όπως αντίστοιχα έγινε και στη θέρμανση του- στην αρχική του θερμοκρασία προκειμένου να μην υπάρξουν μικρορωγμές. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται πιο αναλυτικά στις παρακάτω ενότητες.

4.2 Τοποθέτηση Αισθητήρων στο Ηλιακό Κύτταρο

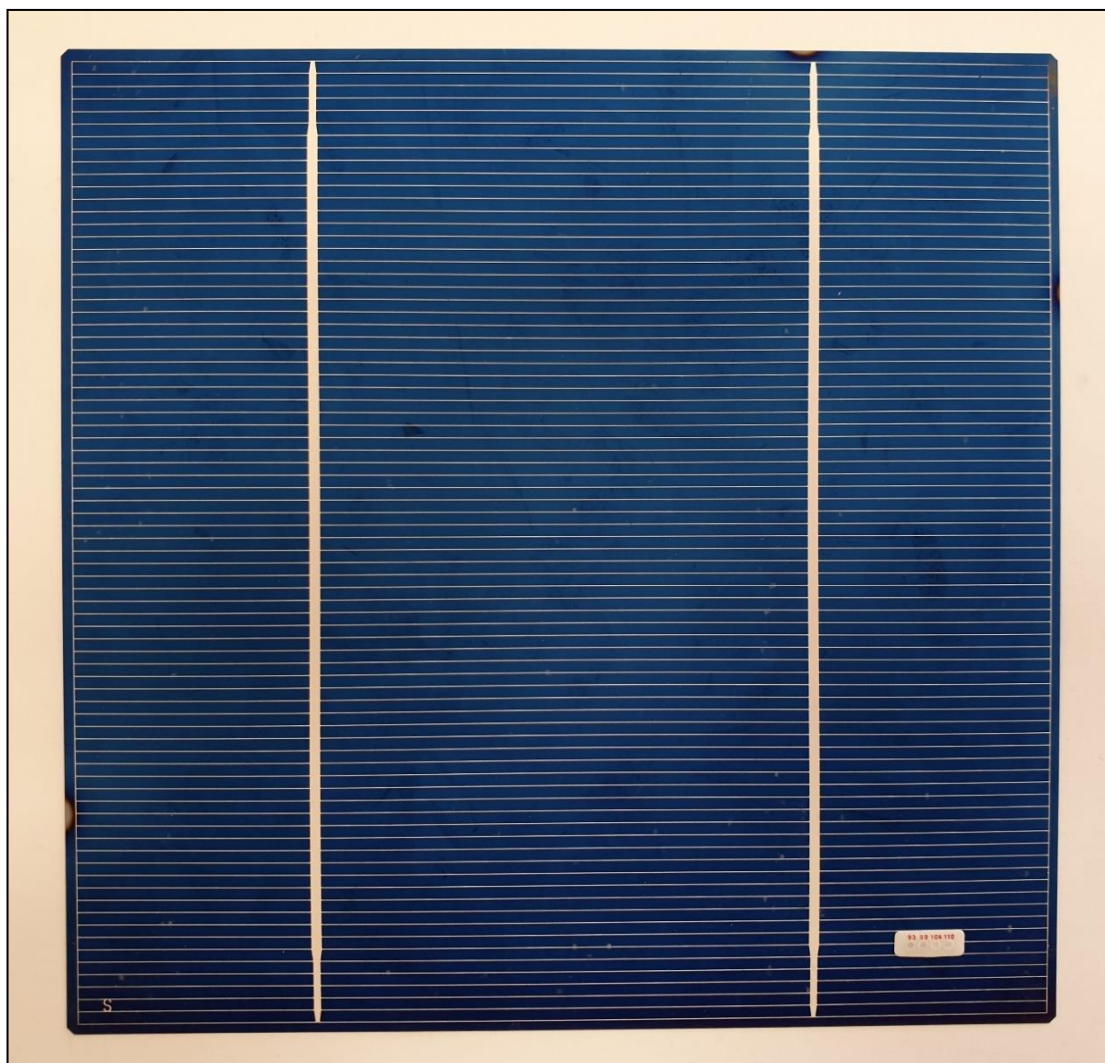
Στην ενότητα αυτή γίνεται η τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας στην επιφάνεια ηλιακού κυττάρου διαστάσεων 156x156 τετραγωνικών χιλιοστών (156x156 mm²) με δύο ράβδους συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος. Η τοποθέτηση των αισθητήρων στην επιφάνεια δηλαδή σε δύο διαστάσεις για την μελέτη της επιφανειακής κατανομής της θερμοκρασίας κατά το στάδιο αύξησής της που προηγείται της κατασκευής των ωμικών συνδέσεων των επίπεδων αγωγών με τις ράβδους συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις στην επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου -στο κέντρο και την περιφέρειά του- ώστε να παρέχεται όσο το δυνατόν καλύτερη εικόνα για τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτό κατά το στάδιο της θέρμανσης του. Οι αισθητήρες επιλέγονται να έχουν μικρό εμβαδόν -σε σχέση με το συνολικό εμβαδόν του κυττάρου- προκειμένου υπάρχει όσο το δυνατό λιγότερη σκίαση της επιφάνειας του ηλιακού, ώστε να μη μειώνεται το ποσό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Το εύρος των θερμοκρασιών που μπορούν να μετρήσουν οι αισθητήρες κυμαίνεται από 93°C έως 138°C.

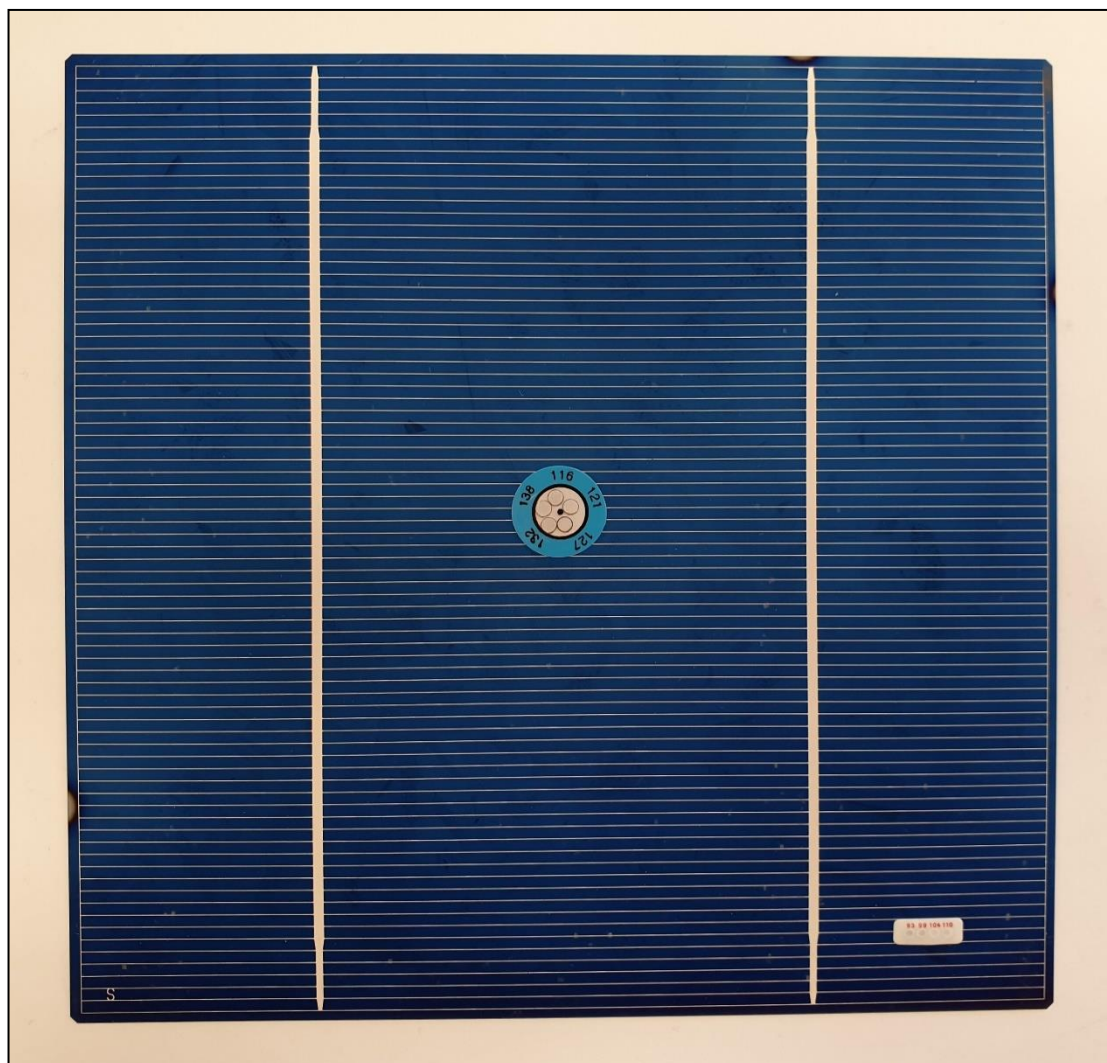
Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε τη διαδοχική τοποθέτηση των αισθητήρων τεσσάρων-θερμοκρασιών σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου και αισθητήρων πέντε-θερμοκρασιών σε σχήμα κύκλου στο ηλιακό κύτταρο.



