



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΤΩΝ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ
ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΙΣΧΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
STC**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΕΩΝ Γ. ΝΤΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΤΩΝ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ
ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΙΣΧΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
STC**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΕΩΝ Γ. ΝΤΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Φεβρουαρίου 2019

.....

Κ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Π. Τσαραμπάρης

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Κ. Κόλλια

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019

.....

ΣΥΜΕΩΝ Γ. ΝΤΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Συμεών Γ. Ντανόπουλος, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν διερεύνηση της επίδρασης που έχουν οι επικαλύψεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων στην αποδιδόμενη μέγιστη ισχύ τους. Κατασκευάστηκαν στοιχεία με επικάλυψη εποξειδικής ρητίνης καθώς και στοιχεία με επικάλυψη εποξειδικής ρητίνης με πρόσμιξη νανοσωματιδίων οξειδίου του ψευδαργύρου σε μορφή nanopowders. Τα υλικά της επικάλυψης μετρήθηκαν ως προς την διηλεκτρική τους συμπεριφορά και παρουσιάστηκαν σε μορφή διαγραμμάτων κ'.

Στο δεύτερο τμήμα της διπλωματικής εργασίας έγιναν μετρήσεις σε έξι στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα δυο εξ' αυτών είχαν προηγουμένως θερμανθεί στους 300 βαθμούς κελσίου, δυο είχαν θερμανθεί στο 450 βαθμούς κελσίου και 2 δεν είχαν υποστεί καμία επεξεργασία ώστε να χρησιμοποιηθούν ως σημείο αναφοράς. Στην συνέχεια μετρήθηκαν οι χαρακτηριστικές τάσης – έντασης των στοιχείων. Στην συνέχεια αυτές οι μετρήσεις έγιναν αναγωγή από πραγματικές συνθήκες σε συνθήκες STC ώστε να είναι συγκρίσιμες. Τέλος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των στοιχείων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μετρήσεις, φωτοβολταϊκά στοιχεία, πρόσμιξη, εποξειδική ρητίνη, οξείδιο του ψευδαργύρου, μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, προστατευτικές επικαλύψεις, συνθήκες STC

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to examine the effect of coating on photovoltaic cells on their maximum power output. Some cells were coated with pure epoxy resin and some were coated with epoxy resin mixed with nanoparticles of zinc oxide in the form of nanoflowers. The fabricated coating materials were also measured for their dielectric capabilities and the results are presented in graphs of the measured relative dielectric constant.

In the second part of this thesis measurements were taken from six cells of monocrystalline silicon. Two of these were heated at 300 degrees Celsius, the other two at 450 degrees Celsius and two were not treated at all in order to serve as reference values for the other two sets. Then the measurements that were taken were corrected for temperature and irradiance to STC.

Finally, the results of the three I-V characteristics are all presented in a complex graph and they are analyzed qualitatively.

KEYWORDS

Measurements, photovoltaic cells, epoxy resin, hybrid resin, zinc oxide, monocrystalline silicon, cell coating, STC

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών κύριο Κωνσταντίνο Δέρβο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου.

Επίσης, εκφράζω τις ευχαριστίες στο ναυπηγό μηχανικό, κύριο Θεόδωρο Αργυρόπουλο, για τη συνεργασία μας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στους φίλους μου, που με στήριζαν και με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	13
1.1 Εισαγωγή	13
1.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	13
1.3 Ιστορική Αναδρομή	14
1.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο και Φωτοβολταϊκό Στοιχείο	16
1.5 Αρχή Λειτουργίας	18
1.6 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων	20
1.7 Μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων	22
1.8 Η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς στην Ελλάδα και παγκοσμίως	22
1.9 Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα για το 2017	26
1.10 Προβλέψεις για Εγκατεστημένη Ισχύς Ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β (MW)	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ	28
2.1 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο	28
2.2 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο	28
2.3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου	33
2.4 Βαθμός απόδοσης και παράγοντες που τον επηρεάζουν	36
2.5 Υλικά επικάλυψης φωτοβολταϊκών στοιχείων	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ, ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ	39
3.1 Πολυμερή- Γενικά χαρακτηριστικά	39
3.2. Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή	41
3.3 Κατηγορίες ρητινών	41
3.4. Εποξειδικές ρητίνες	42
3.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά	42
3.4.2 Παραγωγή και σκλήρυνση εποξειδικής ρητίνης	45
3.5. Εφαρμογές εποξειδικών ρητινών	47
3.6 Τρόπος εφαρμογής επί του στοιχείου - Μέθοδος επικάλυψης	49
3.7 Αποτελέσματα μετρήσεων κ' σε συνάρτηση με τη συχνότητα	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΟ ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ, NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑ, NANOFLOWERS	52

4.1 Το Οξειδίο του Ψευδαργύρου (ZnO)	52
4.2 Ιδιότητες του υλικού	55
4.3 Νανοϋλικά	56
4.3.1 Νανοτεχνολογία	56
4.3.2 Βασικές έννοιες για την μελέτη νανοδομών	57
4.4 Nanoflowers	58
4.5 Χρήσεις και εφαρμογές ZnO nanoflowers	59
4.6 Αποτελέσματα μετρήσεων κ' σε συνάρτηση με τη συχνότητα	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΪΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΚΑΤΑΠΟΝΗΘΕΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	63
5.1 Περιγραφή διαδικασίας λήψης των μετρήσεων	63
5.2 STC συνθήκες	65
5.3 Μετατροπή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων από πραγματικές συνθήκες σε συνθήκες STC	66
5.4 Υπολογισμός εσωτερικής αντίστασης	67
5.4 Παρουσίαση μετρήσεων	69
5.4.1 Μετρήσεις κελιών χωρίς θερμοκρασιακή καταπόνηση	69
5.4.2 Μετρήσεις στοιχείων με θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 300 βαθμούς κελσίου	78
5.4.3 Μετρήσεις στοιχείων με θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 450 βαθμούς κελσίου	89
5.5 Παρουσίαση συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων και σχολιασμός	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Η ζήτηση ενέργειας παραγόμενης από ανανεώσιμες- καθαρές πηγές είναι όλο και περισσότερο αυξανόμενη στις μέρες μας λόγω των κλιματικών αλλαγών και των μειούμενων αποθεμάτων στις μέχρι τώρα συμβατικές πηγές, π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, λιγνίτης κλπ.

Η BP [10] ανακοίνωσε πως αυτή τη στιγμή τα αποδεδειγμένα αποθέματα, τα οποία όμως μπορεί να μην είναι όλα προσβάσιμα, αρκούν με τους σημερινούς ρυθμούς για τα επόμενα 40 χρόνια. Αν συνυπολογίσει κανείς και τις οικολογικές διεργασίες που συντελούνται σε παγκόσμιο επίπεδο προκύπτει η ανάγκη για αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η λύση προσφέρεται με τη μορφή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε).

Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα δίκτυα ενέργειας αποτελεί παγκόσμιο στόχο πλέον και έχει θεσμοθετηθεί από όργανα όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση. Στην «Πράσινη Βίβλο», δηλαδή το πλαίσιο για τις πολιτικές της Ένωσης που αφορούν το κλίμα και την ενέργεια με χρονικό ορίζοντα το έτος 2030, αναφέρεται πως η ενέργεια από ΑΠΕ πρέπει να συνεχίσει να διαδραματίζει καίριο λόγο στη μετάβαση σε ένα πιο ανταγωνιστικό, ασφαλές και αειφόρο σύστημα ενέργειας. Το ίδιο κείμενο βάζει σαν στόχο να προσελκύσει σε επίπεδο Ε.Ε. επενδύσεις που θα αυξήσουν το μερίδιο ενέργειας των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή από 21% που είναι σήμερα στο 45% το 2030. Κρίνεται λοιπόν, από τα προηγούμενα σκόπιμο, να στραφεί το ερευνητικό ενδιαφέρον στις ΑΠΕ μιας και οι λόγοι που τις καθιστούν σημαντικές σήμερα δεν θα εκλείψουν στο μέλλον. Αντιθέτως θα αποτελέσουν μια αναγκαιότητα στο ενεργειακό κατεστημένο των επόμενων ετών.

Μια από τις σημαντικότερες πηγές ενέργειας, που φαίνεται να συνδυάζει ιδανικά τις απαιτήσεις για νέες ενεργειακές εφαρμογές, και που η ενδεχόμενη αξιοποίηση της βρήκε ανεπιφύλακτη αποδοχή στη διεθνή κοινή γνώμη, είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε σημαντική κλίμακα, και παρουσιάζει απεριόριστες μελλοντικές προοπτικές, για την παραγωγή θερμότητας με σκοπό την θέρμανση του νερού. Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν, χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια, με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών.

1.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Με τον όρο φωτοβολταϊκά συστήματα αναφερόμαστε στα συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με τη χρήση του παραγόμενου ρεύματος, τα Φ/Β κατατάσσονται σε:

- Αυτόνομα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων καταναλώνεται επιτόπου και εξολοκλήρου από την παραγωγή στην κατανάλωση
- Διασυνδεδεμένα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να μεταφερθεί και να καταναλωθεί αλλού.

1.3 Ιστορική Αναδρομή

Μια πρώτη παρατήρηση ότι το φως μπορεί να δημιουργήσει ηλεκτρισμό αφού απορροφηθεί από κάποιο υλικό δόθηκε από τον Edmond Becquerel το 1839. [1] Η απαρχή του πρώτου φωτοβολταϊκού κελιού πραγματοποιήθηκε από τον Charles Fritts το 1883, που οραματίστηκε τον ανταγωνισμό, της παραγωγής ηλεκτρισμού από το φως του Ήλιου, με την παραγωγή από τις λιγνιτικές μονάδες παραγωγής του Thomas Edison. Ανασταλτικός παράγοντας μεταξύ άλλων λόγων ήταν η χαμηλή απόδοση της τάξης του 1%, ωστόσο ήταν μια εξέλιξη για την εποχή εκείνη, αφού άλλες φωτοβολταϊκές διατάξεις που είχαν εφευρεθεί επιτύγχαναν ακόμη χαμηλότερες αποδόσεις. Η περαιτέρω εξέλιξη των φωτοβολταϊκών πραγματοποιήθηκε όπως συντελείται και σήμερα με την ταυτόχρονη εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής και την εφεύρεση του τρανζίστορ και των κοινών μεθόδων παραγωγής κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται στους δύο κλάδους. Πολλοί επιστήμονες προσπάθησαν να εξηγήσουν τη σχέση μεταξύ της ύλης του φωτός και του ηλεκτρισμού. Καθοριστική ήταν και η συμβολή του Albert Einstein στην ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου το 1905, δηλαδή ότι η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρονίων.

Το 1941 ο Russell Ohl, που εργαζόταν στο εργαστήριο της Bell, κατέθεσε πατέντα για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο όμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται σήμερα, δηλαδή μία δίοδο p-n.

Με την ανακάλυψη του τρανζίστορ και τη θεωρητική μελέτη της ένωσης p-n από τον Shockley [2] και τους Bardeen και Brattain [3] το 1949, ουσιαστικά ξεκίνησε η εποχή των ημιαγωγών. Αργότερα ο Charin [4] στα εργαστήρια Bell ανέπτυξαν το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο από κρυσταλλικό πυρίτιο, με απόδοση 6%, σημαντική για τη δεδομένη εποχή. Αυτή η απόδοση αυξήθηκε στο 10% σε λίγα χρόνια, όπου ξεκίνησαν και οι πρώτες εφαρμογές που αφορούσαν τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας σε δορυφόρους. Η γρήγορη ανάπτυξη της τεχνολογίας στην εξερεύνηση του διαστήματος διάνοιξε εξαιρετικές προοπτικές για την χρήση φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το 1958, 108 ηλιακά κύτταρα είχαν σταλεί στο διάστημα για δοκιμή. Η σύνδεση σε σειρά άρχισε αργότερα σε μικρότερο αριθμό.

Το 1961 πραγματοποιήθηκε το πρώτο συνέδριο των Ηνωμένων Εθνών για την ηλιακή ενέργεια στις αναπτυσσόμενες χώρες. Το Defense Studies Institute οργάνωσε το πρώτο συνέδριο φωτοβολταϊκών την ίδια χρονιά στην Ουάσιγκτον. Το 1962 ο πρώτος δορυφόρος που χρησιμοποιούνταν για εμπορικούς σκοπούς, στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, ο Telstar,

εκτοξεύθηκε από τα Bell Laboratories. Η μέγιστη ισχύς του συστήματος ήταν 14 W. Το δεύτερο συνέδριο φωτοβολταϊκών έγινε αυτή την χρονιά και πάλι στην Ουάσιγκτον. Το 1963 η Sharp Corporation ανέπτυξε το πρώτο εφαρμόσιμο φωτοβολταϊκό πλαίσιο από κύτταρα πυριτίου. Αυτό ήταν και το πρώτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο που είχε δημιουργηθεί ποτέ. Το μεγαλύτερο φωτοβολταϊκό σύστημα εκείνη την εποχή ήταν 242W στην Ιαπωνία. Την επόμενη χρονιά οι Αμερικάνοι ανέπτυξαν ένα σύστημα 470W στο διαστημικό πρόγραμμα Nimbus. Στη συνέχεια και οι Ιάπωνες ανέπτυξαν φωτοβολταϊκά για διαστημικές εφαρμογές

Το 1970 η ετήσια παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων για διαστημικές εφαρμογές ήταν 500 m². Ωστόσο, η κύρια ώθηση στην εξάπλωση των φ/β στοιχείων δόθηκε το 1973 με την περιβόητη πετρελαϊκή κρίση. Από τότε δημιουργήθηκαν πολλά ερευνητικά ινστιτούτα προς αυτή την κατεύθυνση, η πλειονότητα των οποίων είχε δημόσια χρηματοδότηση. Όλες οι επιλογές για δραστική μείωση του κόστους εξετάστηκαν καθώς διαπιστώθηκε ότι το υπέρογκο κόστος των φ/β συστοιχιών ήταν το κυριότερο εμπόδιο για την εξάπλωσή τους και από τότε έχει γίνει σημαντική δουλειά προς αυτή την κατεύθυνση, η οποία βοηθήθηκε και από την βελτίωση των διαδικασιών της μικροηλεκτρονικής.

Ήδη από το 1972 και έπειτα είχαμε την δημιουργία των πρώτων μεγάλων εταιρειών κατασκευής φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τότε δημιουργήθηκε η εταιρεία Solar Power Corporation και το 1973 η Solarex Corporation. Την ίδια χρονιά στο πανεπιστήμιο του Delaware αναπτύχθηκε για οικιακή χρήση ένα φωτοβολταϊκό-θερμικό υβριδικό σύστημα. Το 1974, το Ιαπωνικό σχέδιο Sunshine ξεκίνησε. Ένα χρόνο αργότερα ιδρύθηκαν η Solec International και η Solar Technology International.

Το 1976, υπό την κηδεμονία της NASA, η LeRC ξεκίνησε να εγκαθιστά φωτοβολταϊκά συστήματα για εφαρμογές στη γη και συνέχισε μέχρι το 1985 και αργότερα από το 1992 μέχρι το 1995. Τα συστήματα ήταν για ψυκτικό, ιατρικό και τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό καθώς και για φωτισμό και άντληση νερού. Το πρώτο κύτταρο άμορφου πυριτίου αναπτύχθηκε επίσης το 1976 από τα RCA Laboratories.

Πολλά σημαντικά γεγονότα έγιναν το 1980 στον τομέα των φωτοβολταϊκών. Το Τμήμα Ενέργειας (Department of Energy) των Η.Π.Α. ξεκίνησε την έρευνα για φωτοβολταϊκά συστήματα. Η ARCO Solar ήταν η πρώτη που παρήγαγε φωτοβολταϊκά πλαίσια με μέγιστη ισχύ πάνω από 1 MW το χρόνο. Η BP εμφανίστηκε στην αγορά των φωτοβολταϊκών αυτή τη χρονιά και η ARCO Solar εγκατέστησε ένα σύστημα 105.6 kW στην Πολιτεία της Γιούτα. Το 1981 εγκαταστάθηκε ένα σύστημα αφαλάτωσης σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκό σύστημα με ισχύ 10.8 kW στην Σαουδική Αραβία. Η εταιρεία Helios Technology, η πιο παλιά Ευρωπαϊκή εταιρεία παραγωγής φωτοβολταϊκών, ιδρύθηκε αυτή τη χρονιά.

Το 1982 η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων ξεπέρασε τα 9.3 MW. Η Volkswagen ξεκίνησε να εξετάζει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων ισχύος 160 Wp, σε οροφές αυτοκινήτων για βοήθεια στην εκκίνηση. Ως Wp ορίζεται η μέγιστη χωρητικότητα μίας μονάδας υπό ιδανικές συνθήκες. Το 1983, η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων ξεπέρασε τα 21.3 MWp με αξία US \$250 εκατομμύρια. Οι Hans Tholstrup και Larry Perkins οδήγησαν ένα ηλιακό όχημα το οποίο είχε φωτοβολταϊκό σύστημα 1kW σε απόσταση 4000 km σε 20 ημέρες στον Αυστραλιανό Αγώνα. Η μέγιστη ταχύτητα ήταν 72 km/h, ενώ η μέση 24 km/h. Την ίδια χρονιά η ARCO Solar κατασκεύασε ένα φωτοβολταϊκό εργοστάσιο 6 MW στην Καλιφόρνια. Η Solar Power Corporation κατασκεύασε τέσσερα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα για τις ανάγκες ενός χωριού στην Τυνησία με μέγιστη ισχύ 31kW το καθένα.

Το 1985 ερευνητές του πανεπιστημίου της Νέας Νότιας Ουαλίας στην Αυστραλία κατασκεύασαν ηλιακό στοιχείο με απόδοση 20%. Η BP κατασκεύασε ένα ηλεκτρικό εργοστάσιο στο Σύδνεϋ και αμέσως μετά άλλο ένα στην Μαδρίτη. Το 1986 η ARCO Solar παρουσίασε το πρώτο εμπορικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο τεχνολογίας thin film. Το 1990, η Energy Conversion Devices Inc. (ECD) και η Canon Inc. δημιούργησαν μια κοινή εταιρεία, την United Solar Systems Corporation για την παραγωγή ηλιακών κυττάρων. Η Siemens αγόρασε την ARCO Solar και ίδρυσε την Siemens Solar Industries. Ένα χρόνο αργότερα η BP Solar Systems μετονομάστηκε σε BP Solar International (BPSI), και έγινε ανεξάρτητη.

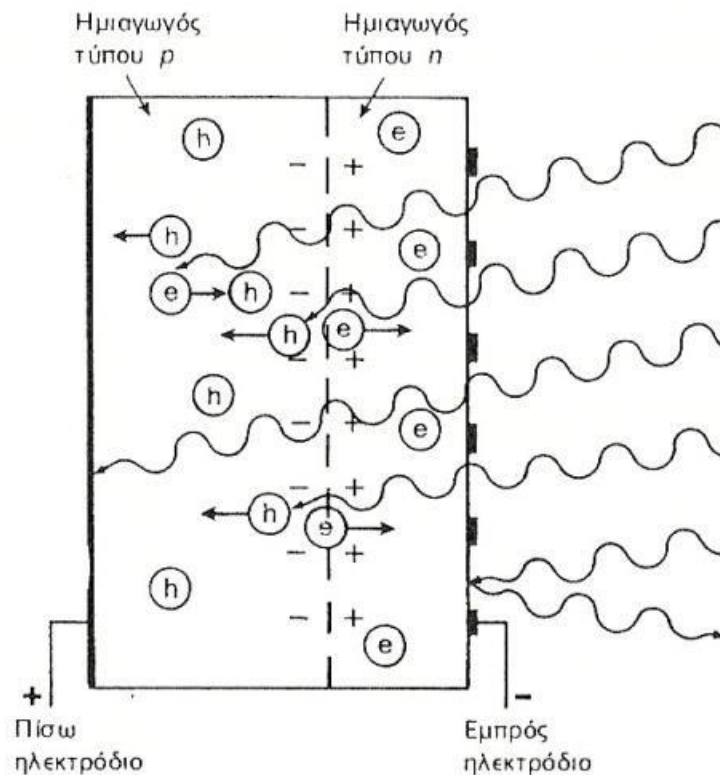
Το 1992 ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο πυριτίου κατασκευάστηκε με απόδοση 20%. Το 1996 ιδρύθηκε το National Center for Photovoltaics στο Κολοράντο και αποτελεί το βασικό εργαστήριο για έρευνα και ανάπτυξη φωτοβολταϊκών στην Αμερική. Το 1999 η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών σε παγκόσμιο επίπεδο ήταν 1000 MW.