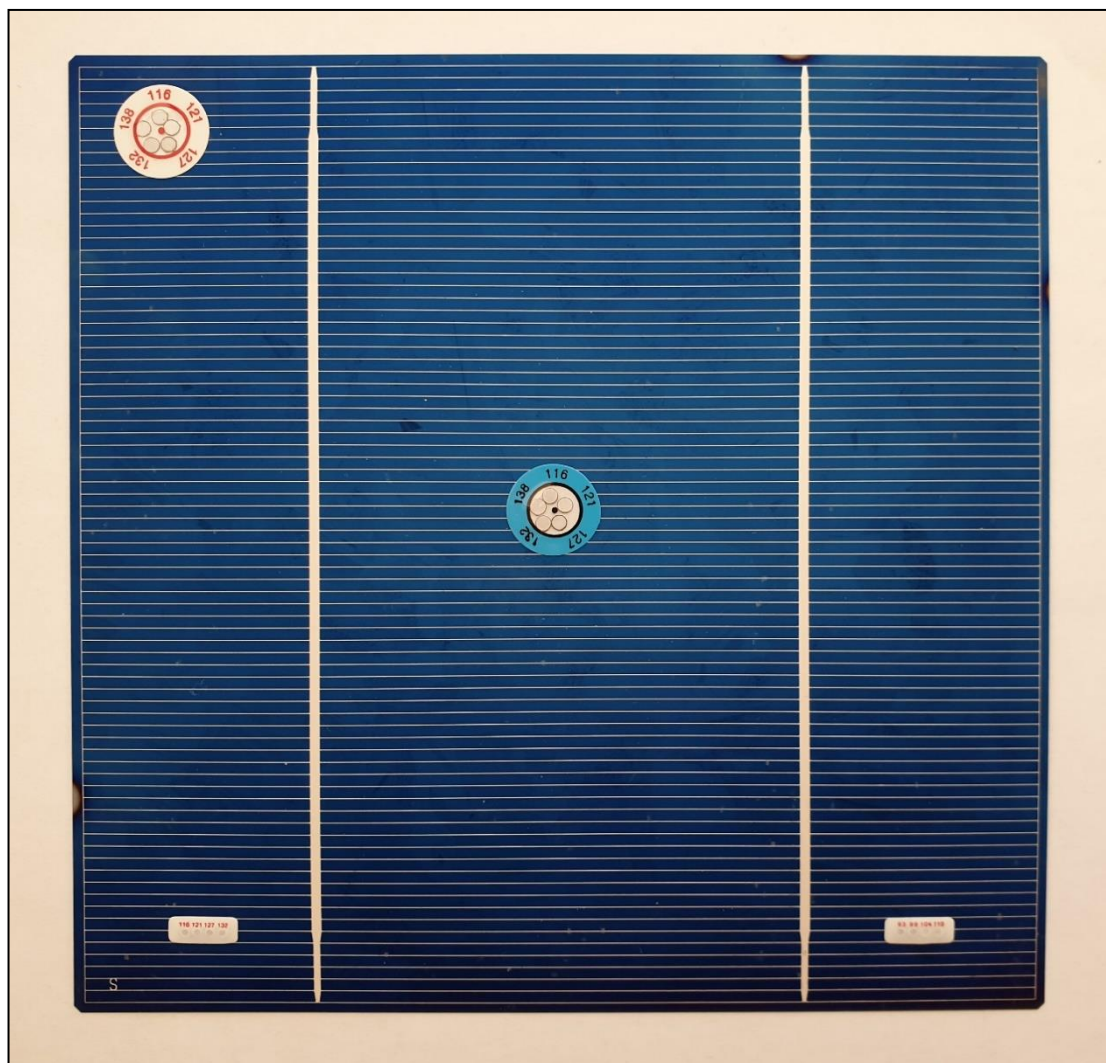
Σχήμα 4.1: Ηλιακό Κύτταρο με δύο ράβδους συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος και διαστάσεις 156x156 mm².



Σχήμα 4.2: Τοποθέτηση αισθητήρα πέντε θερμοκρασιών (από 93°C έως 110°C) στο κάτω δεξιό άκρο του ηλιακού κυττάρου.



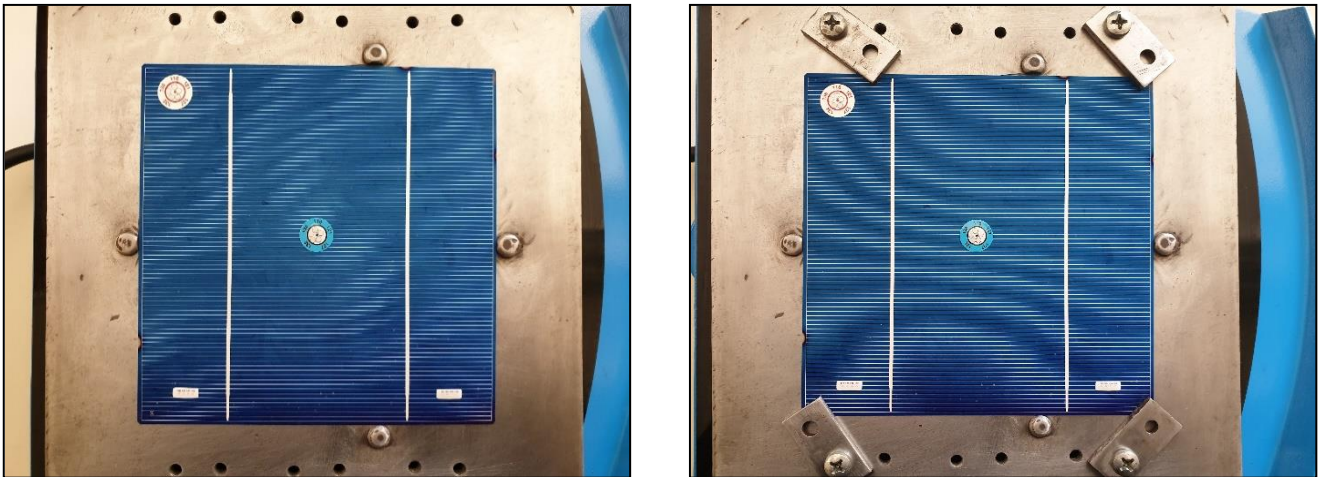
Σχήμα 4.3: Τοποθέτηση αισθητήρα πέντε θερμοκρασιών (από 116°C έως 138°C) στο κέντρο του ηλιακού κυττάρου.



Σχήμα 4.4: Τοποθέτηση αισθητήρων πέντε θερμοκρασιών από 116°C έως 132°C στο κάτω αριστερό άκρο, και από 116°C έως 138°C στο πάνω αριστερό άκρο του ηλιακού κυττάρου.

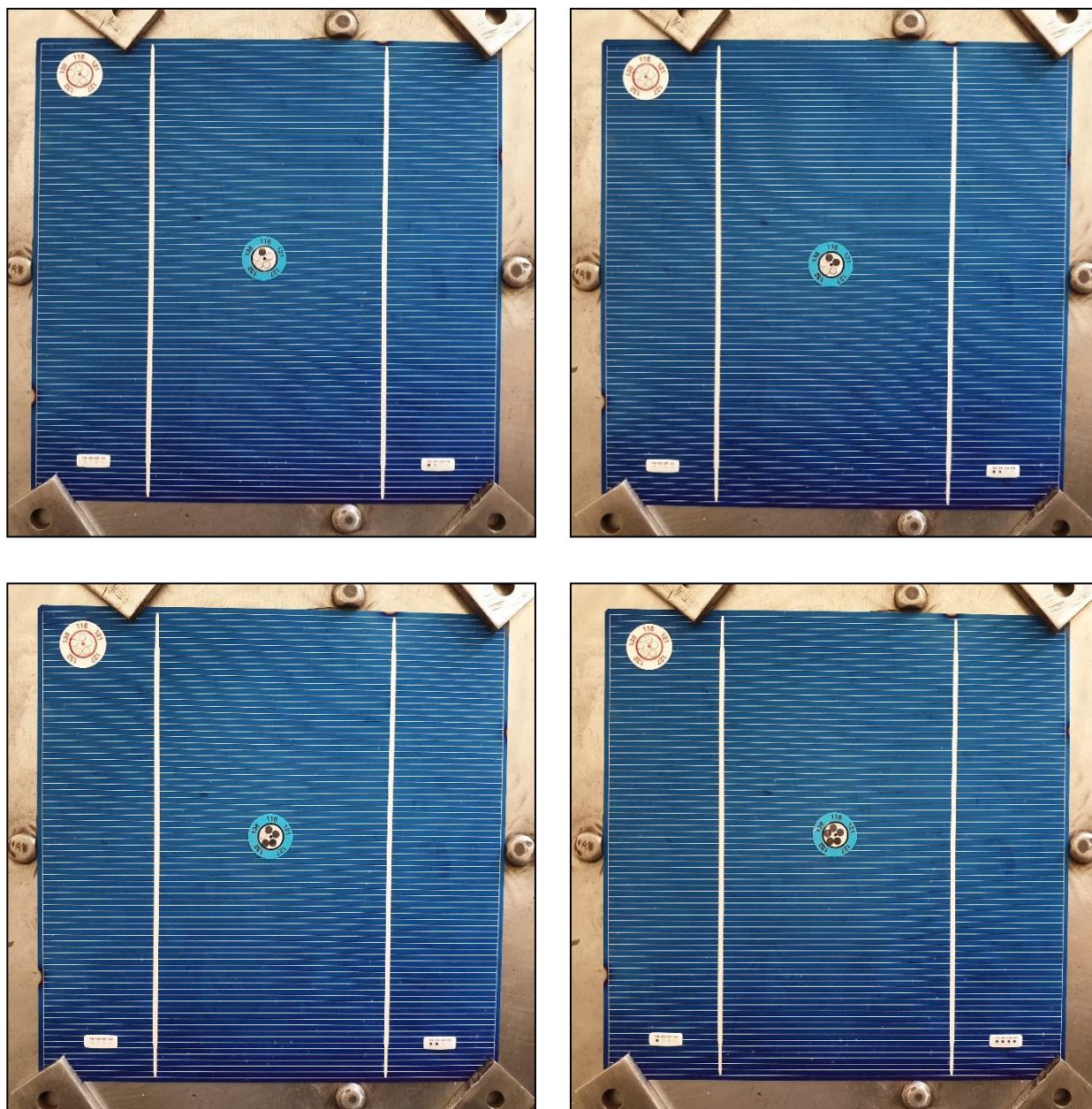
4.3 Προετοιμασία Θέρμανσης του Ηλιακού Κυττάρου

Μετά την ολοκλήρωση της κατανομής των αισθητήρων της θερμοκρασίας στο ηλιακό κύτταρο δύο ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος τοποθετείται το κύτταρο στο κέντρο επίπεδης μεταλλικής βάσης μεταξύ τεσσάρων μεταλλικών πίων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Το ηλιακό κύτταρο κρατείται σταθερό με τέσσερις επίπεδες μεταλλικές κλάπες (flat metal clamps). Κατόπιν η βάση τοποθετείται στην θερμαινόμενη επιφάνεια ενός thermal plate της γερμανικής εταιρείας Schott για να αρχίσει η σταδιακή θέρμανση του ηλιακού κυττάρου έως την θερμοκρασία συγκόλλησης των ωμικών συνδέσεων.



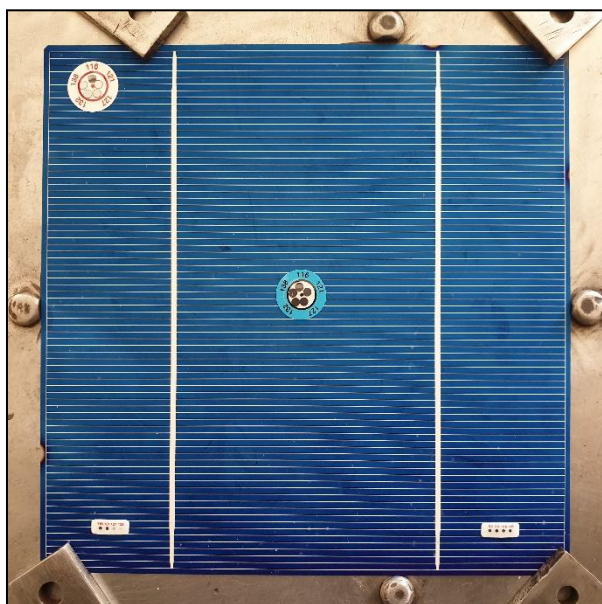
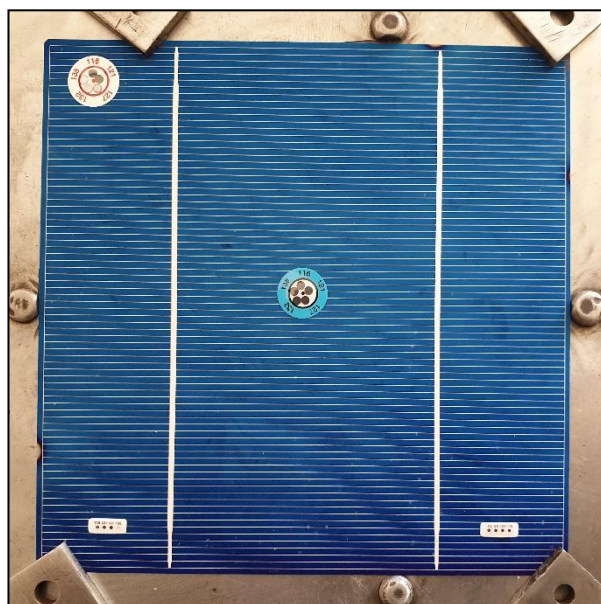
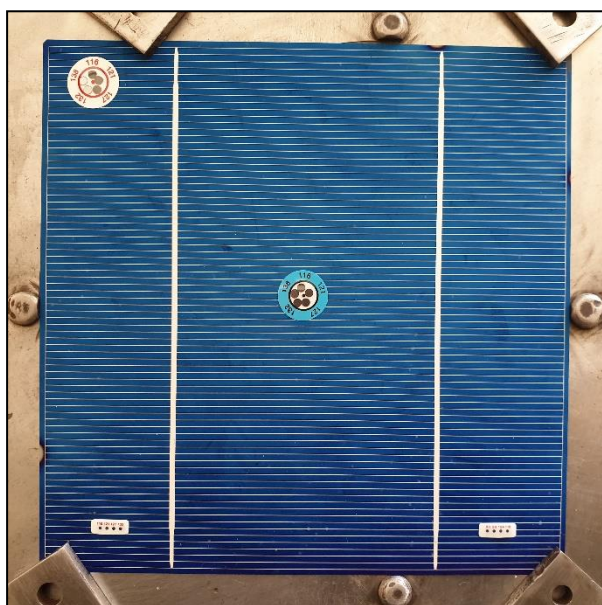
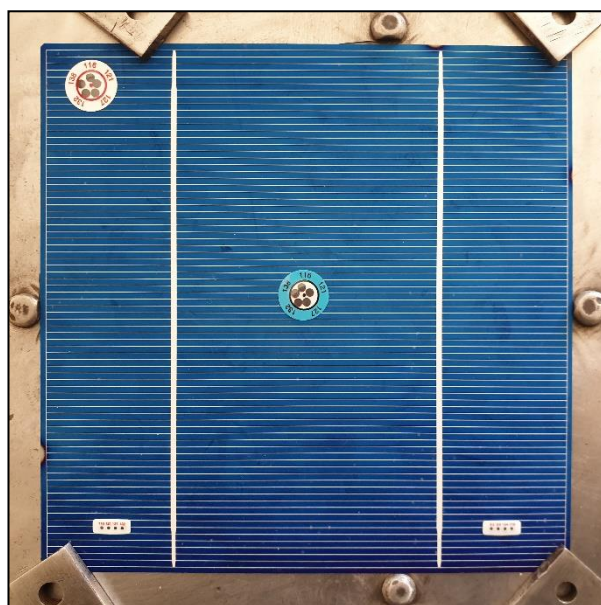
Σχήμα 4.5: Ηλιακό κύτταρο πάνω στη μεταλλική βάση που είναι τοποθετημένη στη θερμαινόμενη επιφάνεια ενός hot plate.

4.4 Θέρμανση Ηλιακού Κυττάρου



Σχήμα 4.6: Οι ενδείξεις των αισθητήρων δείχνουν τη σταδιακή θέρμανση του ηλιακού κυττάρου.

Σε αυτό το στάδιο γίνεται η σταδιακή θέρμανση του ηλιακού κυττάρου και μέσω των αισθητήρων γίνεται παρακολούθηση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επιφάνειά του, όπως φαίνεται και στις ομάδες σχημάτων της ενότητας. Η θέρμανση γίνεται σταδιακά για αποφυγή μικρορωγμών -microcracks- στο ηλιακό κύτταρο.



Σχήμα 4.7: Οι ενδείξεις των αισθητήρων δείχνουν τη σταδιακή θέρμανση του ηλιακού κυττάρου.

Ένδειξη Χρονομέτρου (Ώρες : Λεπτά)	Αλλαγή Ένδειξης Hot Plate (Θερμοκρασία)	Αισθητήρας	Θερμοκρασία Αισθητήρα
0:00	2	--	--
0:15	3	--	--
0:30	4	--	--
0:45	5	--	--
1:00	6	--	--
1:15	7	--	--
1:30	8	--	--
1:31		Κάτω δεξιά	93 °C
1:32		Μεσαίος	116 °C
1:37		Μεσαίος	121 °C
1:38		Κάτω δεξιά	99 °C
1:42		Μεσαίος	127 °C
1:45	9	--	--
1:47		Μεσαίος	132 °C

Ένδειξη Χρονομέτρου (Ώρες : Λεπτά)	Αλλαγή Ένδειξης Hot Plate (Θερμοκρασία)	Αισθητήρας	Θερμοκρασία Αισθητήρα
1:50		Κάτω δεξιά	104 °C
1:54		Μεσαίος	138 °C
1:54		Κάτω αριστερά	116 °C
1:54		Κάτω δεξιά	110 °C
2:00	10	--	--
2:01		Κάτω αριστερά	121 °C
2:02		Πάνω αριστερά	116 °C
2:04		Κάτω αριστερά	127 °C
2:05		Πάνω αριστερά	121 °C
2:07		Κάτω αριστερά	132 °C
2:07		Πάνω αριστερά	127 °C
2:15	11	Πάνω αριστερά	132 °C
2:20		Πάνω αριστερά	138 °C

Πίνακας 4.1: Η κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ηλιακού κυττάρου κατά τη σταδιακή θέρμανσή του.