Η Nasa, με εκτεταμένες έρευνες που άρχισαν το 1994 σε ήδη κατασκευασμένα πρωτότυπα ηλιακών αεροσκαφών προσπάθησε να σπάσει το παγκόσμιο ρεκόρ συνεχούς πτήσης σε υψόμετρο με φτερωτό αεροσκάφος. Τελικά μετά από την δημιουργία τεσσάρων πρωτοτύπων αεροσκαφών, των Pathfinder, Pathfinder Plus, Centurion και Helios Prototype κατάφερε να σπάσει το ρεκόρ με το τελευταίο. Το Helios Prototype κατάφερε να πετάξει σε ύψος 29523,8 m στις 13 Αυγούστου 2001 και να μείνει σε περίπου αυτό το ύψος για 40 λεπτά. Το αεροσκάφος αυτό είχε άνοιγμα φτερών 75,3 m, δηλαδή μεγαλύτερο από ένα Boeing 747 και πλάτος 2,4 m. Χρησιμοποιούσε ηλεκτρικούς κινητήρες 1,5 kW ισχύος που τροφοδοτούνταν από φωτοβολταϊκά πλαίσια που ήταν εγκατεστημένα στα φτερά του.

1.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο και Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι με τη μορφή ενός δίσκου, που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του

ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συγκεντρώσεις ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου) μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχτούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο.

Τα φωτόνια της ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρόσθια όψη, τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα e^-) ή προς τα πίσω (οι οπές h^+), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ ένα άλλο μέρος της διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.

Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους

ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου.

Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μίας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων ειδών. Όπως για παράδειγμα από διόδους ετεροενώσεων p-n διαφορετικών στοιχείων ή από διόδους Schottky.

Το κρυσταλλικό πυρίτιο, αυτό καθ' αυτό δεν είναι ένας πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, αλλά όταν προστίθενται σ' αυτό προσμίξεις, δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Στο κάτω στρώμα του ηλιακού κελιού προστίθεται συνήθως βόριο, το οποίο δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο οδηγώντας στην ανάπτυξη θετικού φορτίου (p). Στο πάνω μέρος του ηλιακού κελιού προστίθεται συνήθως φώσφορος, το οποίο δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο οδηγώντας στην ανάπτυξη αρνητικού φορτίου (n).

Τα ηλιακά κελιά έχουν συνήθως τετράγωνο σχήμα πλευράς περίπου 10 εκατοστών. Ένα ηλιακό κελί παράγει πολύ μικρή ισχύ (συνήθως λιγότερο από 2W) και έτσι ενώνονται ηλεκτρικά εν σειρά ή εν παραλλήλω, όπως θα αναλυθεί παρακάτω για να δημιουργηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

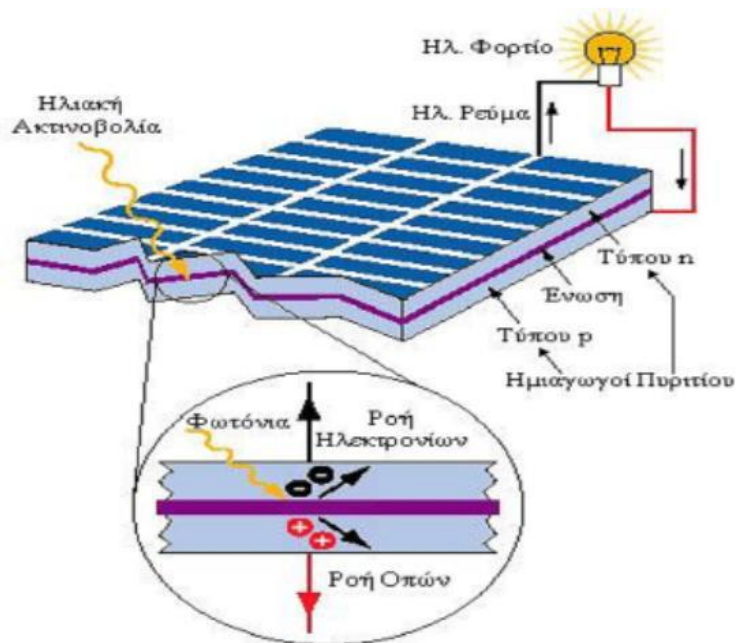
Η απόδοση των ηλιακών κελιών, εκφραζόμενη ως το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, εξαρτάται από την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται. Σε ερευνητικό επίπεδο έχουν αναφερθεί αποδόσεις έως και 40%. Ωστόσο η πλειονότητα των ηλιακών κελιών και των δημιουργούμενων φωτοβολταϊκών πλαίσια που διατίθενται σήμερα στο εμπόριο έχουν μία μέγιστη απόδοση της τάξης του 10-20%.

1.5 Αρχή Λειτουργίας

Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο από πυρίτιο είναι κατασκευασμένο από μία ειδική ημιαγωγική δίοδο (φωτοδίοδο), στην οποία παρατηρούμε μια ροή ηλεκτρικών φορέων όταν αυτό δεχθεί φως.

Όπως προαναφέραμε, όταν το φως χτυπήσει το κύτταρο, τότε τα φωτόνια απορροφούνται από τα ηλεκτρόνια του πυριτίου.

Η ενέργεια των φωτονίων διεγείρει τα ηλεκτρόνια σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, οπότε αυτά κινούνται αφήνοντας πίσω τους μία οπή. Έτσι λοιπόν τα απορροφούμενα φωτόνια δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Το ηλεκτρικό πεδίο διαχωρίζει τα ηλεκτρόνια από τις οπές και η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται κυμαίνεται μεταξύ 0.5-0.6 Volts. Η ύπαρξη των ηλεκτρικών φορέων και της διαφοράς δυναμικού δημιουργούν ένα ρεύμα το οποίο μπορεί να διαρρέει ένα εξωτερικό κλειστό κύκλωμα.



Σχήμα 1.2: Βασική δομή ενός ηλιακού κελιού [5], [6]

Η καρδιά του Φ/Β συστήματος είναι προφανώς τα φωτοβολταϊκά κελιά. Αν και υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες διαφορετικές μεταξύ τους, η πιο συνήθης είναι αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου. Η πρώτη ύλη για την παραγωγή αυτών των φωτοβολταϊκών είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) που το παίρνουμε από χαλαζιακά πετρώματα που χρησιμοποιούνται επίσης και για την κατασκευή των chips στους υπολογιστές.



Σχήμα 1.3: Πυρίτιο σε αρχική μη επεξεργασμένη μορφή [5]

1.6 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι αδιαμφισβήτητα. Στην παρούσα εργασία αναφέρονται ενδεικτικά τα κυριότερα από τα πλεονεκτήματα των Φωτοβολταϊκών σχετικά με το περιβάλλον. [7] , [8]

- Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη.
- Η ηλιακή ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία τους είναι παντού και δωρεάν διαθέσιμη.
- Με βάση το σημερινό ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα και τις μέσες απώλειες του δικτύου κάθε 1KWh που παράγεται από φωτοβολταϊκά, και άρα όχι από συμβατικά καύσιμα, συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης περίπου 1kg διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα
- 1kW φωτοβολταϊκών αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση 1,3 tη διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).
- Χρειάζονται 2 στρέμματα δάσους για να απορροφήσουν 1,3 tη διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).
- Από περιβαλλοντική άποψη, αποφεύγοντας 1,3 τόνους CO_2 ετησίως είναι σαν να κάνει ένα μέσο αυτοκίνητο 7000 χιλιόμετρα λιγότερα κάθε χρόνο.
- Η λειτουργία τους είναι σχεδόν αθόρυβη .
- Η λειτουργία τους είναι απόλυτα φιλική προς το περιβάλλον.
- Μικρές σχετικά απαιτήσεις συντήρησης.
- Η οπτική ρύπανση και η αντανάκλαση που δημιουργούν σχεδόν αμελητέες.
- Νέες θέσεις εργασίας δημιουργούνται.
- Κάλυψη ημερησίων και εποχιακών φορτίων αιχμής ηλεκτρισμού με ανακούφιση και ενεργειακή ασφάλεια του ηλεκτρικού δικτύου.
- Η υποκατάσταση ρυπογόνων καυσίμων από φωτοβολταϊκά συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές επιβλαβών αερίων και άλλων επικίνδυνων ρύπων (όπως τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, οι ενώσεις του θείου κ.λπ.). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα πυροδοτούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ρυπαίνουν τα ύδατα, αλλάζουν το κλίμα της Γης, ενώ η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, το περιβάλλον.
- Αποκεντρώνεται η παραγωγή ενέργειας και ενισχύεται η χρήση ΑΠΕ έναντι των ρυπογόνων συμβατικών τρόπων παραγωγής ενέργειας.

Οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και τα ενεργειακά δίκτυα σε όλη την Ευρώπη είναι πλέον γερασμένα και χρειάζεται να αναβαθμιστούν επείγοντως.

Τεχνοοικονομικά, με βαρύτητα στον παράγοντα κόστους, μια νέα γραμμή μεταφοράς έχει πολύ υψηλό κόστος, αν λάβουμε υπόψη μας πέρα από τον τεχνολογικό εξοπλισμό και και την εξάντληση των πεπερασμένων φυσικών πόρων. Η αναβάθμιση αυτή σίγουρα κοστίζει ακριβά, τίθεται λοιπόν το ερώτημα πού πρέπει να επενδύσουν οι ευρωπαϊκές κυβερνήσεις, στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή τη συμβατική παραγωγή.

Ο Ευρωπαϊκός Οδικός Χάρτης για την Ενέργεια 2050, είναι μία πρώτη επίσημη προσπάθεια για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα και να οδηγήσει τις μελλοντικές πολιτικές αποφάσεις στον ενεργειακό τομέα, με την εξοικονόμηση ενέργειας και τις ΑΠΕ να βρίσκονται σε πρωταγωνιστικό ρόλο. Όλα τα σενάρια απαιτούν:

- Σημαντική αύξηση της εξοικονόμησης ενέργειας και της ενεργειακής αποδοτικότητας
- Σημαντική αύξηση των ΑΠΕ.

Ακόμα και στα σενάρια που προβλέπουν υψηλή διείσδυση της πυρηνικής ενέργειας ή της δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, οι ΑΠΕ καλύπτουν κατ' ελάχιστον το 55% της τελικής χρήσης ενέργειας.

Βάσει επίσημων στοιχείων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τουλάχιστον το 60% της ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα χάνεται πριν φτάσει στα νοικοκυριά. Κατά συνέπεια, η Επιτροπή των Περιφερειών υπογραμμίζει ότι οι πόλεις και οι περιφέρειες θα πρέπει να ενθαρρύνονται περισσότερο για να αναπτύσσουν συστήματα και τεχνολογίες αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας διότι έτσι καταπολεμάται η διαμόρφωση μονοπωλίων στον τομέα της ενέργειας, δραστηριοποιούνται περισσότερο οι πολίτες, το περιβάλλον ωφελείται και, συνεπώς, γίνεται καλύτερα αποδεκτή η πιο βιώσιμη παραγωγή ενέργειας.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας σχετικά με τις συμβατικές πηγές, είναι η ομαλή κατανομή της στο χώρο. Έτσι δεν είμαστε υποχρεωμένοι να μεταφέρουμε την ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιούμε μικρά ηλιακά συστήματα, συχνά χαμηλής ή μέσης τεχνολογίας, έχοντας το πλεονέκτημα μικρών απωλειών μεταφοράς, ειδικά στις περιπτώσεις ηλιακών – φωτοβολταϊκών συστημάτων που βρίσκονται κοντά στον αστικό ιστό.

Οι διάφοροι μικροί παραγωγοί ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ιδανική λύση για τη μελλοντική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιπτώσεις όπου αμφισβητείται η ασφάλεια της παροχής. Η τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν δοκιμάζεται από δαπανηρές ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει το ηλεκτρικό δίκτυο (απώλειες, οι οποίες στην Ελλάδα ανέρχονται σε 10% κατά μέσο όρο).

Με βάση το γράφημα του EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION (EPIA) είναι εμφανές ότι το κόστος της συμβατικής Ηλεκτρικής ενέργειας θα τείνει συνεχώς αυξανόμενο λόγω της συνεχούς αύξησης της ζήτησης αλλά και των ανοδικών μεταβολών των τιμών πετρελαίου και φυσικού αερίου, που αποτελούν απαραίτητα καύσιμα για την πλειονότητα των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη, αυτή τη χρονική διάρκεια το κόστος Παραγωγής Φ/Β στοιχείων τείνει συνεχώς να μειώνεται λόγω της καμπύλης εκμάθησης (επαναλαμβανόμενοι στόχοι αποφέρουν μια βελτίωση στην απόδοση), αλλά και της Οικονομίας Κλίμακας (διαδικασίες και επιχειρησιακές δραστηριότητες πολύ μεγάλων εταιριών που λειτουργούν σε σταθερά περιβάλλοντα σε συνδυασμό με βελτιωμένες τεχνολογικές

διαδικασίες των εργοστασίων). Γενικώς, η αγορά των Φ/Β παρουσίασε μια πτώση στις τιμές της ως και 50% τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 1.4: Μακροπρόθεσμη μείωση τιμών ηλεκτρισμού μέσω της Φ/Β τεχνολογίας [5]

1.7 Μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων

Λιγοστά είναι τα μειονεκτήματα των Φ/Β στοιχείων και μπορούμε να τα απαριθμήσουμε στα παρακάτω:

- Αδυναμία 24ώρης αδιάλειπτης λειτουργίας.
- Κυμαινόμενη απόδοση κατά την διάρκεια του έτους.
- Απουσία επίσημης και απόλυτα υποχρεωτικής-δεσμευτικής οδηγίας ανακύκλωσης Φ/Β πλαισίων

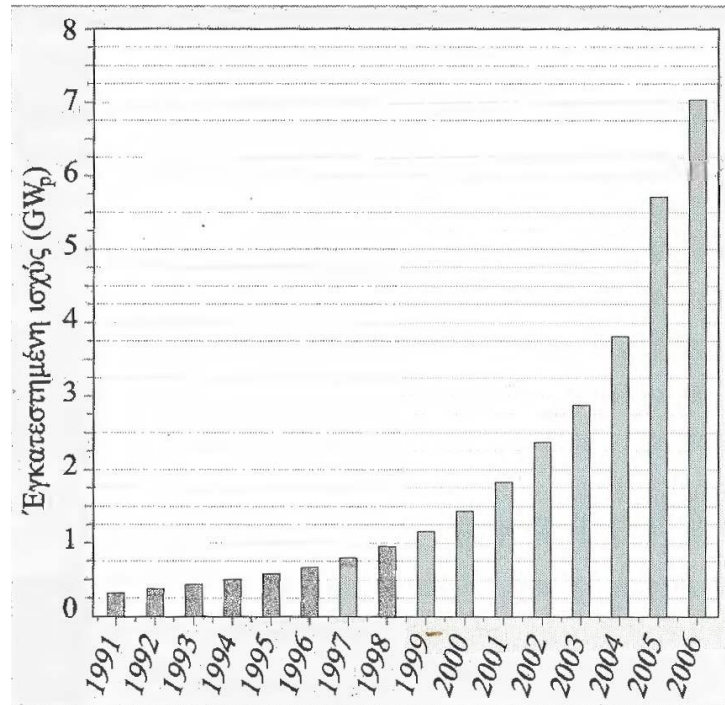
1.8 Η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς στην Ελλάδα και παγκοσμίως

Η παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ συστημάτων, από 313,5MWp, το 1991, έφτασε τα 7,04GWp, στο τέλος του 2006, πίνακας 1.1. Απ' αυτά, περίπου 3,42 GWp, αφορούν σε εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη, ~0,48GWp στις ΗΠΑ και ~1,33GWp, στην Ιαπωνία [9].

Όπως προκύπτει από το σχήμα 1.5, η ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά την χρονική αυτή περίοδο, παρουσίασε ραγδαία αύξηση, από 18,5% το 1992 σε 29,3% το 2002 και έφτασε στο 30,4% το 2006.

Μεγάλοι ΦΒ σταθμοί έχουν εγκατασταθεί στις ΗΠΑ (Hesperia, 1MW, 1982 – Tuscon, 2,4MWp, 2002) και στην Ευρώπη (Ισπανία, 1MWp, 1994 – Ιταλία, Vasto 1MWp, Serre 3,3MWp, 1994 –

Γερμανία, Bustadt 5MWp, Bavaria, Pooking 10MWp – Πορτογαλία, Sepra 11MWp – Ισπανία, Beneixama 20MWp).



Σχήμα 1.5: Χρονική εξέλιξη της παγκοσμίως εγκατεστημένης ισχύος αιχμής σε GW_p ΦΒ συστημάτων, στο διάστημα 1991-2006 [9].

Χώρα	Εγκατεστημένη ισχύς (2006)		
	Αιολικά (GW)	Φωτοβολταϊκά (MW _p)	
Ευρώπη	Γερμανία	20,60	3063,0
	Ισπανία	11,85	118,1
	Δανία	3,14	2,9
	Ιταλία	2,12	57,9
	Ολλανδία	1,61	51,2
	Ηνωμένο Βασίλειο (UK)	1,96	13,6
	Ελλάς	0,75	6,7
	Ευρώπη	48,0	3,42
Ινδία	6,28	245,0	
Ιαπωνία	1,59	1700,0	
Κίνα	2,30	(2005) 75,0	
ΗΠΑ	11,60	600,0	
Παγκοσμίως	74,20	7044,0	

Σχήμα1.6: Εγκατεστημένη ισχύς Αιολικών και Φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες και παγκοσμίως [9].

Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β συστημάτων, με στοιχεία του 2009, ανερχόταν σε 37MW_p.

Στο σχήμα 1.7 βλέπουμε συγκεντρωτικά την εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ συστημάτων από το 2000 έως το 2009 .

Φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκονται διεσπαρμένα σε διάφορες περιοχές, κυρίως νησιωτικές, ιδιαίτερα στην Κρήτη. Μερικά από τα εγκατεστημένα συστήματα αποτελούνται από μικρούς Φ/Β σταθμούς σε συνεργασία με αιολικά συστήματα και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, όπως π.χ. στη νήσο Κύθνο (100kW_p), και στη νήσο Γαύδο (30kW_p) καθώς και Φ/Β αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά.

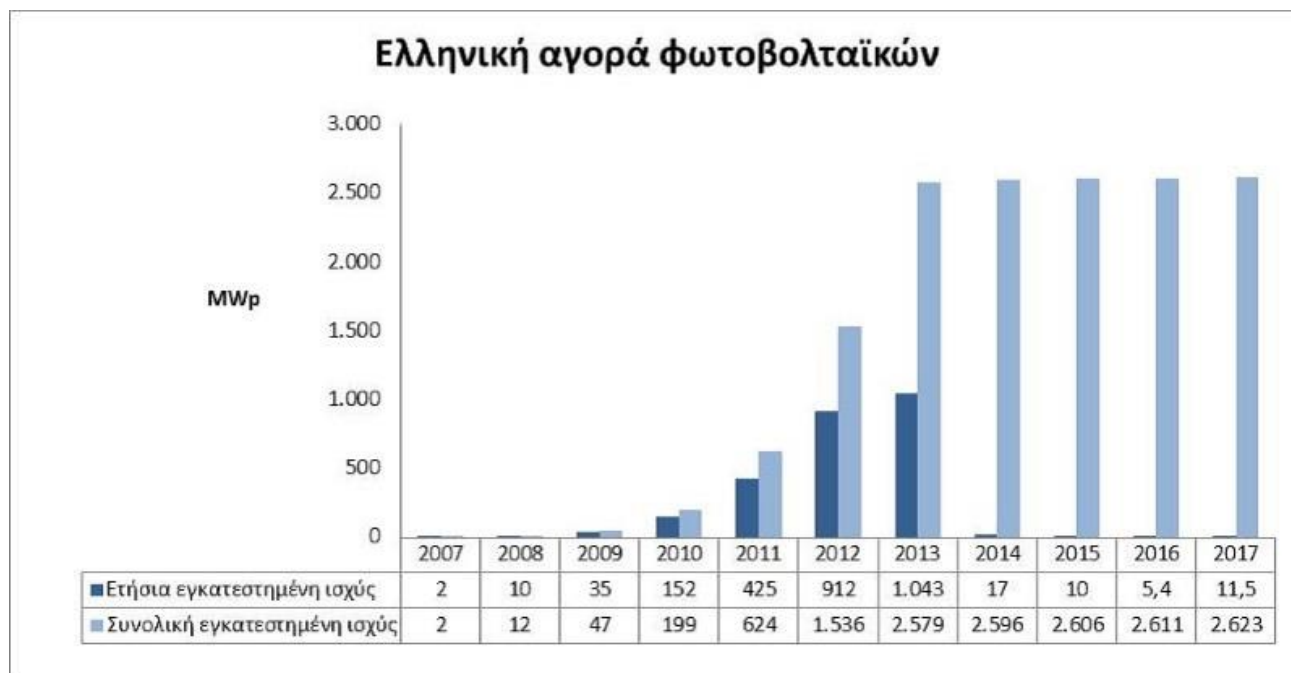
Μικρής ισχύος Φ/Β συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε φάρους αυτόνομης λειτουργίας. Επίσης, έχουν τεθεί σε δοκιμαστική λειτουργία ΦΒ ψυγεία πρόψυξης γάλακτος, σε κτηνοτροφικές περιοχές (Πράσες Χανίων Κρήτης, 8kW_p). Μέχρι το 1991, οπότε και άρχισε η σταδιακή απόσυρση των εγκαταστάσεών του, βρισκόταν σε λειτουργία στην Αγία Ρούμελη, κοντά στα Σφακιά (Νοτιοδυτική Κρήτη), ο πρώτος στην Ευρώπη (1982), πιλοτικός Φ/Β σταθμός με ισχύ 50kW_p, υπό την ευθύνη της ΔΕΗ.