4.5 Τοποθέτηση Περιβαλλοντικώς Φιλικούς Ροής στο Ηλιακό Κύτταρο

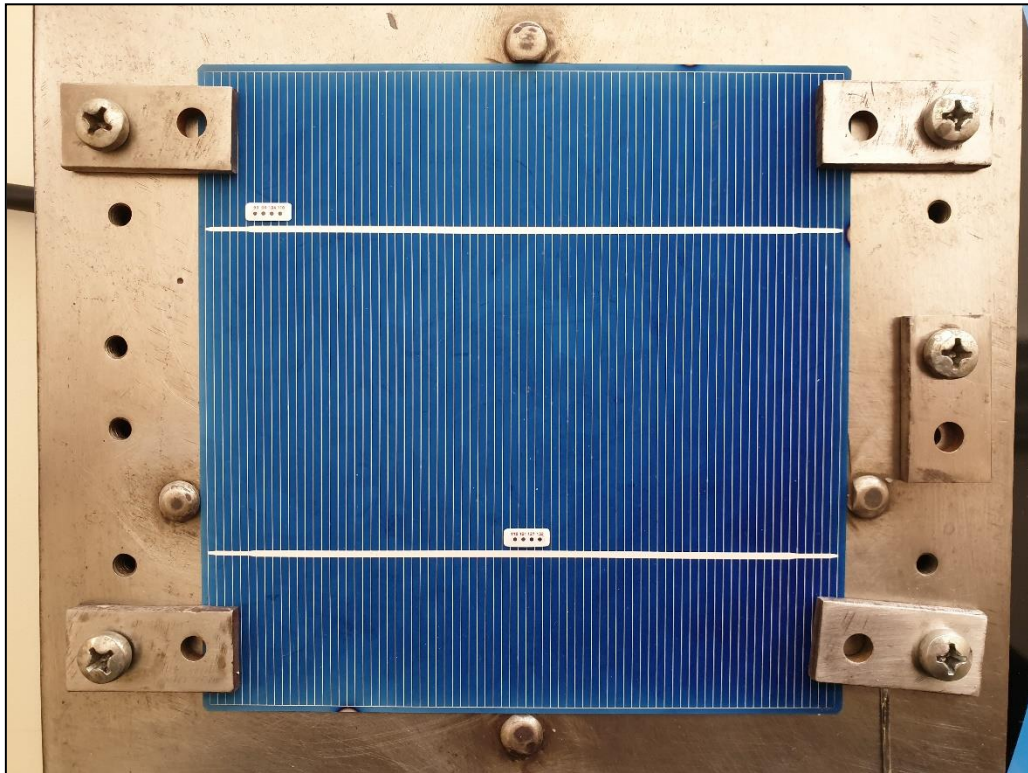
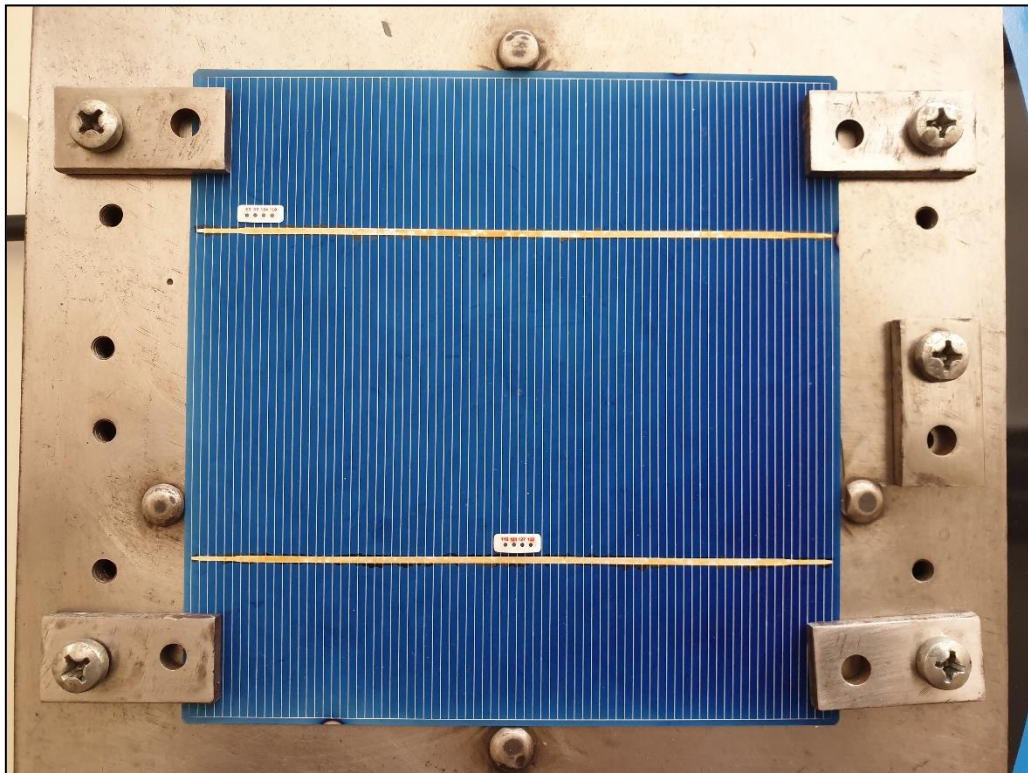
Στα παρακάτω σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζονται οι δύο όψεις ενός ηλιακού κυττάρου με δύο ράβδους συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος. Το σχήμα του είναι πλήρες τετράγωνο με διαστάσεις 156 X156 τετραγωνικά χιλιοστά.

Προηγήθηκαν οι δοκιμαστικές μετρήσεις για να καθοριστεί ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας σε παρόμοια κύτταρα και επίσης η επιφανειακή κατανομή της θερμοκρασίας και οι αποκλίσεις της με αισθητήρες κατάλληλα τοποθετημένους πλησίον των ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος, που θα κατασκευαστούν οι ωμικές συνδέσεις, στο κέντρο αλλά και περιμετρικά του κυττάρου.

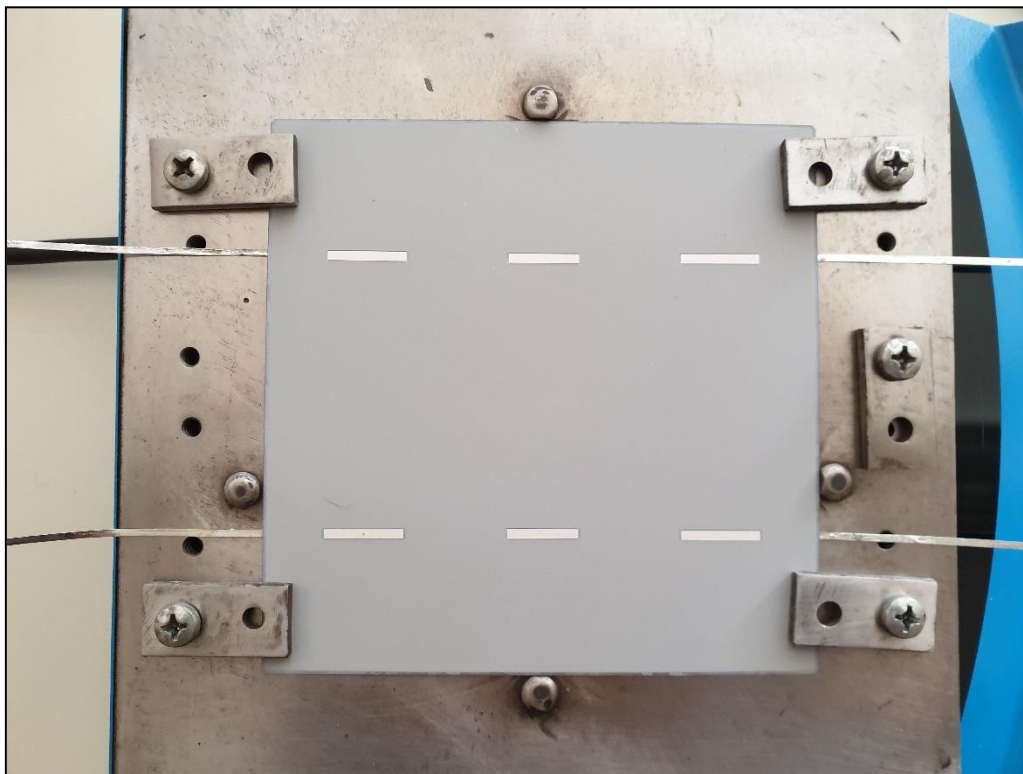
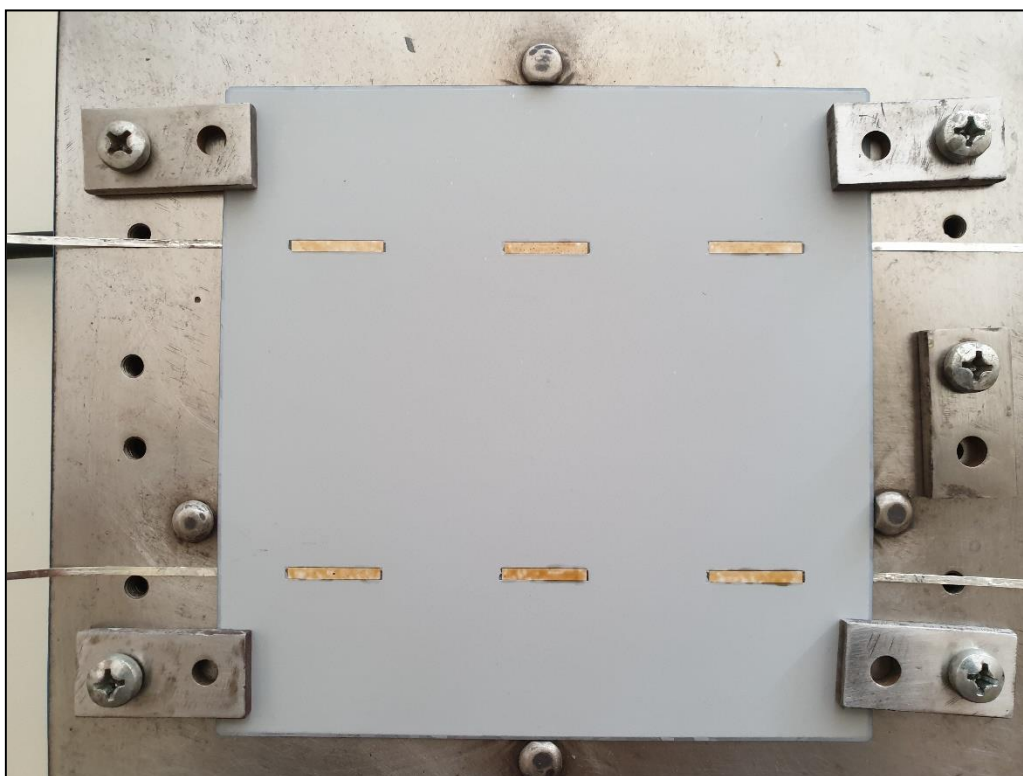
Μετά ακολουθεί η επικάλυψη των ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος με περιβαλλοντικά φιλική ροή (RoHS compliant flux) που υγραίνει την επιφάνειά τους ώστε να διευκολυνθεί η συγκόλληση των επίπεδων αγωγών επί των ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος. Στην σειρά των τεσσάρων φωτογραφιών φαίνονται οι τέσσερις πλευρές ενός κυττάρου πριν και μετά την επικάλυψη των ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος που υπάρχουν στην εμπρός και την πίσω πλευρά του κυττάρου με την επιλεγμένη ροή. Η ροή που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν η CHIPQUIK SMDTLFP Sn42/Bi57.6/Ag0.4 No-Clean T3 Solder Paste.



Σχήμα 4.8: Περιβαλλοντικώς φιλική ροή CHIPQUIK SMDTLFP Sn42/Bi57.6/Ag0.4 No-Clean T3 Solder Paste.



Σχήμα 4.9: Επικάλυψη των ράβδων συλλογής ηλεκτρικού ρεύματος της εμπρόσθιας όψης ηλιακού κυττάρου 156x156 mm² με περιβαλλοντικώς φιλική ροή (flux).

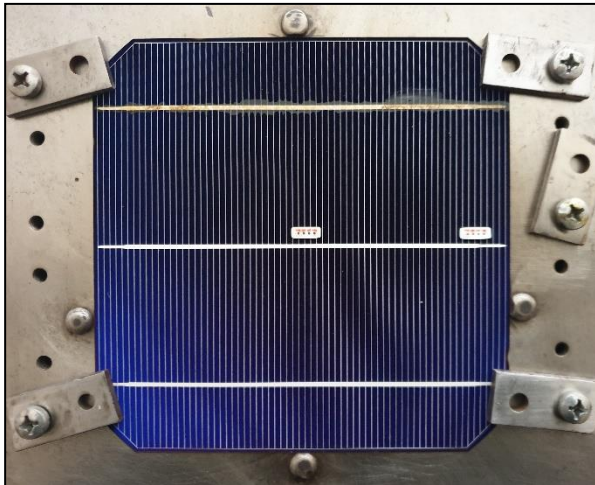
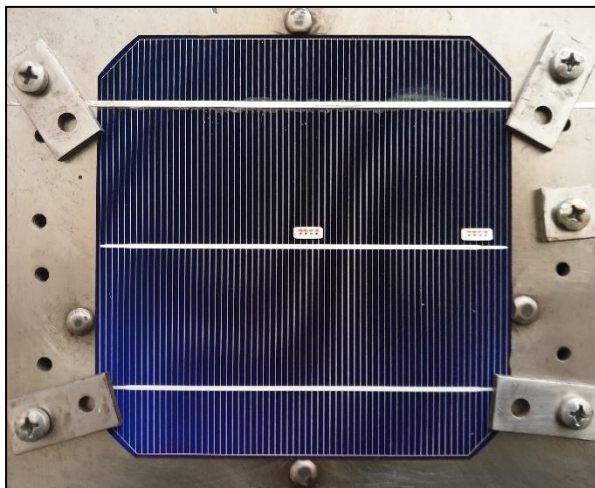
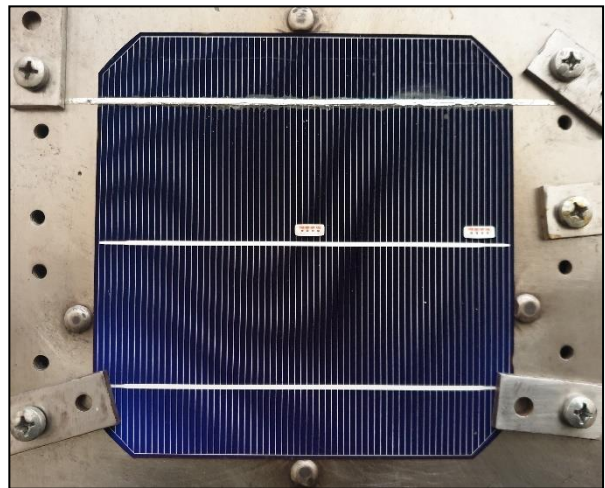


Σχήμα 4.10: Επικάλυψη των ράβδων συλλογής ηλεκτρικού ρεύματος της πίσω όψης ηλιακού κυττάρου 156x156 mm² με περιβαλλοντικώς φιλική ροή (flux).

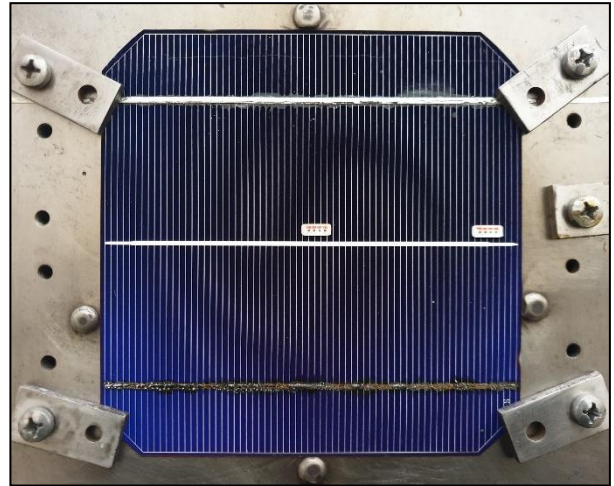
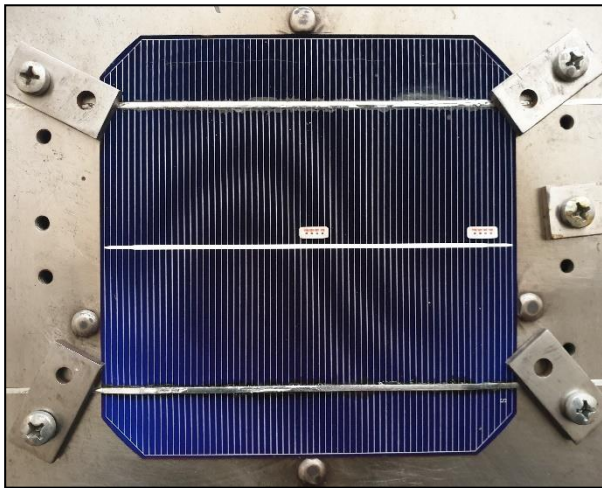
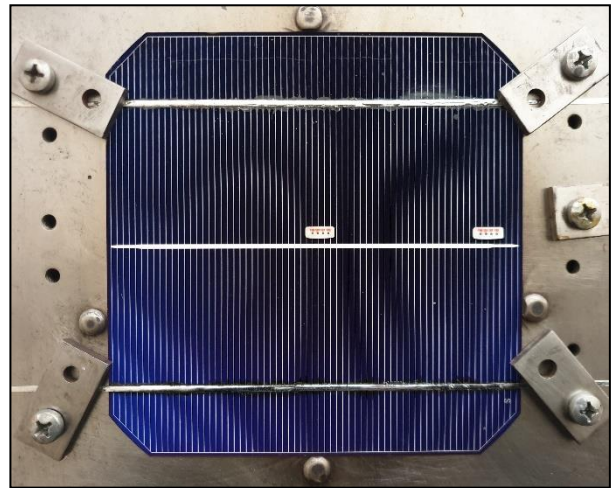
4.6 Συγκόλληση των Ωμικών Επαφών στο Ηλιακό Κύτταρο

Εφόσον το ηλιακό κύτταρο έχει φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία, και έχει γίνει η επικάλυψη των ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος με την περιβαλλοντικώς φιλική ροή, ακολουθεί η επικάλυψη με την περιβαλλοντικώς φιλική πάστα αλουμινίου-αργύρου. Ύστερα ακολουθεί η προετοιμασία των επίπεδων αγωγών όπου με τη χρήση της ακίδας του σταθμού συγκόλλησης (soldering tip) τήκεται ένα μεταλλικό κράμα -μεταλλικό σύρμα- και περνάει η ακίδα από τους επίπεδους αγωγούς. Με τη διαδικασία αυτή απομακρύνονται πιθανές οξειδώσεις. Στη συνέχεια οι επίπεδοι αγωγοί τοποθετούνται πάνω στις ράβδους συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος και ευθυγραμμίζονται με αυτές, ενώ κρατούνται σταθερές με τις μεταλλικές κλάπες της μεταλλικής βάσης. Χρησιμοποιώντας ξανά την ακίδα του σταθμού συγκόλλησης, τήκοντας μέρος του μεταλλικού κράματος γίνεται πέρασμα των επίπεδων αγωγών -που πλέον βρίσκονται πάνω στο ηλιακό κύτταρο- προκειμένου να γίνει η κόλληση τους πάνω στις ράβδους συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος. Τέλος το ηλιακό κύτταρο αφήνεται να επανέλθει στην αρχική του θερμοκρασία και κατόπιν απελευθερώνεται από τις μεταλλικές κλάπες. Στα σχήματα 4.11 και 4.12 απεικονίζεται η δημιουργία των άνω και κάτω ωμικών συνδέσεων αντίστοιχα του ίδιου ηλιακού κυττάρου. Διαδοχικά από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω φαίνεται το η ράβδος συλλογής του ηλιακού κυττάρου αρχικά επικαλυμμένο με την περιβαλλοντικώς φιλική ροή, στη συνέχεια με την περιβαλλοντικώς φιλική πάστα, και στη συνέχεια η ευθυγράμμιση και η κόλληση του επίπεδου αγωγού.