Εγκατεστημένη Ισχύς Ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β (MW)

Έτος	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
MW	0	1	1	1	1	1	1	5	9	37

Σχήμα 1.7: Εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ στην Ελλάδα (Πηγή: 5^η Ετήσια Έκθεση για το επίπεδο διεύθυνσης της ανανεώσιμης ενέργειας του Υ.Π.Ε.Κ.Α./2010).

Σύμφωνα με στοιχεία του Συνδέσμου Εταιριών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ) το 2017, η νέα εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών της Ελλάδας ανήλθε σε μόλις 11,5 MWp, με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ αυτών να φθάνει τα 2.623 MWp, εκ των οποίων τα 2.071 MWp επί εδάφους και τα υπόλοιπα σε στέγες κτιρίων.



Σχήμα 1.8: Εγκατεστημένη ισχύς φ/β στην ελληνική αγορά.

1.9 Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα για το 2017

Στα τέλη του 2017 στην Ελλάδα ήταν εγκατεστημένα 2.624 μεγαβάτ (MWp) φωτοβολταϊκών, εκ των οποίων τα 2.072 MWp επί εδάφους και τα υπόλοιπα σε στέγες κτιρίων.

1. Δέσμευση γης

Η προβολή στο οριζόντιο επίπεδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων των 2.072 MWp καλύπτει περίπου 12.400 στρέμματα, είναι δηλαδή λίγο μικρότερη από την έκταση του Δήμου Αμαρουσίου στην Αττική ή του Δήμου Νεάπολης-Συκεών στη Θεσσαλονίκη.

Η συνολική έκταση που δεσμεύουν αυτά τα 2.072 MWp (μαζί με τα διάκενα μεταξύ των φωτοβολταϊκών συστοιχιών και την περιμετρική απόσταση ασφαλείας από τα όρια των γηπέδων) είναι περίπου 40.000 στρέμματα, όση δηλαδή είναι η έκταση του Δήμου Αθηναίων.

Για σύγκριση, η έκταση που καταλαμβάνουν οι λιγνιτικοί σταθμοί και τα λιγνιτωρυχεία είναι, σύμφωνα με τη ΔΕΗ, 253.000 στρέμματα, είναι δηλαδή 6,3 φορές μεγαλύτερη από την έκταση που δεσμεύουν τα φωτοβολταϊκά.

Σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ, η γεωργική γη στην Ελλάδα ανέρχεται σε 32,8 εκατ. στρέμματα (στατιστικά για το 2015 δημοσιευμένα το Νοέμβριο του 2017), εκ των οποίων καλλιεργούνται τα 29,2 εκατ. στρέμματα. Αυτό σημαίνει ότι τα φωτοβολταϊκά δεσμεύουν το 0,12% της γεωργικής γης ή αλλιώς το 0,03% της έκτασης της χώρας.

Η γεωργική έκταση που μένει ακαλλιέργητη είναι 92 φορές μεγαλύτερη από την έκταση που δεσμεύουν τα φωτοβολταϊκά.

2. Κατανάλωση νερού

Για τον καθαρισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων απαιτούνται κατά μέσο όρο 0,114 m³ νερού ανά παραγόμενη MWh (εύρος τιμών 0,1-0,13 m³/MWh). Η ποσότητα αυτή είναι 30,5 φορές μικρότερη ανά παραγόμενη MWh από ένα λιγνιτικό σταθμό (σύμφωνα με τη ΔΕΗ, οι λιγνιτικοί σταθμοί καταναλώνουν κατά μέσο όρο 3,477m³ νερού ανά παραγόμενη MWh).

Το 2017 παρήχθησαν περίπου 4 TWh από τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά, δηλαδή απαιτήθηκαν περίπου 456.000 m³ νερού για τον καθαρισμό των φωτοβολταϊκών, όσο δηλαδή καταναλώνουν ετησίως 4.650 νοικοκυριά.

3. Αποσόβηση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα

Στις θετικές περιβαλλοντικές επιδόσεις, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά το 2017 αποσόβησε την έκλυση περίπου 3,96 εκατ. τόνων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα.

1.10 Προβλέψεις για Εγκατεστημένη Ισχύς Ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β (MW)

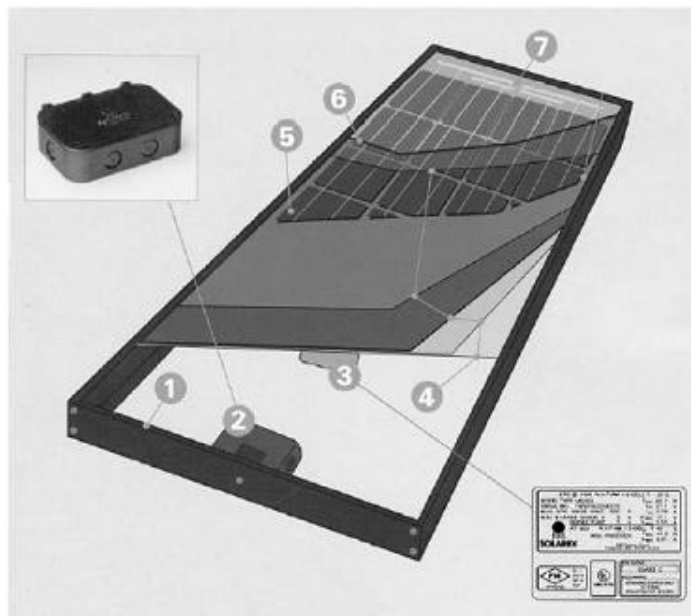
έτος	2025	2030	2050
MW	188	2033	68000

Σχήμα 1.8: Προβλέψεις για Εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ στην Ελλάδα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

2.1 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

Με τον όρο φωτοβολταϊκό πλαίσιο εννοούμε το σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων (κυττάρων) που είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατασκευάζονται σε μορφή σάντουιτς. Πάνω σε ένα φύλλο από μέταλλο, το οποίο είναι συνήθως αλουμίνιο, ή από ενισχυμένο πλαστικό, στερεώνονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα σε σειρά ή και παράλληλα, με κολλητική ουσία. Το φύλλο αυτό αποτελεί την πλάτη τον πλαισίου. Η εμπρός όψη των στοιχείων καλύπτεται από προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Τα δυο φύλλα, εμπρός και πίσω, συγκρατούνται μεταξύ τους με την βοήθεια ταινίας από συνθετικό πλαστικό και συσφίγγονται με περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Η κατασκευή αυτή εξασφαλίζει την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις υποδοχές στήριξης και αυξημένη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία και το νερό.

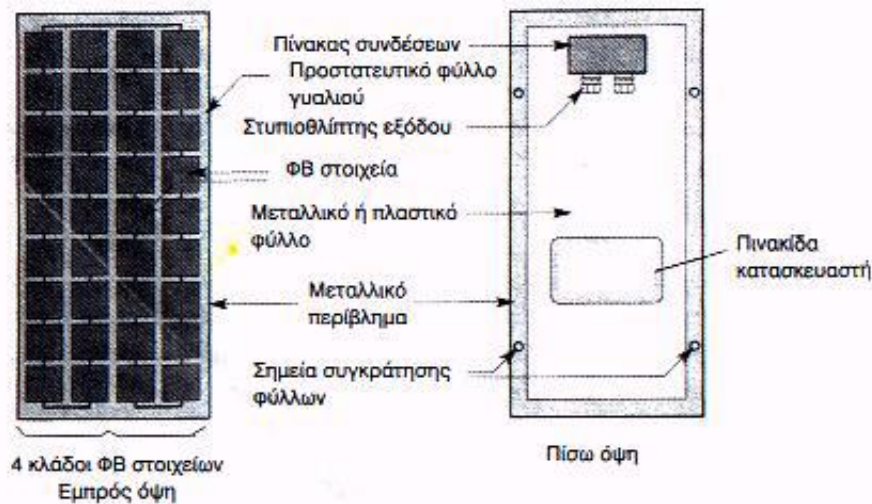


Σχήμα 2.1 1)πλάισιο, 2)αδιάβροχο κουτί σύνδεσης, 3)πινακίδα χαρακτηριστικών, 4)προστασία από τον καιρό που προσφέρει τριάντα χρόνια ζωής, 5)φωτοβολταϊκά κύτταρα, 6)μπροστινό τζάμι υψηλής διαφάνειας, 7)ηλεκτρικές συνδέσεις

2.2 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Η βασική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όπως είπαμε είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο ή φωτοστοιχείο ή ηλιακό κύτταρο ή φωτοβολταϊκό κύτταρο ή κυψέλη. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου. Ο απλούστερος τύπος ενός ηλιακού κυττάρου είναι μια p-n επαφή. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση της

ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει από μέχρι 0.5-1.0 Voh και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά τετραγωνικό cm της επιφάνειάς του. Το πυρίτιο είναι ημιαγωγός έμμεσου ενεργειακού διακένου και αποτελεί το βασικότερο υλικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων μια και αποτελεί το κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή ημιαγωγών [10].



Σχήμα 2.2: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες φωτοβολταϊκού πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου.

Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει μεταλλική λάμψη, είναι σκληρό και έχει σκούρο γκρι χρώμα. Είναι σε στερεά κατάσταση σε θερμοκρασία δωματίου και δεν είναι ελατό και όλκιμο. Είναι ημιαγωγός και την ιδιότητα του αυτή την διατηρεί ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ είναι κακός αγωγός της θερμότητας. Ως στοιχείο, το πυρίτιο δεν απαντάται ελεύθερο στη φύση. Τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα του πυριτίου αποτελούν το 87% τον φλοιού της Γης, με χαρακτηριστικότερη την άμμο, η οποία είναι άφθονη. Ανάλογα με την δομή τον βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο κατασκευής τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου διακρίνονται σε τέσσερις τύπους:

- Στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si)

Με αυτό το είδος στοιχείων θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία.

Τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία αποτελούνται από μεγάλους κρυστάλλους, το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (περίπου 300 μm) και έχουν χρώμα σκούρο μπλε. Για να κατασκευαστεί ένα κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου, είναι απαραίτητο ένα καθαρό ημιαγωγίμο υλικό. Μονοκρυσταλλικές ράβδοι κατασκευάζονται από λιωμένο πυρίτιο και κατόπιν κόβονται σε λεπτά φύλλα. Αυτή η διαδικασία παραγωγής εγγυάται ένα σχετικά υψηλό επίπεδο

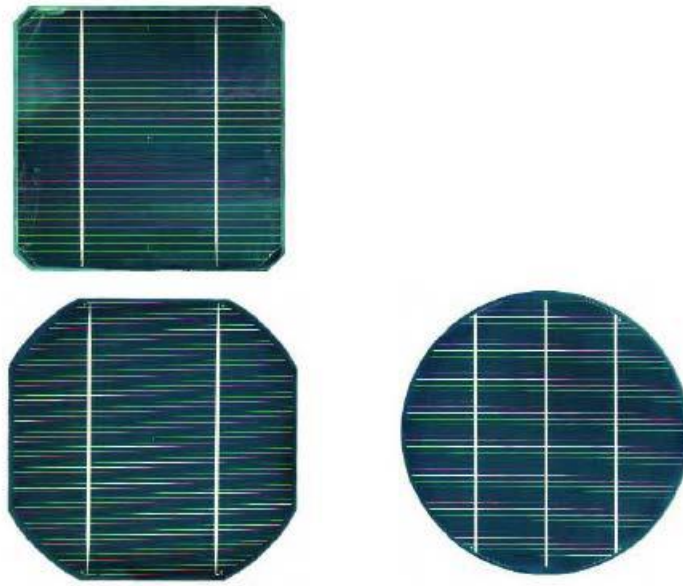
αποδοτικότητας. Σε εργαστηριακή μορφή το φωτοβολταϊκό στοιχείο sc-Si έχει απόδοση 21-24,7%, ενώ σε επίπεδο φωτοβολταϊκών πλαισίων η απόδοση είναι 13-16%.

Το μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέση απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε έως μαύρο όταν διαθέτουν αντί-ανακλαστική (AR) επίστρωση ή γκρι (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση).



Σχήμα 2.3: Φωτοβολταϊκό στοιχείο από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

Τα ηλιακά κελιά κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου, ή σχεδόν κύκλου καθώς και τετράγωνα. Τα κυκλικά ηλιακά κελιά είναι φθηνότερα από τα υπόλοιπα επειδή είναι λιγότερα τα υπολείμματα κατά την κατασκευή τους. Ωστόσο δε χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων επειδή δεν χρησιμοποιείται αποδοτικά μία επιφάνεια, λόγω των κενών μεταξύ τους όταν τοποθετούνται δίπλα το ένα στο άλλο. Αποτελούν όμως μία καλή προοπτική για ενσωμάτωση σε κτίρια όταν απαιτείται μερική διαπερατότητα στο φως.



Σχήμα 2.4: Μορφή Φωτοβολταϊκών στοιχείων μονοκρυσταλλικής τεχνολογίας

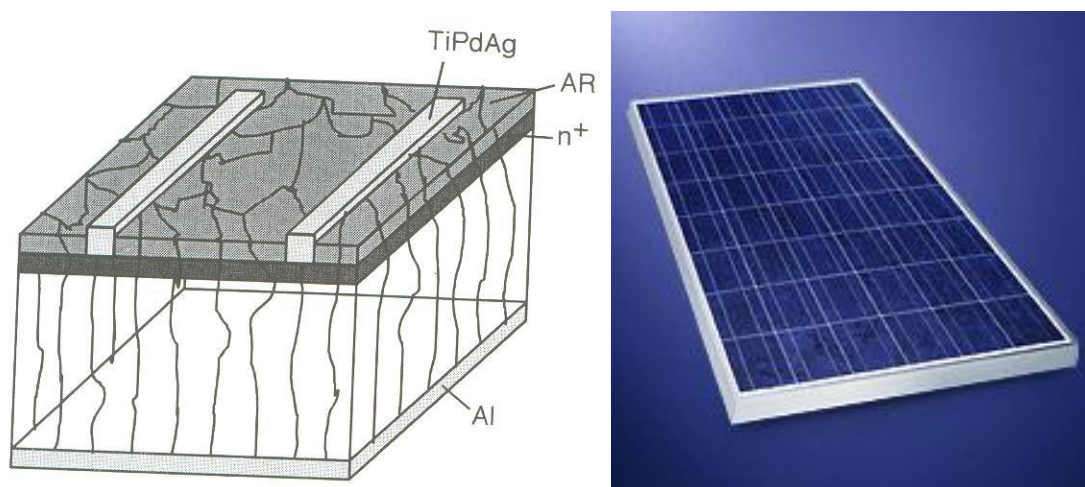
Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι η μέθοδος Czochralski (CZ) και η μέθοδος floatzone (FZ). Και με τις δύο διαδικασίες προκύπτει μια ράβδος μονοκρυσταλλικού πυριτίου η οποία έχει θερμανθεί σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Στη συνέχεια η ράβδος αυτή κόβεται με laser σε μικρά δισκία (wafer).

Στη μέθοδο Czochralski (CZ), υψηλής καθαρότητας, ημιαγωγός πυριτίου λιώνεται σε μία χοάνη, κατασκευασμένη συνήθως από χαλαζία (διοξείδιο πυριτίου SiO_2). Έπειτα, ανόθευτα άτομα υλικού πρόσμιξης, όπως το βόριο ή ο φώσφορος, προστίθενται στο λιωμένο πυρίτιο σε συγκεκριμένες ποσότητες δημιουργώντας πυρίτιο με προσμίξεις, με αποτέλεσμα τη μετατροπή του πυριτίου σε n-τύπου ή p-τύπου. Αυτό επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυριτίου. Στη συνέχεια, μια προσανατολισμένη (με ακρίβεια) ράβδος κρυστάλλου βυθίζεται στο λιωμένο πυρίτιο και τραβιέται αργά προς τα πάνω ενώ ταυτόχρονα περιστρέφεται. Με τον ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας, του ποσοστού τραβήγματος και της ταχύτητας περιστροφής, είναι δυνατόν να εξαχθεί (κατασκευαστεί) μια μεγάλη, μονοκρυσταλλική, κυλινδρική ράβδος από το τήγμα πυριτίου.

- Στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)

Η κατασκευή των πολυκρυσταλλικών κυττάρων είναι η λιγότερο δαπανηρή σε σχέση με την αντίστοιχη των μονοκρυσταλλικών κυττάρων. Σε αυτή τη διαδικασία κόβονται σε στοιχεία τετραγωνικής μορφής και αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα πάχους 10-50mm. Κατά τη

διάρκεια στερεοποίησης του υλικού, κρυσταλλικές δομές ποικίλων μεγεθών σχηματίζονται, στα άκρα των οποίων εμφανίζονται ατέλειες. Σαν αποτέλεσμα αυτής της κρυσταλλικής ατέλειας το συγκεκριμένο ηλιακό κύτταρο είναι λιγότερο αποδοτικό. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές (Σχήμα 2.5). Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία επιτυγχάνουμε αποδόσεις από 13% έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι-ασημί (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS, η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση") και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



Σχήμα 2.5: (α) ηλιακό κύτταρο πολυκρυσταλλικού πυριτίου, (β) Φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

- Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Άμορφου Πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο είναι μία μη-κρυσταλλική μορφή πυριτίου και έχει 40 φορές μεγαλύτερο βαθμό απορρόφησης του φωτός σε σύγκριση με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο [11]. Τα άτομα του άμορφου πυριτίου είναι διατεταγμένα με τυχαίο τρόπο. Δηλαδή, τα άτομα βρίσκονται σε τυχαίες αποστάσεις μεταξύ τους και οι γωνίες των ομοιοπολικών δεσμών τους δεν είναι συγκεκριμένες [12].

Η τυχαία κατανομή των ατόμων επηρεάζει σημαντικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού, δίνοντας έτσι στο υλικό υψηλό ενεργειακό διάκενο, του οποίου η τιμή είναι 1,7 eV, σε σχέση με

το κρυσταλλικό πυρίτιο που έχει 1,1 eV. Το μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο επιτρέπει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου να απορροφούν το ορατό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας πιο αποτελεσματικά από το υπέρυθρο. [13,14]

Ωστόσο, η άμορφη μορφή του πυριτίου και οι ατέλειες των δεσμών του έχουν αρνητικές επιπτώσεις στις οπτικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες του. Για τη βελτίωση της ποιότητας του υλικού και την ενίσχυση της σταθερότητας του γίνεται προσθήκη ατόμων υδρογόνου. Έτσι τελικά το άμορφο πυρίτιο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ένα κράμα πυριτίου με υδρογόνο.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) αποτελούν μία από τις πρώτες τεχνολογίες λεπτών υμενίων που αναπτύχθηκαν και είναι τα πιο γνωστά φ/β στοιχεία αυτής της τεχνολογίας [6,20]. Οι αποδόσεις των εμπορικών φ/β στοιχείων άμορφου πυριτίου είναι από 6 ως 8%, ενώ στο εργαστήριο έχει επιτευχθεί απόδοση ως και 14%. Το πάχος του άμορφου πυριτίου είναι 1μm ενώ το υπόστρωμα υποστήριξης στο οποίο γίνεται η εναπόθεση των λεπτών στρωμάτων πυριτίου (a-Si) έχει πάχος 1-3mm. [15]

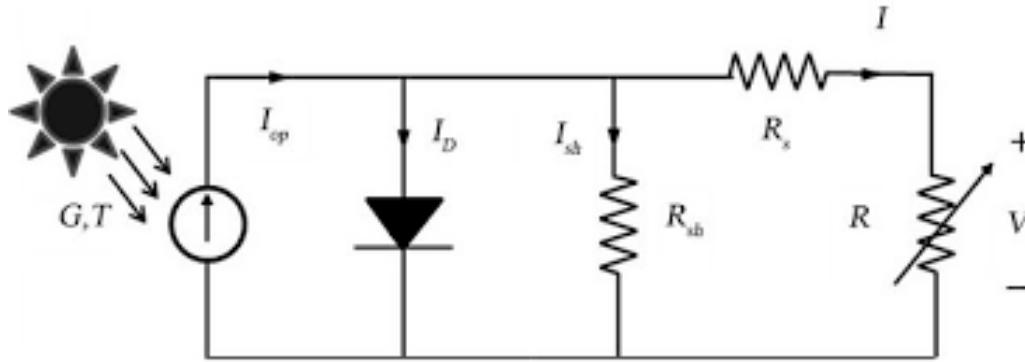
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζονται από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φ/β , όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συνθήκες συννεφιάς). [15]

Το κυριότερο μειονέκτημα, όμως, αυτού του τύπου φ/β στοιχείων (a-Si) είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα, κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φ/β στοιχεία. [15]

2.3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

2.3.1 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση

Για να γίνει μια εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος 2.6 παρακάτω. Στο ισοδύναμο αυτό δε συμπεριλαμβάνεται η αντίσταση λόγω της κίνησης των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, όπως ακόμα και η μη άπειρη αντίσταση διαμέσου της διόδου και τα αναπόφευκτα ρεύματα διαρροής.