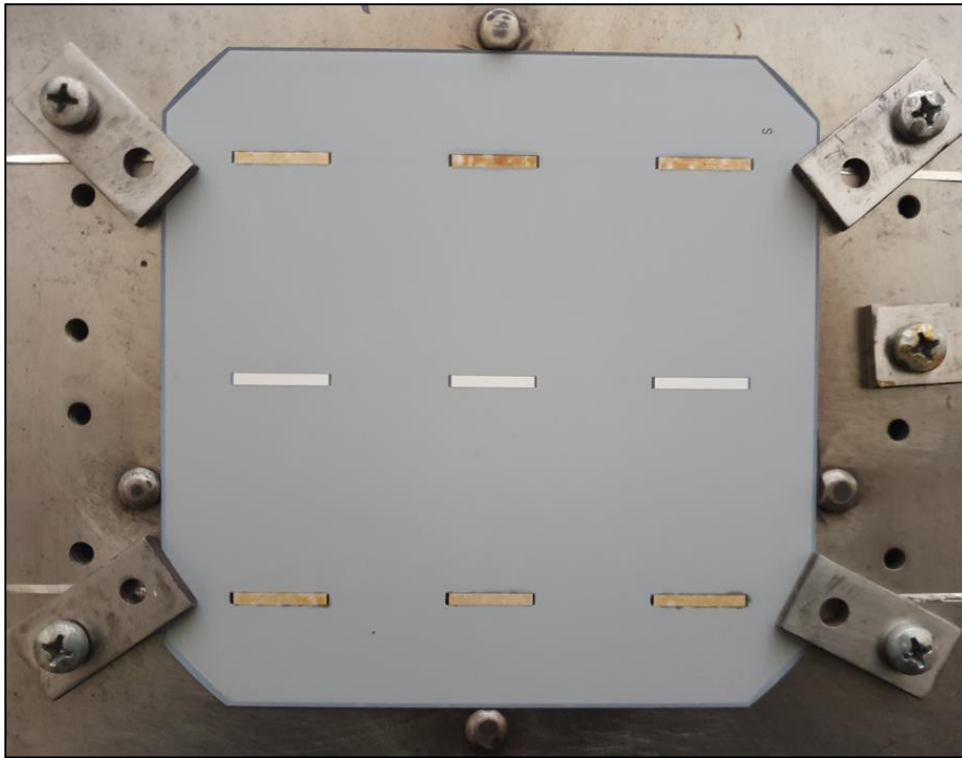
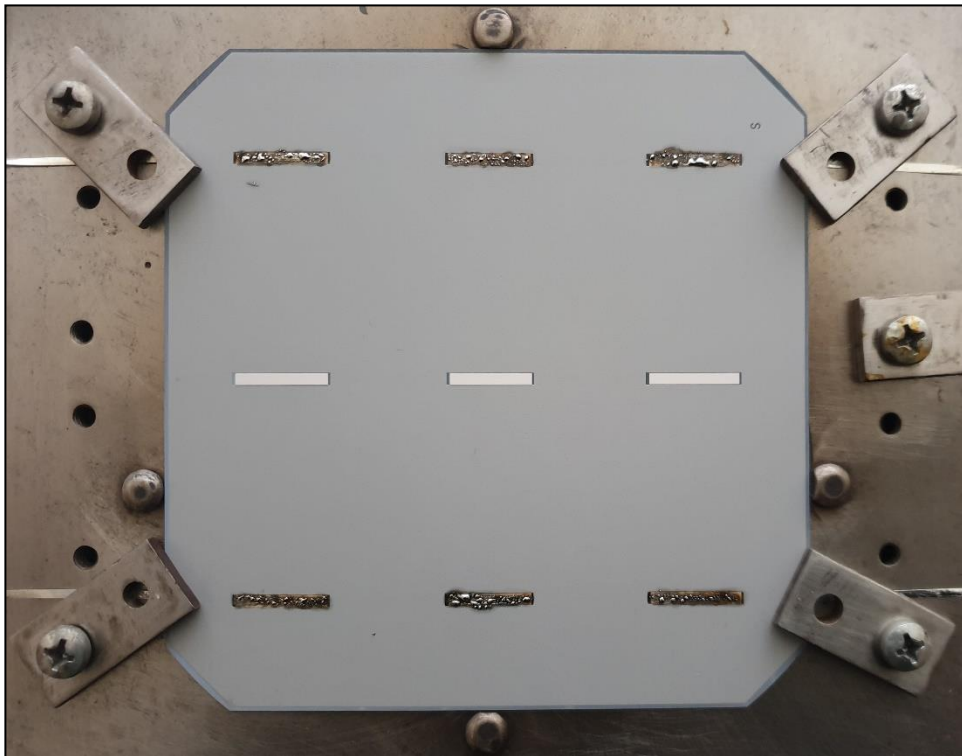
Στο σχήμα 4.13 φαίνεται η πίσω πλευρά του ίδιου ηλιακού κυττάρου με τις διακεκομμένες ράβδους συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος που όμως έχουν μεγαλύτερο πλάτος συγκρινόμενο με το πλάτος των ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία. Στο πάνω μέρος του σχήματος οι ράβδοι συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος είναι επικαλυμμένοι με περιβαλλοντικώς φιλική ροή και στη συνέχεια καλύπτονται από πάστα αλουμινίου αργύρου.



Σχήμα 4.11: Η πάνω ράβδος συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος (i) Επικαλύπτεται με περιβαλλοντικώς φιλική ροή. (ii) Επικαλύπτεται με πάστα αλουμινίου-αργύρου. (iii)(iv) Τοποθετείται ο επίπεδος αγωγός πάνω στη ράβδο συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος, και γίνεται η συγκόλληση.



Σχήμα 4.12: Η κάτω ράβδος συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος (i) Επικαλύπτεται με περιβαλλοντικώς φιλική ροή. (ii) Επικαλύπτεται με πάστα αλουμινίου-αργύρου. (iii)(iv) Τοποθετείται ο επίπεδος αγωγός πάνω στη ράβδο συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος, και γίνεται η συγκόλληση.



Σχήμα 4.13: (i) Επικάλυψη των ράβδων συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος με περιβαλλοντικώς φιλική ροή. (ii) Επικάλυψή τους με πάστα αλουμινίου-αργύρου.

5. Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

5.1 Γενικά Περί των Μετρήσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I - V) όπως προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις που καταγράφηκαν από το SMU 2611A της Keithley. Οι μετρήσεις έγιναν υπό πραγματικές συνθήκες, δηλαδή υπό το φυσικό φως του ήλιου, και ο αισθητήρας μέτρησης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, που παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο, δείχνει κάθε φορά την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για τις ηλεκτρικές μετρήσεις που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο η ένταση ήταν 1030 ή 1040 Watt/m² με πειραματικό σφάλμα ± 20 Watt/m². Παρατηρείται ότι οι μετρήσεις τάσης των καμπύλων είναι έως 0,65 Volt, γεγονός που δηλώνει ότι τα ηλιακά κύτταρα είναι ομο-επαφές p-n πυριτίου.

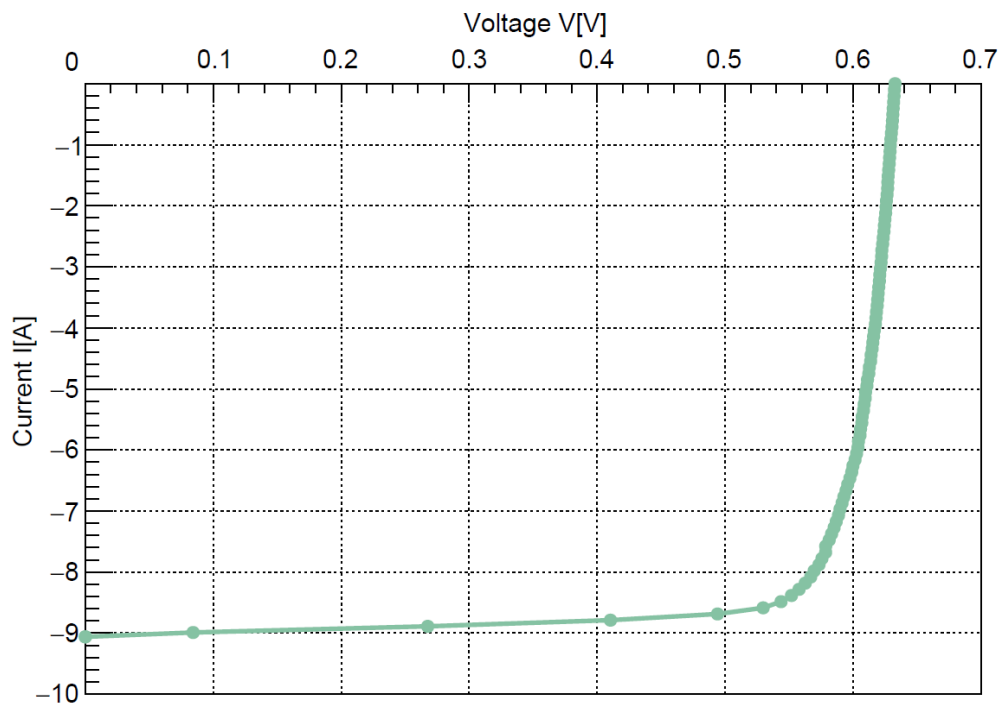
Οι τύποι για τους υπολογισμούς της απόδοσης και του παράγοντα πλήρωσης παρουσιάζονται στο πρώτο κεφάλαιο (Βλέπετε Ενότητα 1.8)

$$n = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

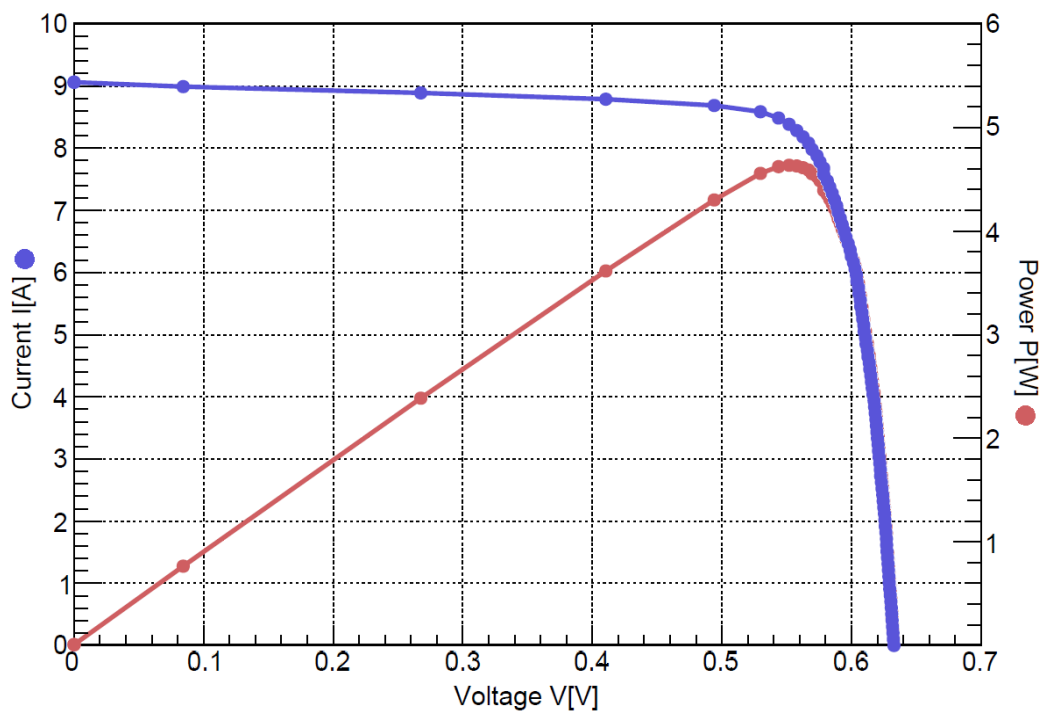
$$Fill\ Factor\ (FF) = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}}$$

Η προσπίπτουσα ισχύς επί του ηλιακού κυττάρου (P_{in}) υπολογίζεται σε κάθε μέτρηση από το γινόμενο της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, που καταγράφεται από τον αισθητήρα μέτρησης της έντασης της ακτινοβολίας, επί το εμβαδόν του ηλιακού κυττάρου. Η επιφάνεια των παρακάτω ηλιακών κυττάρων είναι 156mm x 156 mm, δηλαδή 156mm x 156 mm = 243,36 cm².

5.2 Ηλιακό Κύτταρο Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου 156mm x 156mm με 2 Bus Bars. Η ένταση του φυσικού ηλιακού φωτός κατά την διάρκεια καταγραφής της καμπύλης ήταν 1040W/m²



Σχήμα 5.1: Πραγματική Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος Τάσεως (I-V)

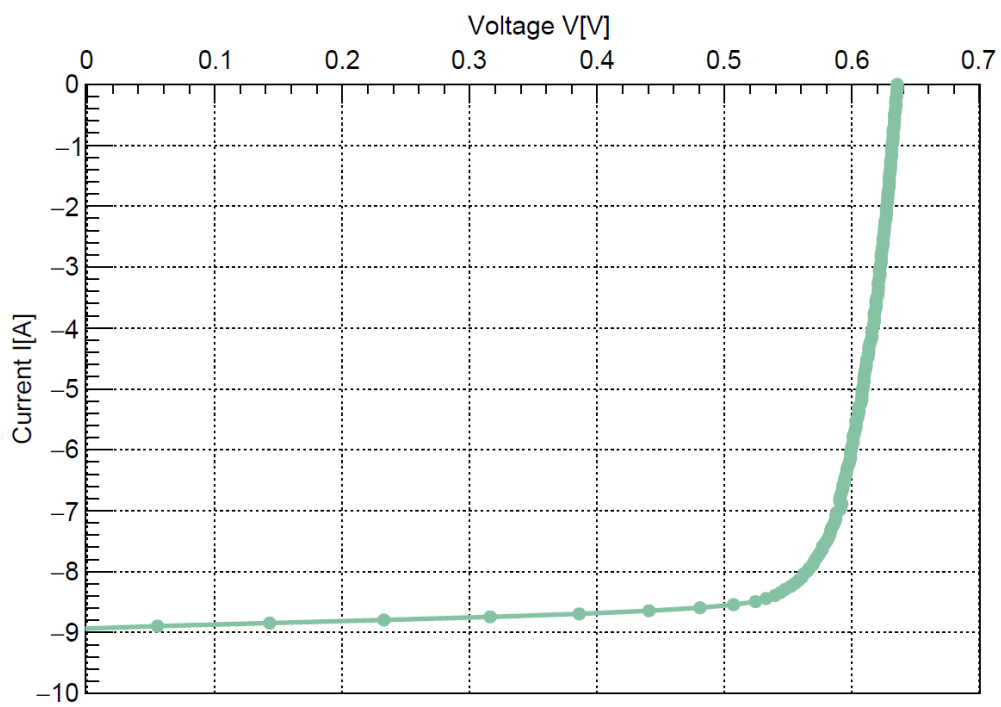


Σχήμα 5.2: Συμμετρική Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσεως (I-V) και Ισχύος-Τάσεως (P-V)

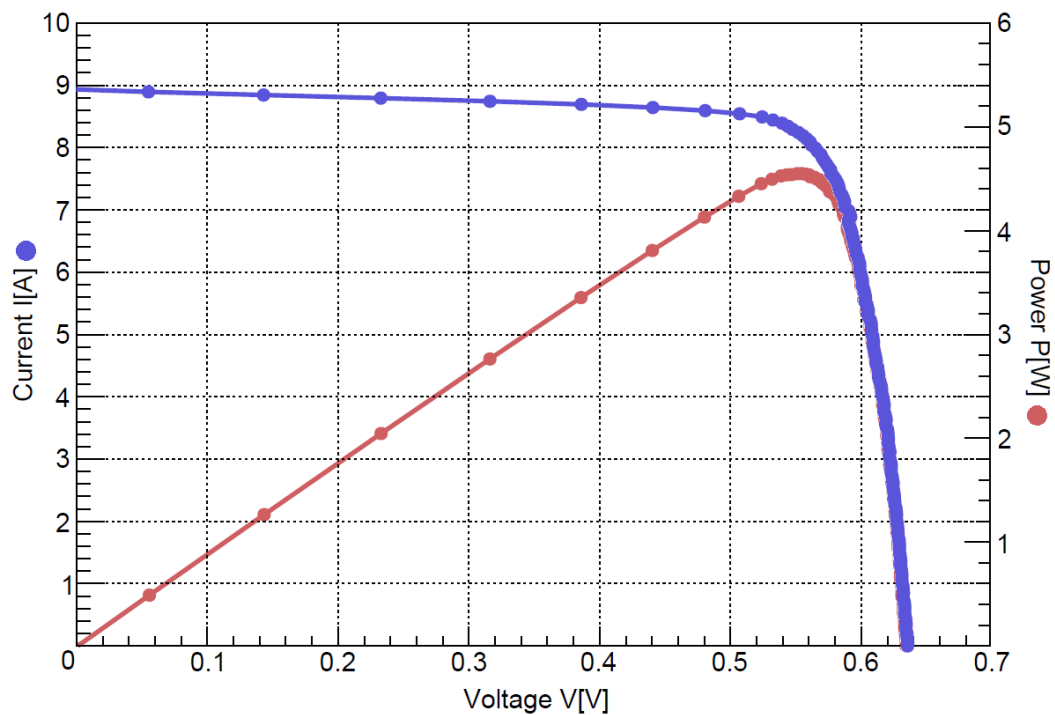
Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας των χαρακτηριστικών μεγεθών της καμπύλης ρεύματος-τάσης (I-V) του παραπάνω ηλιακού κυττάρου. Οι τιμές των τάσεων και των ρευμάτων του πίνακα είναι οι πειραματικές τιμές που καταγράφηκαν με το SMU 2611A της Keithley. Οι τιμές της μέγιστης ισχύος, της απόδοσης και του παράγοντα πλήρωσης υπολογίστηκαν από τις πειραματικές τιμές.