Σχήμα 2.6: Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Η βασική εξίσωση του ιδανικού ηλιακού κυττάρου είναι η εξής:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) I_L$$

όπου I = το ρεύμα του κυττάρου.

V = η τάση του κυττάρου.

I_L = το φωτόρευμα.

Το ανάστροφο αυτό ρεύμα που οφείλεται σε φορείς μειονότητας που κινούνται λόγω θερμικής κίνησης ονομάζεται ρεύμα κόρου (saturation current).

I_0 = το ρεύμα κόρου της διόδου που δίνεται από τη σχέση

$$I_0 = A \left(\frac{qD_e N_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h N_i^2}{L_h N_D} \right)$$

Όπου

A = διατομή του κυττάρου.

L_e = μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων

D_e = διάρκεια ζωής ηλεκτρονίων σαν φορέων μειονότητας = ο χρόνος μεταξύ της δημιουργίας ενός φορέα σε υλικό που αποτελεί φορέα μειονότητας και της επανασύνδεσης του με φορέα πλειονότητας.

L_h = μήκος διάχυσης οπών

t_h = διάρκεια ζωής οπών σαν φορέων μειονότητας.

Το ρεύμα κόρου (saturation current) είναι το ανάστροφο ρεύμα που οφείλεται σε φορείς μειονότητας που κινούνται λόγω θερμικής κίνησης.

Ωστόσο στην πράξη κανένα ηλιακό κύτταρο δεν είναι ιδανικό γι' αυτό τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός την αντίσταση

απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, που είναι παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου, αφετέρου την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.

Η χαρακτηριστική εξίσωση για το παραπάνω ηλιακό κύτταρο είναι η εξής:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}}$$

όπου I = το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου.

I_L = φωτόρευμα.

I_0 = ρεύμα κόρου διόδου.

q = φορτίο ηλεκτρονίου.

V = τάση στην έξοδο του κυττάρου.

R = σε σειρά αντίσταση του κυττάρου. Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου-n) που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού-ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Τυπικές τιμές της R_s , για καλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία: 0,1 Ω έως 0,3 Ω.

$V + IR_s = V_D$ = τάση της διόδου επαφής μέσα στο κύτταρο.

A = σταθερά με τιμές 1 και 2. Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής.

K = Σταθερά Boltzmann.

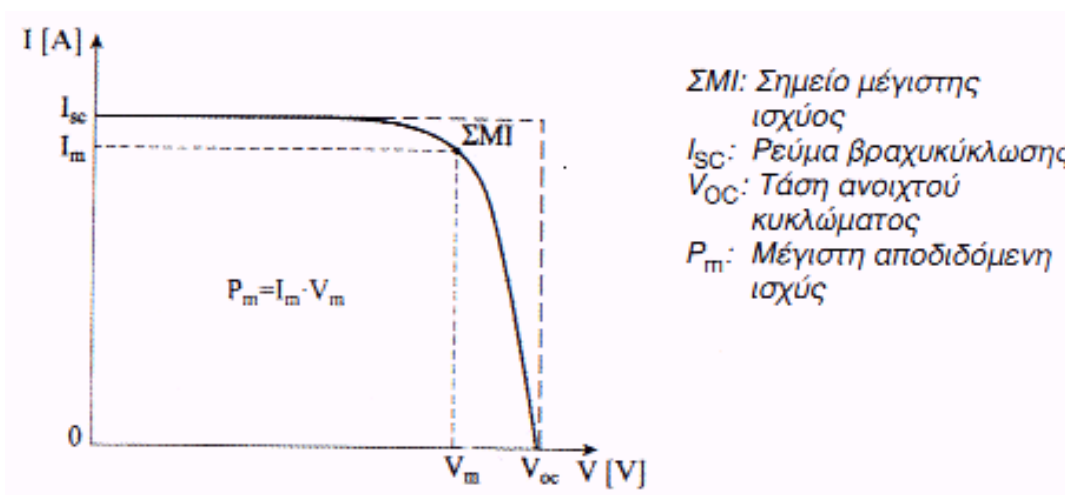
T = απόλυτη θερμοκρασία.

R_{sh} = παράλληλη αντίσταση του κυττάρου. Σχετίζεται με τη διαρροή του ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Η τιμή της R_{sh} σε πολύ καλής απόδοσης Φ/Β στοιχεία είναι μεγαλύτερη των 103 Ω.

2.3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος του κυκλώματος, έστω και αν έχουμε σταθερή ακτινοβολία. Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, που έχουμε μηδενική τιμή αντίστασης, η τάση μηδενίζεται και η ένταση τον ρεύματος παίρνει την μέγιστη τιμή I_{sc} . Αντιθέτως στην περίπτωση ανοιχτοκυκλώματος, που η τιμή της αντίστασης τείνει στο άπειρο και η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται, η τάση παίρνει την μέγιστη τιμή V_{oc} . Οι μεταβολές της έντασης και της τάσης φαίνονται στο σχήμα 2.7, το οποίο αποτελεί την χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η καμπύλη αυτή δημιουργείται σε συνθήκες σταθερής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για τιμή αντίστασης τον κυκλώματος από μηδέν μέχρι άπειρο.

Όπως βλέπουμε στην χαρακτηριστική καμπύλη, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες τιμές. Η ισχύς του πλαισίου για συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι σταθερή, εξαρτάται από το σημείο της καμπύλης που βρισκόμαστε κάθε φορά. Στην βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η τιμή της ηλεκτρικής ισχύος, που δίνεται από τον τύπο $P=I \cdot V$, είναι μηδενική. Το σημείο που έχουμε μέγιστη ισχύ ($P_m = I_m \cdot V_m$) βρίσκεται σε όλες τις χαρακτηριστικές ακριβώς εκεί στο γόνατο της καμπύλης. Η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς P_m ισούται με το εμβαδόν τον ορθογώνιου παραλληλογράμμου το οποίο σχηματίζεται ανάμεσα στην χαρακτηριστική καμπύλη με πλευρές I_m και V_m , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 [16].



Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος – τάσεως ενός φ/β στοιχείου.

2.4 Βαθμός απόδοσης και παράγοντες που τον επηρεάζουν

Ο βαθμός απόδοσης ενός φ/β στοιχείου η_m ορίζεται ως το πηλίκο της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύς προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας.

$$N_m = (I_m * V_m) / P_{HA}$$

Οπού P_{HA} είναι η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τέλος, ο βαθμός απόδοσης ενός πλαισίου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{G \times A} = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{G \times A}$$

Όπου:

A= το εμβαδόν της επιφάνειας του πλαισίου σε m² και

G = η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε αυτήν την επιφάνεια σε Watt/m^2 .

Γενικά ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Ενδιαφέρον έχει η μελέτη των παραγόντων που τον επηρεάζουν. Μερικοί από αυτούς είναι:

α) Ανάκλαση.

Η επιφάνεια πυριτίου ανακλά ένα ποσοστό περίπου 30% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η επεξεργασία της επιφάνειας με χημικά μέσα ή η επίστρωση με αντανάκλαστικά υλικά περιορίζει τις ανακλάσεις μέχρι και το 3%.

β) Ατελής εκμετάλλευση της ενέργειας των φωτονίων.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος έχει διαφορετικές εντάσεις με ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Στον κρύσταλλο προσπίπτουν φωτόνια που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών ενέργειας τα οποία είναι δυνατόν ή να διαπεράσουν το κύτταρο ή να δημιουργήσουν ζεύγος ηλεκτρονίων- οπών και η επιπλέον ενέργεια τους να μετατραπεί σε θερμότητα ή να απορροφηθούν, παράγοντας μόνο θερμότητα υπό μορφή ταλαντώσεων των ατόμων ή να δημιουργήσουν ζεύγος ηλεκτρονίων- οπών. Αυτός ο παράγοντας περιορίζει τη μέγιστη θεωρητική απόδοση στο 44%.

γ) Σκίαση από τις επαφές.

Η ανάγκη της κατασκευής ηλεκτροδίων στην εμπρός επιφάνεια του υλικού (τύπου $-p$ όσο και του υλικού τύπου $-n$) συνεπάγεται τη δημιουργία ενός μεταλλικού πλέγματος επαφών στην επιφάνεια του κυττάρου που εκτίθεται στο ηλιακό φως. Αυτό συμβαίνει επειδή η αντίσταση στην επιφανειακή κίνηση των φορέων στο πάνω επιφανειακό στρώμα του κυττάρου είναι μεγάλη και πρέπει να υπάρχουν πολλά σημεία απαγωγής των φορέων (ηλεκτρικές επαφές) με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν τα ωμικά φαινόμενα. Το αποτέλεσμα για τα ηλεκτρόδια είναι μια γεωμετρία μεταλλικού πλέγματος στην πάνω επιφάνεια του κυττάρου, που έχει σαν συνέπεια ένα ποσοστό 5-15% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να εκτρέπεται.

δ) Αντίσταση.

Οι μη ικανοποιητικές τιμές τόσο της εν σειρά αντίστασης R_s όσο και της παράλληλης R_p τείνουν να μειώσουν το συντελεστή FF , ενώ σε ακραίες περιπτώσεις και τα I_{sc} , V_{oc} , με τελική συνέπεια τη μείωση της απόδοσης.

ε) Θερμοκρασία και ακτινοβολία.

Η σχέση μεταξύ Θερμοκρασίας και βαθμού απόδοσης καθορίζονται από αρκετά πολύπλοκους φυσικούς μηχανισμούς. Τόσο οι αρκετά υψηλές και οι αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης- Επίσης η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά στο ρεύμα και στην τάση και επομένως και στον συντελεστή απόδοσης και στην ισχύ.

ζ) Γήρανση.

Έχει σαν συνέπεια την ελάττωση της απόδοσης τον φωτοβολταϊκού πλαισίου, άρα και της ισχύος αιχμής του, λόγω της γενικότερης αλλοίωσης τον φωτοβολταϊκού κυττάρου ως κομματιού του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Οι αιτίες γήρανσης είναι πολλές όπως ο αποχρωματισμός των κυττάρων, ο διαχωρισμός του ειδικού πλαστικού μόνωσης από την υγρασία της πίσω πλευράς, το ράγισμα του γυαλιού κάλυψης και η κακή λειτουργία των καλωδιώσεων και του κιβωτίου συνδέσεων.

2.5 Υλικά επικάλυψης φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τα τελευταία χρόνια επικαλύπτονται με υλικά για λόγους βελτίωσης της αντοχής τους στις καιρικές συνθήκες και στην γήρανση λόγω της υπερϊώδους ακτινοβολίας.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα μελετηθούν επικαλύψεις με καθαρή εποξειδική ρητίνη όπως επίσης και ρητίνης ιδίου τύπου αλλά με πρόσμιξη νανοσωματιδίων οξειδίου του Ψευδάργυρου (ZnO) σε μορφή nanoflowers.

Η ρητίνη με πρόσμιξη οξειδίου του Ψευδάργυρου περιέχει νανοσωματίδια με συγκέντρωση 0.5 % w/w.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ, ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ

3.1 Πολυμερή- Γενικά χαρακτηριστικά

Πολυμερή ονομάζονται οι οργανικές ενώσεις, των οποίων τα μόρια αποτελούνται από επαναλαμβανόμενα μικρότερα τμήματα, τα μονομερή, που ενώνονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας τις λεγόμενες πολυμερικές αλυσίδες. Στην περίπτωση που η πολυμερική αλυσίδα απαρτίζεται από περισσότερα των δέκα μονομερών χρησιμοποιείται ο όρος μακρομόριο (macromolecule). Οι όροι πλαστικά, ρητίνες και πολυμερή συνήθως θεωρούνται συνώνυμα, όμως υπάρχουν διαφορές. Ως πολυμερές θεωρείται ένα καθαρό υλικό, χωρίς προσμίξεις, που αποτελείται μόνο από μακριές αλυσίδες, ενώ αν στα πολυμερή προστίθενται και άλλες ουσίες τεχνικά χρησιμοποιείται ο όρος πλαστικά ή ρητίνες [17].

Οι δεσμοί που συγκρατούν τα μονομερή μεταξύ τους είναι ομοιοπολικοί και καθορίζουν τη θερμική και χημική σταθερότητα του υλικού. Οι πολυμερικές αλυσίδες, με τη σειρά τους, συνδέονται μεταξύ τους με ασθενείς διαμοριακές δυνάμεις τύπου Van der Waals ή δεσμούς υδρογόνου. Οι ασθενείς αυτές αλληλεπιδράσεις είναι υπεύθυνες για τις φυσικές ιδιότητες του πολυμερούς (π.χ. ιξώδες, ελαστικότητα, διαλυτότητα κ.ά.).

Οι βασικές μέθοδοι πολυμερισμού είναι δύο:

1. Ο σταδιακός πολυμερισμός (γραμμικός και μη γραμμικός)
2. Ο αλυσωτός πολυμερισμός (ή πολυμερισμός ελευθέρων ριζών)

Γενικά χαρακτηριστικά πολυμερών

Κάποια από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των πολυμερών είναι τα παρακάτω:

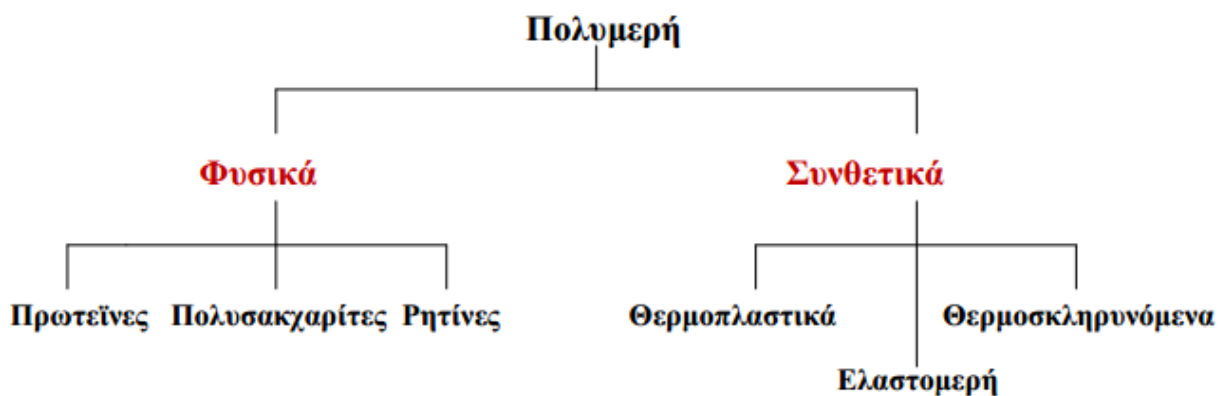
- Αποτελούνται κυρίως από C και H.
- Έχουν χαμηλά σημεία τήξης
- Τα πιο πολλά δεν είναι αγωγοί θερμότητας και ηλεκτρισμού.

Τα πολυμερή έχουν μικρή θερμική αγωγιμότητα και γι' αυτό βρίσκουν εφαρμογή ως θερμομονωτικά. Επίσης χρησιμοποιούνται και ως μονωτές ηλεκτρισμού. Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι ομοιοπολικοί δεσμοί των πολυμερών δεν επιτρέπουν ελεύθερο ηλεκτρικό φορτίο, οπότε και εμφανίζουν μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Επίσης γενικά παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε χημική προσβολή. Τα πολυμερικά υλικά είναι ελαφριά, δηλαδή έχουν χαμηλή πυκνότητα και αυτό γιατί τα στοιχεία H, C έχουν μικρά ατομικά βάρη ενώ η δομή των πολυμερών είναι ανοιχτή.

Γενικά υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταξινόμησης των πολυμερών. Αν ληφθεί υπόψη η ικανότητά τους να διαχέονται εύκολα ή δύσκολα σε διάλυμα, διακρίνονται σε κρυσταλλοειδή ή κολλοειδή αντίστοιχα. Ανάλογα με το αν αποτελούνται από ένα, δύο ή τρία είδη δομικών μονάδων, χωρίζονται αντίστοιχα σε ομοπολυμερή, συμπολυμερή ή τριπολυμερή. Μπορούν επίσης να υπάρχουν και πολυμερικά μίγματα.

Από την άποψη της θερμομηχανικής συμπεριφοράς τα πολυμερή κατατάσσονται σε:

- **Θερμοπλαστικά:** Είναι γραμμικά ή διακλαδωμένα πολυμερικά υλικά, τα μόρια των οποίων αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με ασθενείς δεσμούς και έτσι με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι δυνατό να μορφοποιηθούν. Τέτοια είναι το πολυστυρένιο, το PVC, το πολυαιθυλένιο κ.ά.
- **Θερμοσκληρυνόμενα:** Είναι πολυμερή που έχουν παρασκευασθεί με αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ στη θερμοκρασία δωματίου βρίσκονται στην υαλώδη φάση. Οι πολυμερικές τους αλυσίδες σχηματίζουν τρισδιάστατο πλέγμα (network) και με την αύξηση της θερμοκρασίας δε ρέουν. Επίσης εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στους διαλύτες. Τέτοια υλικά είναι ο βακελίτης, το βουλκανισμένο καουτσούκ, οι εποξειδικές ρητίνες κ.ά.
- **Ελαστομερή:** Όπως στα θερμοσκληρυνόμενα έτσι και στα ελαστομερή σχηματίζονται πολυμερικά δίκτυα. Έχουν χαμηλή θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης με αποτέλεσμα να βρίσκονται, στη θερμοκρασία δωματίου, στην ελαστική φάση.



Σχήμα 3.1: Κατηγορίες πολυμερών από άποψη θερμομηχανικής συμπεριφοράς.

Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι υπάρχει κι η άποψη πως τα ελαστομερή δεν αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία πολυμερών υλικών [17].

3.2. Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή

Θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings) είναι εκείνα τα πολυμερή που στην τελική φάση επεξεργασίας τους, με την επίδραση της θερμότητας αποκτούν διασταυρούμενες συνδέσεις προς σχηματισμό πλέγματος. Τα μόρια ,δηλαδή, συνδέονται σταθερά με κύριους δεσμούς μεταξύ τους και έτσι επιτυγχάνεται τέτοια συνοχή στο πλέγμα, ώστε δεν μπορεί πλέον το πολυμερές να μεταβεί στην πλαστική κατάσταση. Η διαδικασία, λοιπόν, της θερμοσκληρύνσεως είναι μη αναστρέψιμη [21].

Χαρακτηριστικά Θερμοσκληρυνόμενων [17] :

1. Πολύ σκληρά,
2. Ανθεκτικά στην θερμότητα,
3. Δεν μορφοποιούνται με πλαστικότητα,
4. Άτηκτα,
5. Αδιάλυτα
6. Διαποτίζονται μόνο πολύ λίγο από διαλύτες [21].

Αυτά τα πλεονεκτήματα, σε συνδυασμό με το μικρό βάρος και την εξαιρετική μόνωση, τα καθιστούν ιδανικά υλικά για τεχνικές εφαρμογές. Οι διεργασίες τους είναι φθηνές και γίνονται με μόρφωση υπό πίεση [17].

3.3 Κατηγορίες ρητινών

Τα πολυμερή ανάλογα με την μορφή στην οποία διατίθενται για την περαιτέρω επεξεργασία τους, διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες. Μεταξύ αυτών και οι συνθετικές ρητίνες [17].

Οι συνθετικές ρητίνες είναι χαμηλού μοριακού βάρους ενδιάμεσα προϊόντα ή πρώτες ύλες από μακρομοριακές ενώσεις που ευρίσκονται στην υγρή κατάσταση ή είναι διαλυτά ή τηκόμενα στερεά και που λαμβάνουν την απαιτούμενη αντοχή για τις συγκεκριμένες εφαρμογές μόνο κατόπιν της κατάλληλης επεξεργασίας τους. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Βασικές Ύλες για βερνίκια, επιχρίσματα και κόλλες, φερόμενες με την μορφή διαλυμάτων και γαλακτωμάτων.
- Τεχνητές Ρητίνες ως συνδετικά μέσα για ξύλινα αντικείμενα, δέρματα, τεχνητό λίθο και ενδιάμεσα προϊόντα για την κυρίως επεξεργασία των πολυμερών, ενώ συνήθως μαζί με τα πρόσθετα επεξεργάζονται προς μια «μάζα μορφώσεως», δηλαδή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή των τελικών εμπορικών προϊόντων του πολυμερούς με μορφοποίηση υπό θέρμανση και πίεση.

Οι τεχνητές ρητίνες αποτελούνται από μία ευρεία συλλογή πολυμερών:

1. Σκληρυνόμενες τεχνητές ρητίνες :

- Θερμοσκληρυνόμενες Ρητίνες: Σκληραίνουν μόνιμα κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού και σκλήρυνσής τους (curing). Τέτοιες είναι οι φαινολικές ή φαινοπλάστης (phenolic), οι εποξειδικές (epoxy), οι βινυλεστερικές (vinylester) και οι πολυεστερικές (polyester) ρητίνες, οι οποίες αποτελούν και τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες. Αυτές αναμειγνυόμενες με φυτικές ρητίνες (κυρίως με κολοφώνιο), με λινέλαιο ή με τερεβινθέλαιο δίνουν πολλά είδη υλικών, τα οποία διαλύονται μόνο στα έλαια. Χρησιμοποιούνται στην παρασκευή βερνικιών και χρωμάτων, κυρίως σε εξωτερικές επιφάνειες, λόγω της αντοχής τους στις καιρικές συνθήκες και στην ταχεία ξήρανση.
- Μονομερείς Ρητίνες Χυτεύσεως : πολυ(μεθακρυλικό μεθύλιο)

2. Ρητίνες για βερνίκια, μέσα διαποτίσεως, κόλλες κλπ :

- Θερμοπλαστικές Ρητίνες: Είναι διαλύματα πτητικών διαλυτών (20-60%) και επίσης αραιές υδατικές διασπορές. Τέτοιες είναι το πολυ(χλωριούχο βινύλιο), πολυ(οξικό βινύλιο), πολυ(βινυλική αλκοόλη).
- Ρητίνες σκληρυνόμενες ως πλέγμα : Τέτοιες είναι ρητίνες φορμόλης – ουρίας (αμινοπλάστες) , οι οποίες διαλύονται στο οινόπνευμα και στους υδρογονάνθρακες, οι ακόρεστες πολυεστερικές ρητίνες, οι εποξειδικές ρητίνες, η πολυουρεθάνη, γλυκεροφθαλικές ρητίνες. Τα παρασκευαζόμενα βερνίκια είναι άχρωμα και ανθεκτικά στο φως, αντέχουν στις καιρικές συνθήκες και ξεραινόνται ταχύτατα. Η σχηματιζόμενη μεμβράνη επί της χρωματιζόμενης επιφάνειας, έχει μεγάλη σκληρότητα και υψηλή αντοχή.

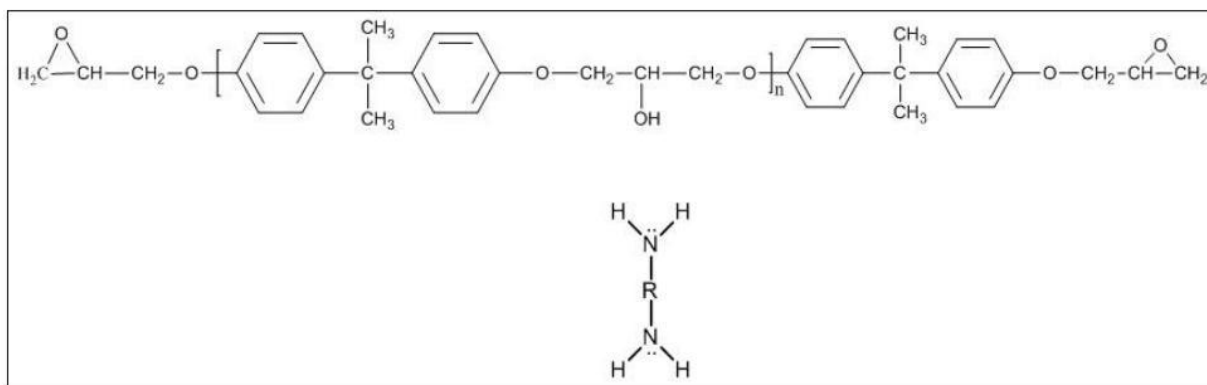
3.4. Εποξειδικές ρητίνες

3.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

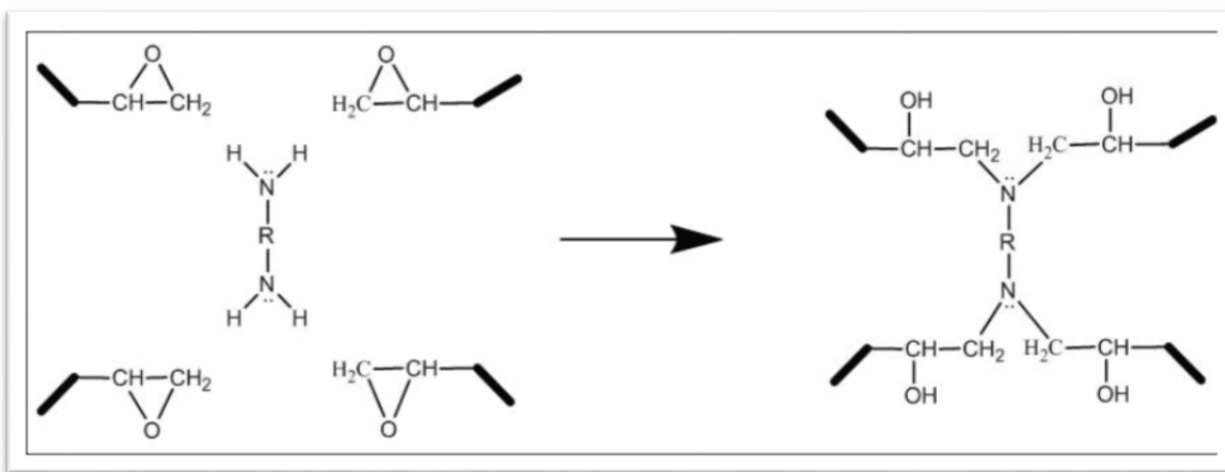
Αν και αναπτύχθηκαν ευρέως κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο, οι εποξειδικές ρητίνες έγιναν εμπορικά διαθέσιμες κατά το 1950, προσφέροντας υψηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικά περιβάλλοντα. Λόγω των ιδιοτήτων τους, βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανία και μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές τους είναι η χρήση τους ως μήτρες στα σύνθετα υλικά [18].

Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών και χαρακτηρίζονται από την παρουσία του οξιρανικού δακτυλίου. Ανάλογα με τον αριθμό των δακτυλίων που βρίσκονται παρόντες στο μόριο, οι εποξειδικές ρητίνες χωρίζονται σε διδραστικές (δύο οξιρανικοί δακτύλιοι), ή πολυδραστικές (τρεις ή περισσότεροι δακτύλιοι). Ο

οξιρανικός δακτύλιος αντιδρά με ένα ευρύ φάσμα άλλων οργανικών ενώσεων. Για την ένωση δύο μορίων στα άκρα των οποίων υπάρχει η συγκεκριμένη ομάδα, απαιτείται ένα τρίτο μόριο που ουσιαστικά χρησιμοποιείται ως συνδετικός κρίκος, έτσι ώστε να ξεκινήσει η αντίδραση που οδηγεί στο σχηματισμό ενός τρισδιάστατου δικτύου. Το τρίτο αυτό μόριο ονομάζεται σκληρυντής και συνήθως είναι κάποιος διδραστικός ανυδρίτης ή αμίνη. Ενίοτε, χρησιμοποιούνται και άλλες χημικές ουσίες που ονομάζονται εκκινητές, για να ξεκινήσει ομαλότερα η διαδικασία της αντίδρασης. Οι εποξειδικές ρητίνες που κυκλοφορούν στο εμπόριο αποτελούνται συνήθως από μίγματα μακρομορίων που φέρουν στα άκρα τους τον οξιρανικό δακτύλιο, περιέχουν αρωματικούς δακτυλίους και συνοδεύονται από συστήματα σκληρυντών και εκκινητών. Στην εικόνα 3.2 φαίνεται ένα διδραστικό μακρομόριο και ένας εκκινητής (διαμίνη). Στα άκρα του μακρομορίου διακρίνονται οι δύο οξιρανικοί δακτύλιοι. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η αντίδραση της διαμίνης με τους οξιρανικούς δακτυλίους των μακρομορίων [18].

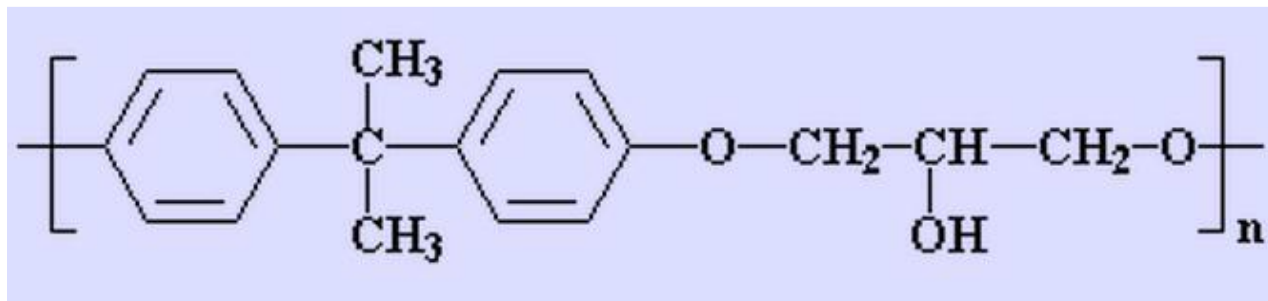


Σχήμα 3.2: Διδραστικό μόριο και εκκινητής (διαμίνη) [19]



Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση αντίδρασης διαμίνης με τους οξιρανικούς δακτυλίους μακρομορίων

Οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούνται από αλυσίδες που έχουν τουλάχιστον δύο επόξυ-ομάδες.



Σχήμα 3.4: Μοριακή δομή Εποξειδικής Ρητίνης [20].

Από πλευράς σύστασης οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να στερεές ή ρευστές. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες είναι άκαμπτα άμορφα στερεά που μοιάζουν με γυαλί.

Βασικό χαρακτηριστικό της αντίδρασης πολυμερισμού είναι η αύξηση της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται στο μίγμα της ρητίνης με τα διάφορα πρόσθετα. Με την έκλυση θερμότητας η αντίδραση πολυμερισμού χαρακτηρίζεται εξώθερμη. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες παρέχουν σκληρή και αμετάβλητη αντίσταση τριβής και πολύ καλή χημική αντίσταση [21].

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των στερεών εποξειδικών ρητινών σε σχέση τις υγρές ρητίνες είναι η εύκολη επεξεργασία τους, η μηχανική αντοχή, η υψηλή χημική αντίσταση και το άριστο κολλώδες.

Ένας σημαντικός αριθμός εποξειδικών ρητινών είχε ως αποτέλεσμα το γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης και την ευρεία σε έκταση χρήση τους. Οι κυριότερες ιδιότητες των υγρών εποξειδικών ρητινών είναι οι παρακάτω:

1. Χαμηλή υδροσκοπικότητα, καλή διαστατική σταθερότητα και ικανοποιητική αντοχή στην επίδραση ύδατος, οξέων, βάσεων και πολλών οργανικών διαλυτών. Είναι υγρά με χαμηλό ιξώδες, όπως και τα μίγματά τους με πρόσθετα (πλαστικοποιητές, σκληρυντές), με αποτέλεσμα την εύκολη κατεργασία τους.
2. Η επεξεργασία των ρητινών είναι εύκολη και γρήγορη για θερμοκρασίες από 50C μέχρι 1500C και εξαρτάται από την εκλογή του πρόσθετου.

3. Υψηλές μηχανικές ιδιότητες που μπορεί να οφείλονται στη μικρή συστολή τους, έτσι μειώνεται η παρουσία τάσεων.
4. Άριστη ηλεκτρική μόνωση.
5. Υψηλή δύναμη συγκόλλησης.(Στην σύγχρονη τεχνολογία πλαστικών είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν παρατηρηθεί). Αυτή η ιδιότητα αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τις πολλές εφαρμογές.
6. Ποικιλία εφαρμογών. Οι βασικές τους ιδιότητες μπορούν να τροποποιούνται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής.(Ανάμειξη με κάποιο πρόσθετο της επιλογής μας, χρήση τροποποιητικών και συνθέσεων).
7. Καλή χημική αντίσταση που εξαρτάται από το πρόσθετο που χρησιμοποιείται. Συνολικά οι εποξειδικές ρητίνες έχουν πολύ υψηλή αντίσταση στα καυστικά και καλή μέχρι άριστη στα οξέα.
8. Μικρή συστολή κατά τον πολυμερισμό και κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους. Αυτή η μικρή συστολή είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τις εποξειδικές ρητίνες.

Μειονεκτήματα:

1. Η σχετικά μικρή θερμική αντοχή (αποσύνθεση στους 200° C)
2. Η δυσχέρεια απομάκρυνσής τους από τα καλούπια κατεργασίας
3. Το μέσο έως υψηλό κόστος
4. Σε αντίθεση με τις πολυεστερικές όπου τα αντιδρώντα της χημικής ένωσης υπάρχουν ήδη και απλά ο καταλύτης επιταχύνει τη διαδικασία, στην περίπτωση της εποξειδικής ρητίνης, τα συστατικά Α και Β είναι τα αντιδρώντα και γι' αυτό είναι απαραίτητη η ακριβής ανάμειξή τους κατά βάρος. Αν δεν αναμειχθούν με τη σωστή αναλογία, κάποιο θα βρίσκεται σε περίσσεια και το σύνθετο υλικό που θα προκύψει θα έχει κατώτερες από τις αναμενόμενες μηχανικές ιδιότητες.

Άλλες εποξειδικές ρητίνες είναι :

- Διγλυκοδιλαιθέρας της διφαινόλης Α (DGEBA) ,
- Τετραγλυκιδιλαιθέρας της διανυλίνης (TGMDA) ,
- Εποξειδική φαινολοκρεζολικής νεολάκης
- Κυκλοαλειφατικές εποξειδικές (CA)

3.4.2 Παραγωγή και σκλήρυνση εποξειδικής ρητίνης

Οι συνηθέστερες εποξειδικές ρητίνες παράγονται από την αντίδραση επιχλωρυδρίνης και διφαινόλης Α, όπου παράγονται διγλυκιδυλαιθέρες της διφαινόλης Α. Οι εποξειδικές ρητίνες

τελικά μετατρέπονται σε θερμοσκληρυμένο προϊόν με την προσθήκη ενός «σκληρυντή» και μπορούν να πολυμερισθούν από ένα ευρύ φάσμα σκληρυντών. Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή εξαρτάται από τις τεχνικές εφαρμογής, τον απαιτούμενο «χρόνο ζωής σε δοχείο» (pot life), τις συνθήκες σκλήρυνσης και τις επιδιωκόμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Στην πράξη τα διάφορα συστήματα εποξειδικής ρητίνης – μέσω σκλήρυνσης τροποποιούνται συνήθως με διάφορα πρόσθετα, τα οποία μπορεί να είναι αδρανή ή δραστικά, δηλαδή να αντιδρούν με την εποξυ-ομάδα [22].

Υπάρχει μια μεγάλη ομάδα εταιρειών που αγοράζει πρώτες ύλες από τους κυρίως παραγωγούς και κατόπιν συνθέτουν (αναμιγνύουν, τροποποιούν) εποξειδικά συστήματα από αυτές τις πρώτες ύλες. Οι εταιρείες αυτές είναι γνωστές σαν «formulators» και μπορούν με χιλιάδες τρόπους να τροποποιήσουν τα εποξειδικά: με την προσθήκη ορυκτών πληρωτικών (π.χ. τάλκης, οξείδιο πυριτίου, σκόνη αλουμινίου, ανθρακικό ασβέστιο, καολίνης, μίκα, μπεντονίτης, πυριτικό αλουμίνιο, πυριτικό μαγνήσιο κλπ.), με τη προσθήκη πλαστικοποιητών (plasticizers) για τη βελτίωση της ευκαμψίας του υλικού και την αύξηση του συγκολλητικού δεσμού, μειωτών ιξώδους - αραιωτικών (diluent, extenders), επιταχυντών, βελτιωτικών πρόσφυσης κλπ. Οι τροποποιήσεις αυτές μπορούν να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την εκτέλεση του έργου. Ευρύτερη εφαρμογή έχουν τα αραιωτικά και τα πληρωτικά υλικά.

Τα αραιωτικά υλικά, που μπορεί να είναι δραστικά ή αδρανή, ενώ μειώνουν το ιξώδες πολλών εμπορικών εποξειδικών ρητινών με πολύ μεγάλο ιξώδες. Τυπικό παράδειγμα δραστικού αραιωτικού αποτελεί ο φθαλικός διβουτυλεστέρας [22].

Τα πληρωτικά υλικά έχουν ως κύριο σκοπό να αυξήσουν το βάρος και τον όγκο του τελικού προϊόντος και μ' αυτό τον τρόπο να μειωθεί το κόστος. Συνήθως γίνεται διάκριση σε αγώγιμα και μη αγώγιμα πληρωτικά ανάλογα αν αυξάνουν ή όχι την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ρητίνης [21].

Οι εποξειδικές ρητίνες δεν είναι εύκαμπτα υλικά και ακόμα και με την προσθήκη μεγάλων συγκεντρώσεων πλαστικοποιητή δεν αποκτούν ιδιότητες που να προσεγγίζουν ιδιότητες συνηθισμένων ελαστομερών. Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο προστίθενται οι πλαστικοποιητές, είναι η ελάττωση του έμφυτου εύθραυστου των εποξειδικών ρητινών. Το αποτέλεσμα της προσθήκης του πλαστικοποιητή είναι η αύξηση της δυνατότητας παραμόρφωσης και γ' αυτόν τον λόγο πολλά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

3.5. Εφαρμογές εποξειδικών ρητινών

Τα εποξειδικά βρίσκουν αξιόλογη χρήση σε εφαρμογές όπως:

- **Χρώματα και επικαλυπτικά**

Η ευρύτερη εφαρμογή των εποξειδικών ρητινών γίνεται στον τομέα των επικαλυπτικών με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και αντοχή σε χημικά μέσα. Περιλαμβάνονται τα επικαλυπτικά σε μορφή σκόνης για πλυντήρια, στεγνωτήρια και άλλες ηλεκτρικές συσκευές κουζίνας. Τα επικαλυπτικά με βάση τα εποξειδικά σε σκόνη, που η συγκόλληση τους γίνεται με τήξη, χρησιμοποιούνται ευρέως για αντιδιαβρωτική προστασία χαλύβδινων σωλήνων και εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ελαίων και αερίων, σε σωληνώσεις (χαλύβδινες) για τη μεταφορά πόσιμου νερού, σε ράβδους οπλισμού σκυροδέματος κλπ. [22].

Εποξειδικά επικαλυπτικά χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως ως αστάρια για τη βελτίωση της πρόσφυσης των θαλασσιών χρωμάτων και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Μεταλλικά δοχεία κονσέρβας και άλλα δοχεία για τρόφιμα, όπως π.χ. τομάτες που είναι όξινες συνήθως επικαλύπτονται με εποξειδικά για να αποτραπεί η διάβρωση τους. Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται επίσης για δάπεδα υψηλών απαιτήσεων και για διακοσμητικά δάπεδα [22].

- **Συγκολλητικά**

Τα εποξειδικά συγκολλητικά ανήκουν στα συγκολλητικά εκείνα που ονομάζονται «δομικά συγκολλητικά» (που περιλαμβάνουν επίσης πολυουρεθάνες, ακρυλικά, κυανοακρυλικά κλπ.). Τα υψηλών απαιτήσεων αυτά εποξειδικά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αεροσκαφών, αυτοκινήτων, ποδηλάτων κλπ. όπου απαιτούνται υψηλές αντοχές πρόσφυσης [22].

Τα εποξειδικά συγκολλούν ξύλο, μέταλλο, γυαλί, πέτρα και κάποια πλαστικά. Μπορεί να είναι εύκαμπτα ή δύσκαμπτα, διαφανή ή αδιαφανή/έγχρωμα, σκληρυνόμενα γρήγορα ή πολύ αργά και είναι γενικώς ασυγκρίτως καλύτερα από τα κοινά συγκολλητικά όσον αφορά την αντίστασή τους στη θερμότητα και στα χημικά [21].