Isc	9.061 A	Pmax	4.627 W
Voc	0.633 V	Imax	8.384 A
FF	0.80	Vmax	0.552 V
η %	18.2		

5.3 Ηλιακό Κύτταρο Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου 156mm x 156mm με 2 Bus Bars. Η Ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας κατά την καταγραφή της καμπύλης ήταν 1030W/m²



Σχήμα 5.3: Πραγματική Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος Τάσεως (I-V)

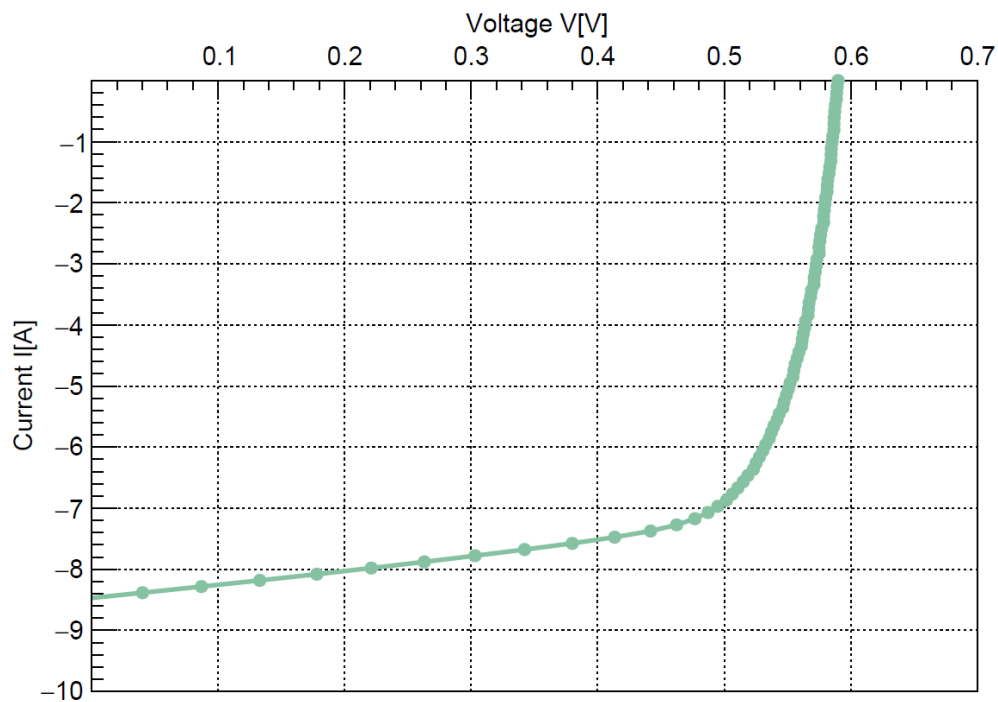


Σχήμα 5.4: Συμμετρική Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσεως (I-V) και Ισχύος-Τάσεως (P-V)

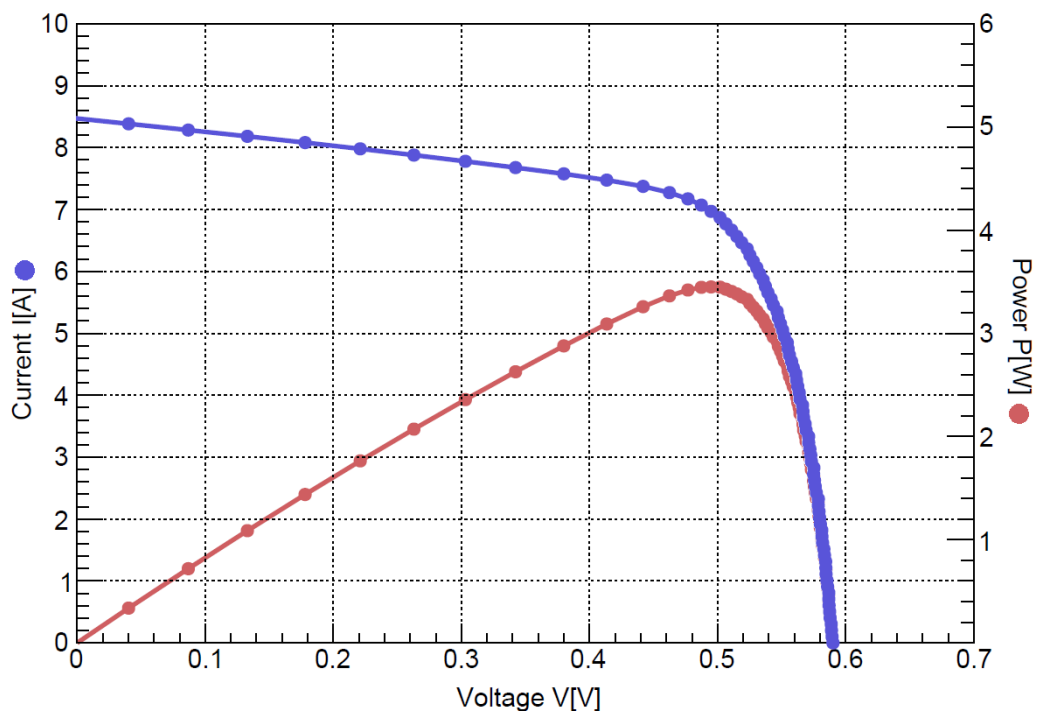
Οι πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα καταγράφηκαν από το SMU 2611A της Keithley. Για κάθε καμπύλη καταγράφονται, σε ελάχιστο χρόνο, 100 ή 200 ζεύγη τιμών τάσης-ρεύματος (I,V). Μετά την ολοκλήρωση κάθε μέτρησης τα πειραματικά δεδομένα καταγράφονται σε αρχείο csv.

Isc	8.945 A	Pmax	4.549 W
Voc	0.635 V	Imax	9.191 A
FF	0.80	Vmax	0.555 V
η %	18.1		

5.4 Ηλιακό Κύτταρο Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου 156mm x 156mm με 3 Bus Bars και Περιβαλλοντικώς Φιλικές Ωμικές Συνδέσεις υπό Μερική Σκίαση (Ένταση Ηλιακής Ακτινοβολίας 1040W/m²)



Σχήμα 5.5: Πραγματική Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος Τάσεως (I-V)



Σχήμα 5.6: Συμμετρική Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσεως (I-V) και Ισχύος-Τάσεως (P-V)

Ακολουθεί πίνακας ηλεκτρικών μετρήσεων που εξήχθησαν ή υπολογίστηκαν από την παραπάνω καμπύλη ρεύματος-τάσης του ηλιακού κυττάρου. Η καμπύλη καταγράφηκε υπό φυσικό ηλιακό φως με ένταση 1040 Watt/m² . Κατά την διάρκεια της μέτρησης η επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου ήταν μερικώς σ

Isc	8.485 A	Pmax	3.449 W
Voc	0.590 V	Imax	6.970 A
FF	0.68	Vmax	0.495 V
η %	13.6		

Επίλογος

Στην εργασία αυτή όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, για να γίνουν οι ωμικές συνδέσεις σε βιομηχανικώς κατασκευασμένα ηλιακά κύτταρα Si, είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Στην συνέχεια μετρήσαμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) συμβατικών και ημιδιαφανών ηλιακών κυττάρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου υψηλής απόδοσης με φιλικές προς το περιβάλλον ωμικές συνδέσεις. Ακολούθησε σύγκριση των καμπυλών I-V των ηλιακών κυττάρων της παρούσης εργασίας με τις αντίστοιχες καμπύλες βαθμονόμησης που καταγράφηκαν από το εξειδικευμένο γερμανικό Ινστιτούτο Fraunhofer, και όχι από τις ίδιες τις εταιρίες που τα κατασκευάζουν γεγονός που προσδίδει μεγαλύτερη αξιοπιστία όσον αφορά στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κυττάρων. Αν και οι μετρήσεις μας έγιναν σε ηλιακά κύτταρα με ωμικές συνδέσεις κατασκευασμένες με περιβαλλοντικώς φιλικά υλικά σε αντίθεση με τις συμβατικές ωμικές συνδέσεις των ηλιακών κυττάρων που μετρήθηκαν από το Fraunhofer, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης οι βιομηχανίες κατασκευής ηλιακών κυττάρων και φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να χρησιμοποιούν περιβαλλοντικώς φιλικές ωμικές επαφές και συνδέσεις. Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την κατασκευή ωμικών συνδέσεων με φιλικά προς το περιβάλλον υλικά σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες RoHS, WEEE και Reach.

Αναφορές

[1] Κωνσταντίνος Θ. Δερβός, *Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, (2013)

[2] Safa O. Kasap, *Principles of Electronic Materials and Devices, Third Edition*, The McGraw-Hill Companies Inc., Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, (2017)