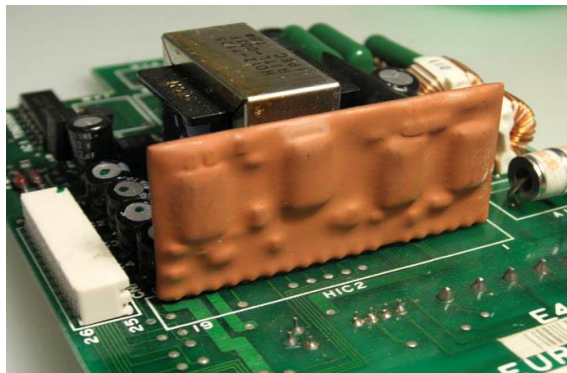
- **Βιομηχανικά εργαλεία παραγωγής και σύνθετα υλικά**

Τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή καλουπιών, μοντέλων, αντικολλητικών φύλλων, στη χύτευση και στη βιομηχανική παραγωγή βοηθημάτων [22].

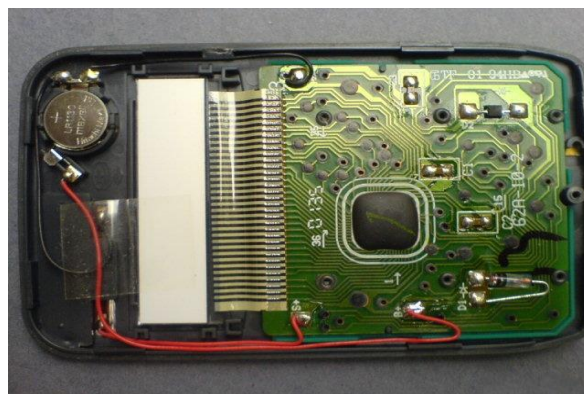
Τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται επίσης στην παραγωγή στοιχείων ενισχυμένων με ίνες ή από σύνθετα υλικά. Είναι πιο ακριβά από τις πολυεστερικές ρητίνες και τις ρητίνες από βινυλεστέρα, αλλά γενικώς παράγουν ισχυρότερα και πιο ανθεκτικά στη θερμοκρασία σύνθετα υλικά [22].

- **Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα**

Οι εποξειδικές ρητίνες εφαρμόζονται στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών, σε κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές, στον εξοπλισμό διανομής μεγάλων ηλεκτρικών φορτίων, στους μονωτήρες μετασχηματιστών και στους μονωτήρες. Οι εποξειδικές ρητίνες είναι εξαιρετικοί ηλεκτρικοί μονωτές και προστατεύουν τα ηλεκτρικά στοιχεία από μικρά κυκλώματα, σκόνη και υγρασία [22].



Σχήμα 3.5: Ένα υβριδικό κύκλωμα ενσωματωμένο σε εποξειδική ρητίνη πάνω σε τυπωμένη πλακέτα.



Σχήμα 3.6: Το εσωτερικό ενός υπολογιστή τσέπης. Ο σκουρόχρωμος όγκος εποξειδικής ρητίνης στο κέντρο, καλύπτει το τσιπ του επεξεργαστή.

- **Ναυτιλιακές εφαρμογές**

Τα εποξειδικά πωλούνται σε καταστήματα σιδηρικών, σε σετ δύο συστατικών. Μπορεί όμως να πωλούνται σε καταστήματα με ναυτιλιακά είδη για θαλάσσιες εφαρμογές. Τα εποξειδικά δεν χρησιμοποιούνται ως εξωτερική στρώση ενός σκάφους γιατί επηρεάζονται από τις UV ακτίνες. Συνήθως χρησιμοποιούνται κατά την επισκευή και συναρμολόγηση σκαφών, και κατόπιν επικαλύπτονται από ένα πολυουρεθανικό χρώμα ή βερνίκι θαλάσσης που παρέχουν UV προστασία [22].

- **Αεροδιαστημικές εφαρμογές**

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, οι εποξειδικές ρητίνες εφαρμόζονται ως το υλικό της δομικής μήτρας το οποίο μετά ενισχύεται με ίνες, όπως υάλου, άνθρακος, Kevlar και βορίου. Επίσης χρησιμοποιούνται ως δομική κόλλα [22].

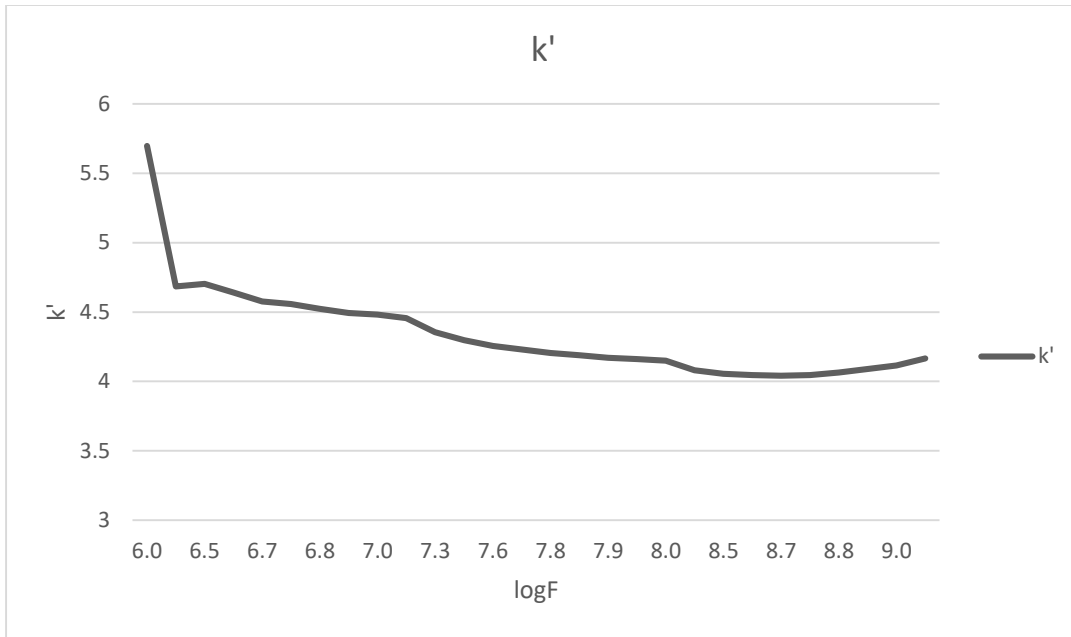
3.6 Τρόπος εφαρμογής επί του στοιχείου - Μέθοδος επικάλυψης

Η ρητίνη (Neotex) που χρησιμοποιήθηκε εφαρμόστηκε επί των στοιχείων με την μέθοδο της επάλειψης. Το συνολικό πάχος του στοιχείου με επικάλυψη καθαρής ρητίνης μετά την επάλειψη ήταν 0.547 mm ενώ του στοιχείου με ρητίνη με πρόσμιξη οξειδίου του Ψευδάργυρου ήταν 1,719 mm.

3.7 Αποτελέσματα μετρήσεων k' σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Cp[F]	D	Rp[ohm]	FREQ[Hz]	logF	k'
2.01E-12	0.1764	449300	1.00E+06	6.0000	5.6981
1.65E-12	0.1190	405100	2.00E+06	6.3010	4.6850
1.66E-12	0.1015	315500	3.00E+06	6.4771	4.7020
1.64E-12	0.0870	279800	4.00E+06	6.6021	4.6396
1.61E-12	0.0780	252900	5.00E+06	6.6990	4.5772
1.61E-12	0.0780	211900	6.00E+06	6.7782	4.5573
1.59E-12	0.0732	195000	7.00E+06	6.8451	4.5232
1.58E-12	0.0718	175000	8.00E+06	6.9031	4.4921
1.58E-12	0.0724	154600	9.00E+06	6.9542	4.4807
1.57E-12	0.0697	145600	1.00E+07	7.0000	4.4552
1.54E-12	0.0585	88620	2.00E+07	7.3010	4.3558
1.51E-12	0.0546	64240	3.00E+07	7.4771	4.2963
1.50E-12	0.0512	51850	4.00E+07	7.6021	4.2565
1.49E-12	0.0496	43070	5.00E+07	7.6990	4.2309
1.48E-12	0.0475	37730	6.00E+07	7.7782	4.2054
1.48E-12	0.0473	32570	7.00E+07	7.8451	4.1884
1.47E-12	0.0454	29780	8.00E+07	7.9031	4.1714
1.47E-12	0.0443	27220	9.00E+07	7.9542	4.1600
1.46E-12	0.0427	25470	1.00E+08	8.0000	4.1487
1.44E-12	0.0370	14950	2.00E+08	8.3010	4.0806
1.43E-12	0.0346	10740	3.00E+08	8.4771	4.0551
1.43E-12	0.0336	8306	4.00E+08	8.6021	4.0465
1.42E-12	0.0324	6909	5.00E+08	8.6990	4.0409
1.43E-12	0.0325	5728	6.00E+08	8.7782	4.0465
1.43E-12	0.0330	4812	7.00E+08	8.8451	4.0636
1.44E-12	0.0331	4173	8.00E+08	8.9031	4.0891
1.45E-12	0.0322	3785	9.00E+08	8.9542	4.1146
1.47E-12	0.0335	3235	1.00E+09	9.0000	4.1657

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα που απεικονίζει το συντελεστή k' σε συνάρτηση με τον λογάριθμο της συχνότητας f .



Σχήμα 3.7: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή k' σε συνάρτηση με τον λογάριθμο της συχνότητας της ρητίνης

Παρατηρούμε ότι η διηλεκτρική διαπερατότητα της ρητίνης είναι μεγαλύτερη από αυτήν του διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 , (η οποία είναι 3,9) σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων από 1 MHz έως 1GHz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΟ ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ, ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, NANOFLOWERS

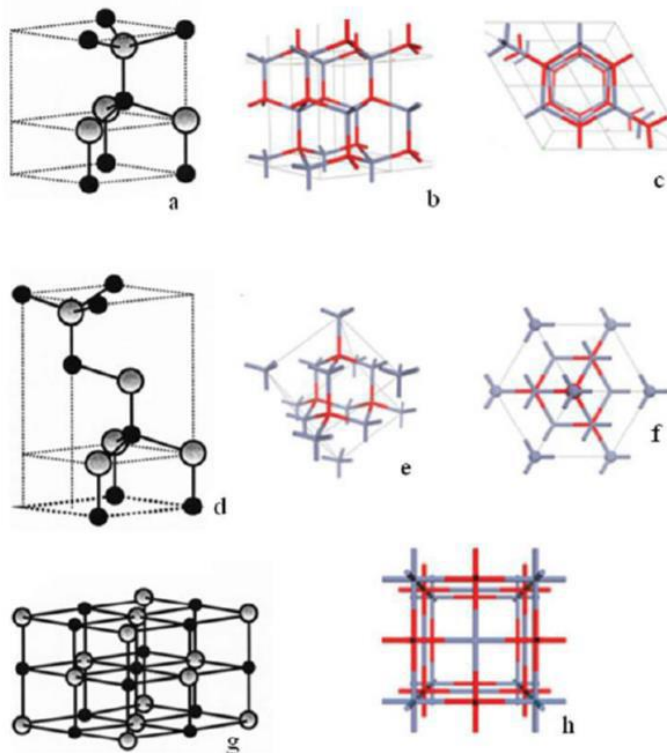
4.1 Το Οξείδιο του Ψευδαργύρου (ZnO)

Το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) είναι ένας σύνθετος ημιαγωγός τύπου II-VI με άμεσο ενεργειακό διάκενο ($E_g=3.37$ eV) σε θερμοκρασία δωματίου και με μεγάλη ενέργεια σύνδεσης εξιτονίου (60 meV).

Σαν ορυκτό συνήθως περιέχει συγκεκριμένη ποσότητα μαγνησίου και άλλων στοιχείων και έχει είτε κίτρινο είτε κόκκινο χρώμα, ενώ εξαιτίας του μεγάλου ενεργειακού διακένου το καθαρό οξείδιο του ψευδαργύρου είναι άχρωμο.

Μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του είναι το γεγονός ότι σαν υλικό είναι φιλικό προς το περιβάλλον, είναι βιοασφαλές και βιοσυμβατό, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βιοϊατρικές εφαρμογές χωρίς επικάλυψη. Τις τελευταίες δεκαετίες η έρευνα έχει επικεντρωθεί στην κατασκευή νανοδομών ZnO και στον συσχετισμό της μορφολογίας τους με τις οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες που σχετίζονται με το μέγεθος τους. Το ZnO είναι ευπροσάρμοστο λειτουργικό υλικό και μπορεί να έχει διάφορες μορφές ανάπτυξης όπως νανοτελείες, νανοράβδους, νανονήματα, νανοζώνες, νανοσωλήνες, νανογέφυρες, νανοτοιχία και νανοέλικες.

Το ZnO έχει τρεις δυνατές κρυσταλλικές δομές : την εξαγωνική δομή του βουρτσίτη (wurtzite), την κυβική δομή του σφαλερίτη (zinc blende) και την κυβική δομή του ορυκτού άλατος (rock salt) [23] (Σχήμα 4.1). Σε συνθήκες περιβάλλοντος η σταθερά θερμοδυναμική φάση είναι αυτή του βουρτσίτη.



Σχήμα 4.1: Αναπαράσταση των κρυσταλλικών δομών ZnO : a,b,c) βουρτσιτής, d,e,f) σφαλερίτης, g,h) ορυκτό άλας. Με γκρι σημειώνονται τα άτομα ψευδαργύρου ενώ τα άτομα του οξυγόνου με κόκκινο και μαύρο.

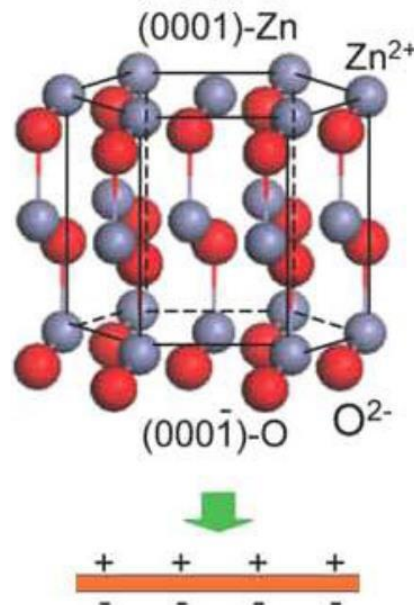
Το ZnO με δομή βουρτσιτή έχει εξαγωνική δομή μέγιστης πυκνότητας με πλεγματικές σταθερές $a=0.32495 \text{ nm}$, $c=0.52069 \text{ nm}$ και εσωτερικό παράγοντα $u=0.382$ [152]. Στην ιδανική περίπτωση, στην οποία ο λόγος c/a ισούται με 1.6333 και ο εσωτερικός παράγοντας u ισούται με 0.375, η δομή του βουρτσιτή διαφέρει από τη δομή του σφαλερίτη μόνο στη σειρά με την οποία είναι τοποθετημένα τα άτομα A και B στην διεύθυνση [24] του μείγματος AB.

Όμως, όπως και στους περισσότερους κρυστάλλους με δομή βουρτσιτή, έτσι και με το οξείδιο του ψευδαργύρου ο λόγος c/a και ο u αποκλίνουν ελάχιστα από τις ιδανικές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα δύο ελαφρώς διαφορετικές γειτονικές αποστάσεις. Για την ιδανική δομή του βουρτσιτή ισχύει $R(1) = R(2)=uc$.

Κάθε κατιόν ψευδαργύρου περιβάλλεται από τέσσερα ανιόντα οξυγόνου τοποθετημένα στις κορυφές ενός ελαφρά παραμορφωμένου τετραέδρου και αντίστροφα, σε αντίθεση με τις άλλες κατηγορίες οξειδίων, όπου τα άτομα οξυγόνου βρίσκονται συνήθως στις κορυφές οκταέδρου σε σχέση με τα άτομα του μετάλλου. Αυτή η τετραεδρική δομή προέρχεται κυρίως από την πολικού χαρακτήρα ομοιοπολικότητα των δεσμών που αναπτύσσονται μεταξύ του μετάλλου και του

οξυγόνου. Έτσι, η δομή του βουρτσίτη μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύνολο εναλλασσόμενων επιπέδων στον άξονα c που αποτελούνται από τετραεδρικά διατεταγμένα ιόντα O^{2-} και Zn^{2+} . Αυτή η τετραεδρική διάταξη έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μη-κεντροσυμμετρικής δομής και συνεπώς πιεζοηλεκτρικές και πυροηλεκτρικές ιδιότητες.

Το ZnO με δομή σφαλερίτη είναι μετασταθές και μπορεί να σταθεροποιηθεί μόνο με ετεροεπιταξιακή ανάπτυξη πάνω σε κυβικά υποστρώματα, όπως τα ZnS και GaS/ZnS , απεικονίζοντας τοπολογική συμβατότητα για να ξεπεραστεί η ενδογενής τάση σχηματισμού της δομής του βουρτσίτη. Όπως και με άλλους II-VI ημιαγωγούς, το οξείδιο του ψευδαργύρου με δομή βουρτσίτη μπορεί να μετατραπεί και να πάρει τη δομή του ορυκτού άλατος σε σχετικά υψηλές πιέσεις. Αυτή η μετατροπή οφείλεται στην μείωση των πλεγματικών διαστάσεων.[17] Ωστόσο η δομή του ορυκτού άλατος δε μπορεί να σταθεροποιηθεί με επιταξιακή ανάπτυξη. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του ZnO είναι οι πολικές επιφάνειες. Η περισσότερο κοινή επιφάνεια είναι η βασική επιφάνεια. Τα αντίθετα φορτισμένα ιόντα παράγουν θετικά φορτισμένες (0001) -Zn και αρνητικά φορτισμένες $(000\bar{1})$ -O επιφάνειες (Σχήμα 4.2) που τερματίζονται σε ένα επίπεδο κατιόντων ή ανιόντων.



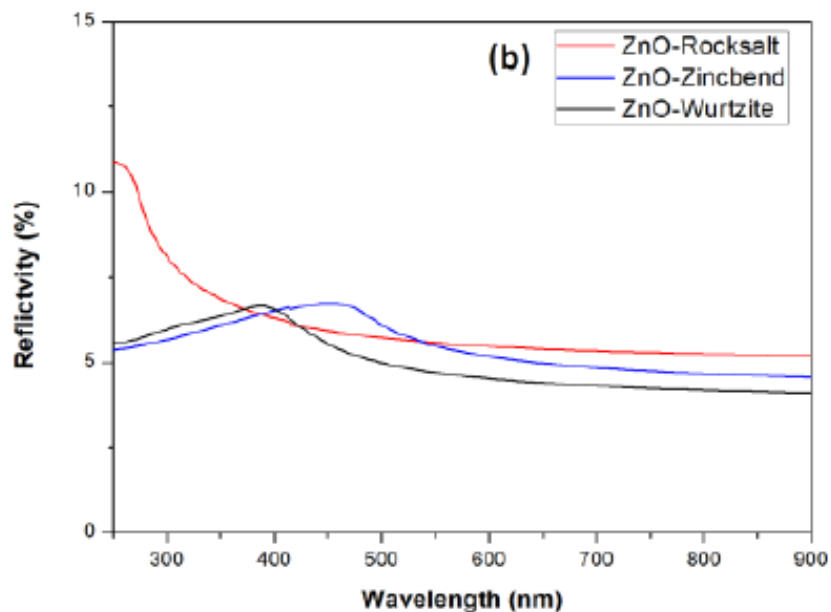
Σχήμα 4.2: Η ασυμμετρία μεταξύ των δυο πολωμένων επιφανειών (0001) και $(000\bar{1})$ ενός μονοκρυσταλλικού στρώματος ZnO που οδηγεί στη δημιουργία ενός διπολικού στρώματος.

Γενικά, οι πολικές επιφάνειες θα έπρεπε να είναι θερμοδυναμικά ασταθείς λόγω της ανάπτυξης κάθετης στην επιφάνεια ηλεκτρικής διπολικής ροπής. Αντιθέτως, πολλές παρατηρήσεις έχουν αποδείξει ότι και οι πολικές επιφάνειες παρουσιάζουν σταθερότητα η οποία έχει προκύψει από

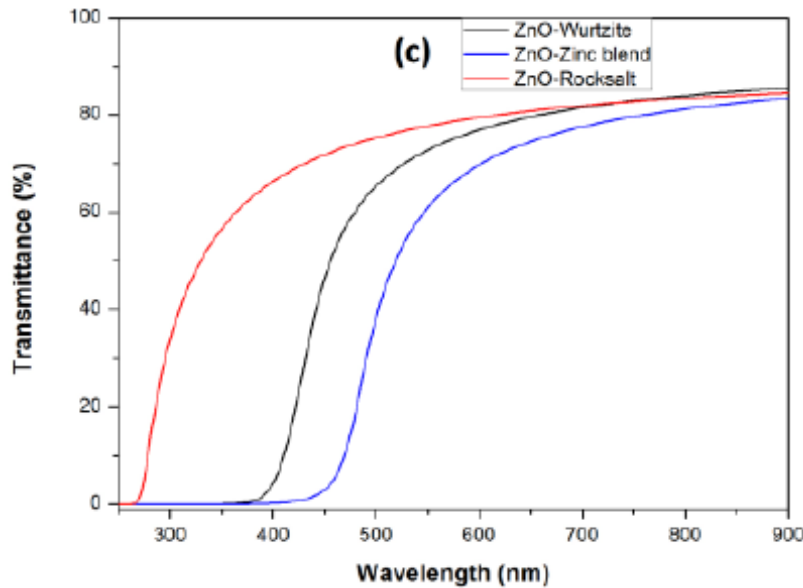
μηχανισμούς που ακόμη δεν έχουν εξακριβωθεί, αλλά πάντως στοχεύουν στη μείωση της πυκνότητας επιφανειακού φορτίου. Πιθανοί μηχανισμοί είναι γεωμετρικές αναδιατάξεις, δεσμοί μεταλλικού χαρακτήρα, δημιουργία επιφανειακών ατελειών (όπως κενές πλεγματικές θέσεις οξυγόνου) ή απορρόφηση φορτισμένων σωματιδίων, όπως OH^- ; ή H^+ .

4.2 Ιδιότητες του υλικού

Οι οπτικές, οι ανακλαστικές και διαθλαστικές ιδιότητες του ZnO ως προς την ηλιακή ακτινοβολία φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα (Σχήματα 6.1 και 6.2). Η ανακλαστικότητα του σφαλερίτη και του βουρτσιτή αυξάνεται από το 5% έως 7% στο υπεριώδες, ενώ στη συνέχεια μειώνεται και πάλι στο 5% από το ορατό στο υπέρυθρο. Η διαπερατότητα και για τις τρεις δομές ανέρχεται στο 85% της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μόνη διαφορά έγκειται στο μήκος κύματος από το οποίο η κάθε δομή αρχίζει να απορροφά. Για το βουρτσιτή το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι περίπου στα 370 nm.[25]



Σχήμα 4.3: Ανακλαστικότητα των τριών κρυσταλλικών δομών του ZnO [25]



Σχήμα 4.4: Διαπερατότητα των τριών κρυσταλλικών δομών του ZnO [25]

4.3 Νανοϋλικά

4.3.1 Νανοτεχνολογία

Ο όρος Νανοτεχνολογία, ιδιαίτερα δημοφιλής τα τελευταία χρόνια, αναφέρεται στην μελέτη και ανάπτυξη υλικών και διατάξεων σε επίπεδο ατόμων και μορίων, με σκοπό την βελτίωση των ιδιοτήτων που τα χαρακτηρίζει ή και την δημιουργία νέων. Η κλίμακα του ατόμου είναι το νανόμετρο, που είναι 1 δισεκατομμυριοστό του μέτρου ($10^{-9}m$) από όπου και προκύπτει και ο όρος Νανοτεχνολογία. Νανοτεχνολογία λοιπόν είναι ένας κλάδος της τεχνολογίας υλικών, με παρουσία σχεδόν σε όλες τις θετικές επιστήμες. Πιο συγκεκριμένα, είναι η ανάπτυξη και χαρακτηρισμός δομών υλικών, ορατών με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, σύνθεση υλικών άτομο-άτομο, με προσέγγιση δηλαδή bottom-up (Θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο) όπως και φυσικά εφαρμογές στην βιοτεχνολογία για χορήγηση φαρμάκων ελάχιστα επεμβατικά και άλλα. [26] Ο σκοπός της νανοτεχνολογίας είναι ο έλεγχος των ιδιοτήτων ενός υλικού, όπως για παράδειγμα η ηλεκτρική συμπεριφορά ή το σημείο τήξης. [27]

Υλικά που έχουν ακριβώς την ίδια χημική σύνθεση, από άποψη στοιχείων και πυκνοτήτων τους, έχουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά όσον αφορά τα βασικά του χαρακτηριστικά, όταν παρασκευάζονται με έλεγχο σε νανοεπίπεδο. Σε αυτό το επίπεδο, οι ιδιότητες της ύλης, όπως για παράδειγμα η ενέργειά της, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το χρώμα η αντοχή ή και το βάρος,

αλλάζουν. Επομένως τα υλικά αυτά φέρουν διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του ίδιου υλικού σε μεγαλύτερη κλίμακα. [28] Η Νανοεπιστήμη αφορά την μελέτη των επιστημονικών αρχών που αφορούν την συμπεριφορά της ύλης στα επίπεδα του νανομέτρου, δηλαδή ατόμων και μορίων. Χρήσιμες είναι αρχές από την Φυσική, και πιο συγκεκριμένα η μελέτη των Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων αλλά και κβαντικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο υλικό. Χρήσιμη είναι επίσης η μελέτη της χημείας, μιας και οι μέθοδοι ανάπτυξης των υλικών είναι και ηλεκτροχημικοί. Μπορεί κανείς να πει πως η νανοεπιστήμη είναι οριζόντια μιας και η μελέτη της απαιτεί μελέτη πολλών επιστημών αλλά και βοηθάει στην ραγδαία ανάπτυξη πολλών τεχνολογιών, όπως για παράδειγμα αυτήν της Ηλεκτρονικής. Ας ορίσουμε την Ηλεκτρονική σαν τεχνολογία ελέγχου και παρατήρησης ηλεκτρικών φορέων. Νανοηλεκτρονική λοιπόν θα είναι χώρος της Ηλεκτρονικής, όπου τα στοιχεία θα είναι διαστάσεων νανομέτρου. [29]

4.3.2 Βασικές έννοιες για την μελέτη νανοδομών

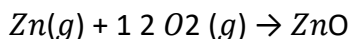
Οι νανοδομές και τα νανοϋλικά φέρουν μεγάλο λόγο επιφανειακών ατόμων ανά μονάδα όγκου. Ο λόγος αυτός μεταβάλλεται δραματικά κάθε φορά που διαιρείται ένα μακροσκοπικό αντικείμενο σε μικρότερα μέρη. Αυτή η μεταβολή επηρεάζει και τον λόγο των επιφανειακών ατόμων προς το σύνολο των ατόμων στον όγκο της δομής. Αυτό μεταβάλλει την επιφανειακή ενέργεια των νανοδομών, που αποτελεί βασικό παράγοντα της διαφορετικής φυσικής και χημικής συμπεριφοράς των νανοδομών έναντι των ίδιων υλικών αλλά στην κανονική τους κατάσταση. Η μελέτη της επιφανειακής ενέργειας ενδιαφέρει επίσης για την διατήρηση της νανοδομής σε διάφορες συνθήκες. Ένα πολύ συχνό παράδειγμα, είναι η τάση των πολύ μικρών δομών να συσσωματώνονται δημιουργώντας μία μεγαλύτερη. Μπορεί αυτό με κατάλληλους ελέγχους να φέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα, όμως τις περισσότερες φορές είναι παράγοντας καταστροφής της νανοδομής, οπότε ανεπιθύμητο φαινόμενο. [26] Τα κρυσταλλικά υλικά, θεωρητικά είναι άπειρη επανάληψη μιας στοιχειώδους κυψελίδας. Αυτό απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Στο εσωτερικό του κρυσταλλικού υπάρχουν ατέλειες ενώ στα όρια του υλικού δεν συνεχίζει η ομοιομορφία της επανάληψης μιας και ύστερα από αυτά δεν υπάρχουν όμοιες ελκτικές δυνάμεις να συνεχίσουν την δομή. [17] Για την διατήρηση της ισορροπίας των δομών και την αποφυγή της κατάρρευσής τους ή της δημιουργίας συσσωματωμάτων πρέπει να γίνει έλεγχος της επιφανειακής ενέργειας. Αυθόρμητα, τα επιφανειακά άτομα θα ολισθήσουν προς το εσωτερικό του υλικού ή πλεγματικά έτσι ώστε να ελαττωθεί η επιφανειακή ενέργεια. [26]

Ένας άλλος τρόπος, περιορισμού της επιφανειακής ενέργειας είναι ο χημικός. Τα επιφανειακά μόρια θα σχηματίσουν χημικούς δεσμούς για απορρόφηση της επιφανειακής τους ενέργειας, με την προϋπόθεση ύπαρξης των κατάλληλων χημικών στοιχείων στο περιβάλλον, άρα λιγότερο αυθόρμητος τρόπος.

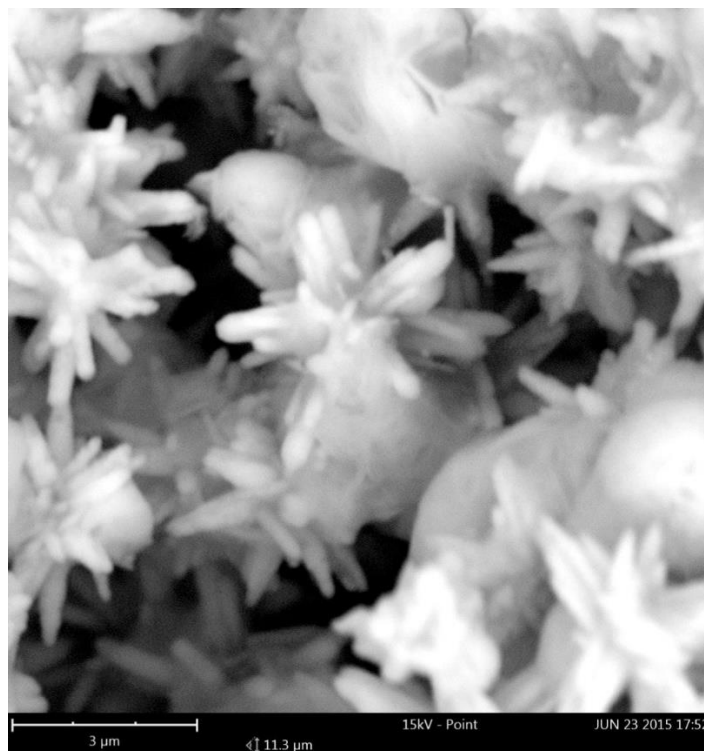
4.4 Nanoflowers

Τα nanoflowers, είναι νανοδομές με σχήμα που θυμίζει λουλούδια. Δεν εμφανίζονται συχνά στην βιβλιογραφία αν και τελευταία συγκεντρώνουν ενδιαφέρον για εφαρμογές οπτοηλεκτρονικών συσκευών, αισθητήρων, φωτοβολταϊκών αλλά και σαν καταλύτες σε διάφορες εφαρμογές. Υπάρχουν λοιπόν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να αναπτυχθούν τα nanoflowers και αποτελούνται από διάφορα υλικά όπως στοιχειώδη μέταλλα, οργανικά, οξειδίων μετάλλων και άλλα. [30]

Τα οξείδια μετάλλων, μαζί με τα στοιχειώδη μέταλλα, εμφανίζουν συχνότερα την μορφή των nanoflowers. Η διαδικασίες παραγωγής βασίζονται στο μηδενικό σθένος της μεταλλικής οξείδωσης ή στην αποσύνθεση υδροξυλίων και άλλων ενώσεων. Μεταξύ των άλλων, το ZnO έχει χαρακτηριστεί περισσότερο καθώς εμφανίζει πλήθος εφαρμογών, όπως για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά. Τα ZnO nanoflowers, εμφανίζονται με απλή οξείδωση του ψευδαργύρου. Η τελική του μορφολογία εξαρτάται έντονα από την θερμοκρασία, καθώς εκτός από nanoflowers μπορούν να δημιουργηθούν και άλλες δομές. Με την παρακάτω αντίδραση, στους 550°C, εμφανίζονται τα nanoflowers: [31]



Τα ZnO nanoflowers εμφανίζουν εξαγωνική κρυστάλλωση Wurtzite, με μέσο μέγεθος κρυστάλλου 48nm. Είναι II-VI ημιαγωγός κατάλληλος για πολλαπλές εφαρμογές, παρουσιάζει αρκετά μεγάλο ενεργειακό, $E_g = 3.37\text{eV}$, έχει μεγάλη ενέργεια εξιτονίων 60 meV, εμφανίζει κινητικότητα ηλεκτρονίων $115\text{-}155\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, ενώ έχει εξαιρετική χημική σταθερότητα.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση ZnO nanoflower από SEM.

4.5 Χρήσεις και εφαρμογές ZnO nanoflowers

Τα ZnO nanoflowers έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους αλλά και της μορφολογίας τους. Αρχικά εμφανίζουν στο υπεριώδες φάσμα, ικανότητα φωτοβολταϊκής μετατροπής, λειτουργούν ως φίλτρα υπεριώδους ακτινοβολίας, ανιχνεύουν την παρουσία αερίων για την οποία λόγω της μορφολογίας των nanoflowers, η ανίχνευση γίνεται με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια, εμφανίζουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες [31] αλλά και μη ηλεκτρικές εφαρμογές όπως καταλυτική συμπεριφορά σε αντιδραστήρια είναι άξιες να αναφερθούν.

Οι βασικές εφαρμογές τους είναι : [31]

- Ανιχνευτές αερίων
- Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς ρεύματος
- Dye – sensitized φωτοβολταϊκά κελιά (DSSC)
- Αντανεκλαστικές επενδύσεις
- Συσκευές εκπομπής πεδίου
- Οπτοηλεκτρικά υλικά
- Λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας

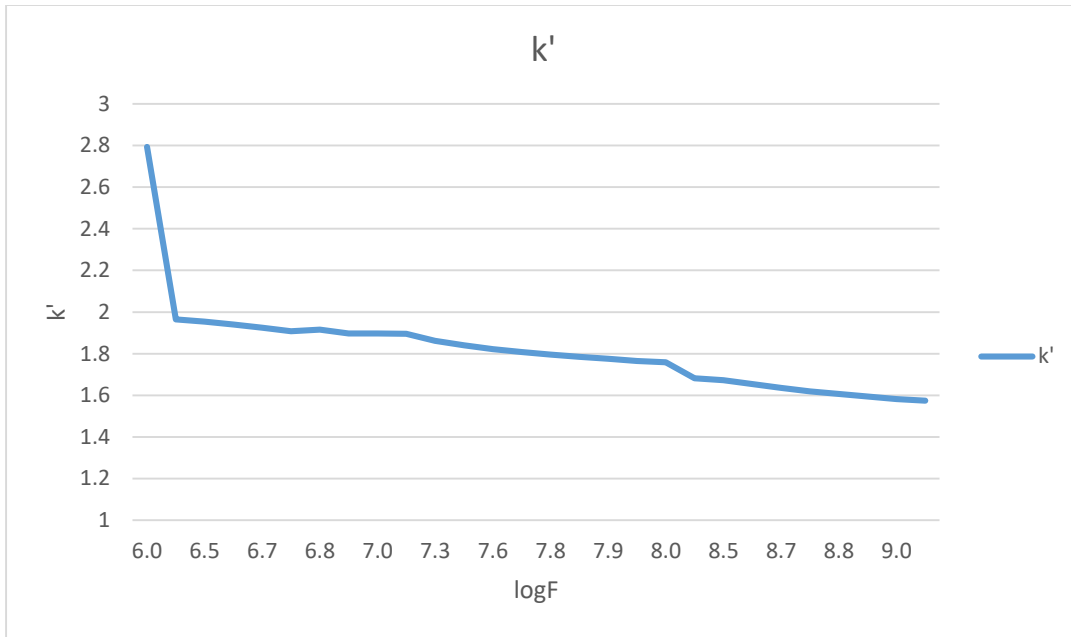
- Υλικά που εμποδίζουν την διέλευση υπεριώδους ακτινοβολίας
- Ρυθμιστές φωτός
- Υλικά LED εταιροδομών

Λέγοντας πως είναι πολλαπλών εφαρμογών, εκτός των παραπάνω εφαρμογών, το ZnO, φαίνεται παράλληλα με την φωτοβολταϊκή μετατροπή να παράγει ενέργεια και στο σκοτάδι, ως ανιχνευτής αερίων ή και με ασκούμενη πίεση στην επιφάνεια των κρυστάλλων του, ως δηλαδή πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας. Η πρώτη παρουσιάζεται μέσω διαδικασιών εξουδετέρωσης πολωμένων νοθεύσεων που βρίσκονται και στον αέρα, όπως το υδρογόνο, ή το νερό με το υδροξύλιο. [30] Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται και στο ZnO μορφής nanorods. Τα nanoflowers είναι σφαιρίδια που έχουν αναπτύξει nanorods προς διάφορες κατευθύνσεις. Για τον λόγο αυτόν εμφανίζουν παρόμοιες ιδιότητες με καλύτερη όμως κατανομή. Επίσης στην περίπτωση της γήρανσης και καταπόνησης των nan-flowers είναι δυνατόν να σπάσουν εμφανίζοντας nanorods.

4.6 Αποτελέσματα μετρήσεων k' σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Cp[F]	D	Rp[ohm]	FREQ[Hz]	logF	k'
2.01E-12	0.1764	449300	1.00E+06	6.0000	5.6981
1.65E-12	0.1190	405100	2.00E+06	6.3010	4.6850
1.66E-12	0.1015	315500	3.00E+06	6.4771	4.7020
1.64E-12	0.0870	279800	4.00E+06	6.6021	4.6396
1.61E-12	0.0780	252900	5.00E+06	6.6990	4.5772
1.61E-12	0.0780	211900	6.00E+06	6.7782	4.5573
1.59E-12	0.0732	195000	7.00E+06	6.8451	4.5233
1.58E-12	0.0718	175000	8.00E+06	6.9031	4.4921
1.58E-12	0.0724	154600	9.00E+06	6.9542	4.4807
1.57E-12	0.0697	145600	1.00E+07	7.0000	4.4552
1.54E-12	0.0585	88620	2.00E+07	7.3010	4.3558
1.51E-12	0.0546	64240	3.00E+07	7.4771	4.2963
1.50E-12	0.0512	51850	4.00E+07	7.6021	4.2565
1.49E-12	0.0496	43070	5.00E+07	7.6990	4.2310
1.48E-12	0.0475	37730	6.00E+07	7.7782	4.2054
1.48E-12	0.0473	32570	7.00E+07	7.8451	4.1884
1.47E-12	0.0454	29780	8.00E+07	7.9031	4.1714
1.47E-12	0.0443	27220	9.00E+07	7.9542	4.1600
1.46E-12	0.0427	25470	1.00E+08	8.0000	4.1487
1.44E-12	0.0370	14950	2.00E+08	8.3010	4.0806
1.43E-12	0.0346	10740	3.00E+08	8.4771	4.0551
1.43E-12	0.0336	8306	4.00E+08	8.6021	4.0465
1.42E-12	0.0324	6909	5.00E+08	8.6990	4.0409
1.43E-12	0.0325	5728	6.00E+08	8.7782	4.0465
1.43E-12	0.0330	4812	7.00E+08	8.8451	4.0636
1.44E-12	0.0331	4173	8.00E+08	8.9031	4.0891
1.45E-12	0.0322	3785	9.00E+08	8.9542	4.1146
1.47E-12	0.0335	3235	1.00E+09	9.0000	4.1657

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα που απεικονίζει το συντελεστή k' σε συνάρτηση με τον λογάριθμο της συχνότητας.



Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή k' σε συνάρτηση με τον λογάριθμο της συχνότητας της ρητίνης με πρόσμιξη nanoflower ZnO

Παρατηρούμε ότι η διηλεκτρική διαπερατότητα της ρητίνης με πρόσμιξη nanoflower ZnO είναι μικρότερη από αυτήν του διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 , (η οποία είναι 3,9) σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων από 1 MHz έως 1GHz. Αυτό καθιστά το υλικό αυτό ως low-k υλικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΪΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΚΑΤΑΠΟΝΗΘΕΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

5.1 Περιγραφή διαδικασίας λήψης των μετρήσεων

Για την ποιοτική επιθεώρηση των φωτοβολταϊκών κελίων πραγματοποιούνται μετρήσεις της εσωτερικής αντίστασης (R_s) και της μέγιστης ισχύος (P_{PK}). Οι μετρήσεις αυτές προκύπτουν από τις μετρούμενες I-V χαρακτηριστικές του κάθε στοιχείου.

Για την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός με τεχνητή δέσμη φωτός η οποία προσπίπτει στο στοιχείο το οποίο είναι τοποθετημένο στην μετρητική επιφάνεια.



Εικόνα 5.1: Επιφάνεια μέτρησης του κελιού και κουβούκλιο που εσωκλείει την λάμπα παραγωγής της τεχνητής δέσμης.

Στη συνέχεια μέσω συνδεδεμένων ηλεκτροδίων στις επαφές του στοιχείου παράγονται τα αποτελέσματα της μέτρησης από ένα μηχάνημα το οποίο αποδίδει την μέτρηση σε ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα τάσης - έντασης (I-V χαρακτηριστική του στοιχείου).



Εικόνα 5.2 Μηχάνημα παραγωγής I-V χαρακτηριστικής

Οι μετρήσεις έγιναν σε συνολικά έξι (6) στοιχεία, 2 για κάθε επίπεδο θερμοκρασιακής καταπόνησης που έχει υποστεί το κάθε κελί. Δυο μετρήθηκαν χωρίς να έχουν καταπονηθεί για να ληφθούν ως σημείο αναφοράς. Δυο είχαν υποστεί καταπόνηση σε θερμοκρασία τριακοσίων (300) βαθμών κελσίου, και δυο σε θερμοκρασία τετρακοσίων πενήντα (450) βαθμών κελσίου.

Ο λόγος που εφαρμόστηκαν οι συγκεκριμένες θερμοκρασίες είναι για να μελετηθούν οι διαφορές στην απόδοση των στοιχείων μετά από την παραγωγή οξειδίων του πυριτίου που εμφανίζονται στην επιφάνεια των στοιχείων μετά από θερμοκρασιακή καταπόνηση.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (monocrystalline silicon), διαστάσεων 125 x 125 mm.

Vicocell Monoseries Datasheet	
Model	125-m
Material	monocrystalline silicon
Format	125*125 mm +/- 0.5 mm
Cell Efficiency	17.60%
Maximum Power	2.7 w
Busbar	2BB
Thickness	200 μm +/-30μm
Front (-)	1.5 mm silver bus bars, blue silicon nitride anti-reflecting coating
Back (+)	2.3 mm wide soldering pads (silver), aluminium back surface filed
Current Temperature Coefficient	+0.03%/°C
Voltage Temperature Coefficient	-0.32%/°C
Power Temperature Coefficient	-0.41%/°C

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις.

5.2 STC συνθήκες

Προκειμένου να υπάρχει μια κοινή συνισταμένη, οι κατασκευαστές των φωτοβολταϊκών δίνουν τα χαρακτηριστικά των πλαισίων, σε συγκεκριμένες συνθήκες που ονομάζονται STC (Standard Test Condition).

Τα μεγέθη STC ορίζονται ως εξής:

1. Ηλιακή ακτινοβολία $G=1000 \text{ Watt/m}^2$
2. Θερμοκρασία κυττάρων $T=25^\circ\text{C}$
3. Πυκνότητα μάζας αέρα $AM=1,5$

Η μάζα του αέρα AM είναι καθαρός αριθμός και αποτελεί μέτρο του πώς ο διαφορετικός δρόμος που ακολουθεί η ακτινοβολία επηρεάζει το φασματικό περιεχόμενο και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Δίνεται από τον τύπο $AM=1/\cos\theta$, όπου θ η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης ή αλλιώς

$AM=(1+(S/H)^2)^{1/2}$, όπου S το μήκος της σκιάς ενός αντικειμένου και H το ύψος του.

Γνωρίζοντας τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός πλαισίου σε συνθήκες STC μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα και για τυχαίες συνθήκες περιβάλλοντος.

Οι διαφορές σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες και σε STC συνθήκες μπορεί να είναι τεράστιες και γι' αυτό η γνώση των χαρακτηριστικών σε πρότυπες συνθήκες βοηθάει στην σύγκριση διαφορετικών πλαισίων και όχι στον υπολογισμό μιας πραγματικής εγκατάστασης.

5.3 Μετατροπή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων από πραγματικές συνθήκες σε συνθήκες STC

Για την μετατροπή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων στις συνθήκες STC θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος που αναλύεται στο πρότυπο IEC 60891 της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission) [31].

Το συγκεκριμένο πρότυπο αναλύει τρεις διαδικασίες μετατροπής από τις οποίες στο συγκεκριμένο πείραμα επιλέχθηκε η πρώτη.

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1)$$

$$V_2 = V_1 - R_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1)$$

Όπου :

I_1 και V_1	τα σημεία της χαρακτηριστικής που έχουν μετρηθεί υπό πραγματικές συνθήκες
I_2 και V_2	οι τιμές που έχουν προκύψει μετά τη διορθωτική μετατροπή (STC values)
G_1	η τιμή της ακτινοβολίας υπό πραγματικές συνθήκες μέτρησης
G_2	η τιμή της ακτινοβολίας στις συνθήκες STC
T_1	η θερμοκρασία του στοιχείου την στιγμή της μέτρησης
T_2	η θερμοκρασία του στοιχείου στις συνθήκες STC
I_{sc}	το μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης του στοιχείου
α και β	συντελεστής θερμοκρασίας έντασης και τάσης αντίστοιχα, οι οποίοι δίνονται από τον κατασκευαστή
R_s	η εσωτερική αντίσταση του στοιχείου
κ	συντελεστής διόρθωσης καμπυλότητας

Η συγκεκριμένη μέθοδος μετατροπής απαιτεί σταθερή ακτινοβολία φωτός και θερμοκρασία στοιχείου καθ' όλη την μετρητική διαδικασία. Αυτό για να επιτευχθεί απαιτεί συνεχώς διακοπτόμενες μετρήσεις και εξωτερικούς μηχανισμούς ρύθμισης της θερμοκρασίας του στοιχείου, κάτι το οποίο αυξάνει σημαντικά τον χρόνο αλλά και το κόστος της μέτρησης.

Αντ' αυτού κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή ο μέσος όρος θερμοκρασίας και ακτινοβολίας για κάθε σημείο της I-V.

5.4 Υπολογισμός εσωτερικής αντίστασης

Για τον υπολογισμό της εσωτερικής αντίστασης ακολουθήθηκε η διαδικασία που παρουσιάζεται στην εργασία "PEAK-POWER AND INTERNAL SERIES RESISTANCE MEASUREMENT UNDER NATURAL AMBIENT CONDITIONS" του Andreas Wagner [32].

Θα υπολογιστούν συνολικά 3 εσωτερικές αντιστάσεις για τις 3 θερμοκρασίες καταπόνησης των στοιχείων. Για κάθε μια τιμή της εσωτερικής αντίστασης θα χρησιμοποιηθούν 2 σετ τιμών από κάθε κελί από τα 3 ζεύγη. Ορίζουμε για κάθε υπολογισμό κελί 1 το κελί με το μεγαλύτερο ρεύμα βραχυκύκλωσης και κελί 2 το κελί με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η σκοπιμότητα του ορισμού αυτού θα επεξηγηθεί παρακάτω.

Ο τελικός τύπος υπολογισμού της εσωτερικής αντίστασης είναι ο παρακάτω:

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_{sc1} - I_{sc2}}$$

Όπου :

I_{sc1} το ρεύμα βραχυκύκλωσης του στοιχείου 1

I_{sc2} το ρεύμα βραχυκύκλωσης του στοιχείου 2

Οι τάσεις V_1 και V_2 προκύπτουν από τον παρακάτω τύπο:

$$V = V_T \ln\left(\frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0}\right) - IR_{pv}$$

Όπου:

$$R_{pv} = -M \frac{I_{sc}}{I_{p \max}} + \frac{V_{p \max}}{I_{p \max}} \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{p \max}}\right)$$

$$V_T = -(M + R_{pv}) I_{sc}$$

$$I_0 = I_{sc} e^{-\frac{V_{oc}}{V_T}}$$

$$I_{ph} = I_{sc}$$

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \left(k_1 \frac{I_{p \max} V_{p \max}}{I_{sc} V_{oc}} + k_2 \frac{V_{p \max}}{V_{oc}} + \right. \\ \left. + k_3 \frac{I_{p \max}}{I_{sc}} + k_4 \right)$$

Όπου οι τιμές των σταθερών k_i δίνονται ως:

$$k = \begin{pmatrix} -5.411 \\ 6.450 \\ 3.417 \\ -4.422 \end{pmatrix}$$

Η τιμή του I για κάθε cell (I_i) προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$I_i = I_{sc1} - 0.5 \times I_{sc2}$, με I_{sc2} το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης από τις μετρήσεις των 2 στοιχείων.

5.4 Παρουσίαση μετρήσεων

5.4.1 Μετρήσεις κελιών χωρίς θερμοκρασιακή καταπόνηση

Για το κελί που δεν είχε υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του είχε την μεγαλύτερη τιμή, οι μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες έχουν ως εξής:

Area	125*125
Voc	0.61
Isc	5.16
Vmp	0.50
Imp	4.64
Pmax	2.32

Όπου Vmp και Imp η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στην μέγιστη ισχύ στις πραγματικές συνθήκες Pmax.

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
1035.846	0.006	5.163	29.053	0.033
1035.365	0.022	5.150	29.053	0.113
1035.365	0.038	5.141	29.053	0.193
1035.846	0.054	5.134	29.053	0.278
1036.327	0.071	5.126	29.053	0.363
1038.249	0.088	5.125	28.809	0.451
1038.249	0.104	5.116	28.809	0.534
1039.691	0.122	5.112	28.809	0.622
1038.730	0.136	5.098	28.809	0.693
1040.172	0.153	5.094	28.809	0.781
1040.653	0.170	5.085	28.564	0.863
1040.653	0.185	5.076	28.564	0.941
1041.614	0.202	5.070	28.564	1.025
1042.095	0.218	5.060	28.564	1.103
1044.017	0.235	5.059	28.564	1.191
1044.017	0.252	5.050	28.320	1.271
1044.017	0.267	5.040	28.320	1.347
1043.056	0.282	5.028	28.320	1.418
1043.537	0.298	5.020	28.320	1.498
1044.017	0.314	5.010	28.320	1.572
1043.537	0.329	4.997	28.076	1.643
1044.498	0.345	4.988	28.076	1.720
1044.979	0.360	4.976	28.076	1.791
1046.901	0.377	4.970	28.076	1.873
1046.421	0.391	4.951	27.832	1.935

1047.382	0.405	4.937	27.832	2.002
1047.863	0.419	4.916	27.832	2.059
1048.343	0.433	4.898	27.832	2.120
1049.305	0.445	4.873	27.832	2.166
1049.305	0.456	4.844	27.588	2.211
1050.747	0.467	4.812	27.588	2.250
1051.227	0.477	4.777	27.588	2.278
1052.669	0.487	4.740	27.588	2.307
1051.227	0.493	4.689	27.588	2.313
1051.708	0.501	4.644	27.588	2.325
1051.708	0.506	4.590	27.588	2.324
1051.708	0.512	4.536	27.588	2.324
1053.631	0.517	4.481	27.588	2.319
1053.631	0.522	4.422	27.588	2.309
1054.592	0.527	4.364	27.344	2.298
1054.112	0.530	4.302	27.344	2.280
1055.073	0.534	4.240	27.344	2.264
1055.073	0.537	4.175	27.344	2.242
1055.073	0.540	4.111	27.344	2.220
1055.554	0.543	4.044	27.344	2.195
1055.073	0.545	3.980	27.344	2.170
1056.034	0.548	3.911	27.344	2.143
1055.554	0.550	3.842	27.344	2.114
1056.034	0.553	3.774	27.100	2.086
1055.073	0.555	3.704	27.100	2.054
1055.554	0.557	3.634	27.344	2.023
1055.554	0.559	3.565	27.100	1.991
1055.554	0.560	3.492	27.100	1.957
1056.515	0.562	3.421	27.100	1.924
1057.476	0.564	3.352	27.100	1.891
1059.880	0.566	3.280	27.100	1.856
1059.880	0.567	3.206	27.100	1.820
1060.360	0.569	3.137	27.100	1.785
1060.360	0.570	3.063	27.100	1.747
1060.841	0.572	2.989	27.100	1.709
1062.283	0.573	2.918	27.100	1.672
1061.322	0.575	2.842	26.855	1.633
1061.802	0.576	2.768	27.100	1.594
1061.802	0.577	2.697	26.855	1.556
1063.244	0.578	2.622	26.855	1.517
1061.802	0.580	2.549	26.855	1.477

1061.802	0.581	2.477	26.855	1.438
1061.322	0.582	2.402	26.855	1.397
1061.802	0.583	2.329	26.855	1.357
1062.764	0.584	2.257	26.855	1.317
1062.283	0.585	2.181	26.855	1.275
1062.764	0.586	2.108	26.855	1.234
1062.283	0.587	2.032	26.611	1.192
1063.725	0.588	1.956	26.855	1.149
1063.725	0.589	1.882	26.855	1.108
1063.725	0.590	1.806	26.855	1.065
1064.206	0.591	1.730	26.611	1.022
1064.206	0.592	1.657	26.611	0.980
1066.128	0.592	1.581	26.855	0.937
1066.609	0.593	1.504	26.611	0.892
1067.090	0.594	1.431	26.611	0.850
1065.648	0.595	1.354	26.611	0.805
1065.648	0.596	1.277	26.611	0.761
1066.128	0.597	1.203	26.611	0.718
1065.648	0.597	1.125	26.611	0.672
1066.128	0.598	1.048	26.611	0.627
1066.128	0.599	0.974	26.611	0.583
1067.090	0.600	0.897	26.611	0.538
1066.609	0.600	0.822	26.611	0.494
1067.090	0.601	0.748	26.611	0.449
1066.128	0.602	0.670	26.367	0.403
1066.128	0.602	0.596	26.611	0.359
1066.609	0.603	0.520	26.611	0.314
1065.648	0.604	0.442	26.367	0.267
1066.609	0.604	0.367	26.611	0.222
1066.609	0.605	0.290	26.367	0.175
1067.570	0.606	0.212	26.367	0.128
1066.128	0.606	0.138	26.367	0.083
1066.609	0.607	0.060	26.367	0.037

Όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για την αλλαγή θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές για ακτινοβολία και θερμοκρασία.

Οι τιμές αυτές είναι $G_{\text{MEDIAN}} = G_1 = 1055.034 \text{ Watt/m}^2$ και για την θερμοκρασία $T_{\text{MEDIAN}} = T_1 = 27.407 \text{ }^\circ\text{C}$.

Για το κελί που δεν είχε υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του είχε την μικρότερη τιμή, οι μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες έχουν ως εξής:

Area	125*125
Voc	0.619
Isc	5.056
Vmp	0.530
Imp	4.678
Pmax	2.478

Όπου Vmp και Imp η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στην μέγιστη ισχύ στις πραγματικές συνθήκες Pmax.

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
1013.735	0.060	5.070	28.076	0.303
1011.812	0.023	5.065	28.320	0.117
1010.370	0.039	5.058	28.076	0.196
1014.696	0.322	5.058	28.076	1.630
1010.370	0.003	5.058	28.076	0.017
1009.409	0.091	5.052	28.076	0.458
1008.928	0.232	5.051	28.076	1.173
1011.332	0.302	5.049	28.076	1.526
1012.774	0.337	5.048	28.076	1.703
1008.928	0.072	5.048	28.320	0.365
1008.928	0.248	5.045	28.076	1.251
1007.967	0.141	5.043	28.320	0.713
1007.486	0.159	5.043	28.076	0.803
1008.448	0.265	5.042	28.320	1.336
1013.254	0.353	5.041	28.076	1.780
1007.486	0.212	5.040	28.076	1.067
1007.486	0.106	5.040	28.076	0.533
1009.409	0.283	5.040	28.076	1.424
1006.044	0.193	5.038	28.076	0.973
1006.525	0.176	5.038	28.076	0.887
1006.525	0.123	5.037	28.320	0.618
1009.409	0.368	5.027	28.076	1.848
1010.370	0.384	5.025	28.320	1.932
1009.890	0.400	5.020	28.076	2.010
1011.812	0.417	5.014	28.076	2.091

1008.928	0.430	4.995	28.320	2.146
1010.370	0.446	4.991	28.076	2.228
1007.486	0.457	4.962	28.076	2.270
1011.332	0.473	4.956	28.076	2.346
1010.370	0.483	4.923	28.076	2.378
1010.851	0.494	4.894	28.076	2.418
1007.967	0.501	4.853	28.076	2.432
1008.928	0.510	4.816	28.320	2.457
1010.370	0.518	4.774	28.076	2.472
1011.332	0.524	4.728	28.076	2.477
1010.370	0.530	4.678	28.076	2.478
1010.851	0.534	4.621	28.076	2.468
1008.928	0.538	4.567	28.076	2.458
1012.293	0.543	4.511	28.076	2.449
1012.293	0.547	4.454	28.076	2.434
1012.293	0.550	4.395	28.320	2.416
1010.851	0.553	4.332	28.076	2.395
1008.928	0.556	4.272	28.076	2.374
1006.525	0.558	4.210	28.076	2.348
1007.006	0.561	4.147	28.076	2.325
1007.486	0.563	4.084	28.076	2.298
1004.602	0.565	4.020	28.076	2.271
1006.525	0.567	3.954	28.076	2.243
1004.122	0.569	3.889	28.076	2.213
1008.928	0.571	3.824	28.076	2.185
1008.928	0.573	3.756	28.076	2.153
1009.409	0.575	3.690	28.076	2.121
1007.486	0.576	3.621	28.076	2.087
1011.812	0.578	3.554	28.076	2.055
1012.293	0.580	3.488	28.076	2.022
1011.332	0.581	3.419	28.076	1.987
1011.332	0.583	3.350	28.076	1.952
1012.293	0.584	3.284	28.076	1.917
1014.216	0.585	3.216	28.076	1.882
1009.890	0.586	3.144	28.076	1.843
1007.486	0.587	3.076	28.076	1.806
1006.044	0.588	3.005	28.076	1.768
1008.928	0.590	2.936	28.320	1.731
1007.006	0.591	2.867	28.076	1.693
1005.083	0.592	2.796	28.076	1.654
1003.160	0.593	2.725	28.076	1.615

1006.044	0.594	2.658	28.076	1.578
1005.564	0.595	2.587	28.320	1.539
1005.083	0.596	2.519	28.320	1.500
1004.122	0.597	2.450	28.076	1.462
1006.044	0.598	2.378	28.076	1.421
1005.083	0.598	2.309	28.076	1.382
1007.486	0.599	2.240	28.076	1.342
1005.564	0.600	2.168	28.076	1.301
1007.006	0.601	2.099	28.320	1.261
1006.044	0.602	2.026	28.076	1.219
1006.525	0.602	1.953	28.076	1.177
1005.564	0.603	1.883	28.320	1.136
1007.006	0.604	1.811	28.076	1.094
1006.525	0.605	1.739	28.076	1.052
1009.409	0.606	1.669	28.320	1.011
1013.254	0.606	1.597	28.076	0.968
1013.735	0.607	1.524	28.076	0.925
1015.177	0.608	1.454	28.076	0.884
1016.139	0.608	1.381	28.320	0.840
1016.139	0.609	1.308	28.076	0.797
1016.139	0.610	1.237	28.320	0.754
1015.177	0.610	1.164	28.076	0.711
1011.812	0.611	1.091	28.076	0.666
1011.812	0.611	1.021	28.320	0.624
1010.370	0.612	0.947	28.076	0.580
1010.370	0.613	0.876	28.320	0.537
1010.851	0.613	0.806	28.076	0.494
1013.254	0.614	0.733	28.320	0.450
1011.812	0.614	0.661	28.076	0.406
1014.696	0.615	0.590	28.076	0.363
1013.254	0.616	0.517	28.076	0.318
1015.177	0.616	0.446	28.076	0.275
1015.658	0.617	0.373	28.076	0.230
1013.735	0.617	0.299	28.076	0.185
1014.216	0.618	0.228	28.320	0.141
1013.254	0.618	0.155	28.320	0.096
1013.254	0.619	0.082	28.076	0.051
1012.774	0.619	0.011	28.076	0.007

Οι μέσες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας είναι $G_{\text{MEDIAN}} = G_2 = 1009.857 \text{ Watt/m}^2$ και για την θερμοκρασία

$$T_{\text{MEDIAN}} = T_2 = 28.127 \text{ }^\circ\text{C}$$

Οι τιμές των συντελεστών θερμοκρασίας έντασης και τάσης αντίστοιχα, οι οποίοι δίνονται από τον κατασκευαστή έχουν ως εξής:

$$A = 0.0003 \text{ και } B = -0.0032$$

Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης R_s υπολογίστηκε και βρέθηκε $R_s = 0.1965 \text{ } \Omega$.

Με την μέθοδο που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα προέκυψαν οι παρακάτω διορθωμένες μετρήσεις (ανηγμένες σε συνθήκες STC)

Istc	Vstc	Pstc
5.007	0.029	0.147
5.015	0.049	0.247
5.008	0.065	0.325
5.020	0.086	0.431
4.997	0.098	0.492
5.002	0.117	0.584
4.990	0.132	0.657
4.987	0.149	0.742
4.993	0.167	0.836
4.992	0.185	0.925
4.988	0.202	1.007
4.988	0.219	1.093
4.990	0.238	1.186
5.001	0.258	1.291
4.994	0.274	1.368
4.991	0.291	1.453
4.989	0.309	1.539
4.999	0.328	1.641
5.007	0.348	1.744
4.997	0.363	1.816
4.991	0.379	1.891
4.977	0.394	1.959
4.975	0.410	2.042
4.970	0.426	2.119
4.964	0.443	2.198
4.945	0.455	2.252

4.940	0.472	2.333
4.912	0.483	2.373
4.906	0.499	2.448
4.873	0.509	2.478
4.844	0.520	2.517
4.803	0.526	2.529
4.766	0.535	2.552
4.724	0.543	2.565
4.678	0.549	2.568
4.627	0.555	2.566
4.571	0.559	2.554
4.517	0.563	2.542
4.461	0.567	2.530
4.403	0.571	2.513
4.345	0.574	2.492
4.282	0.577	2.469
4.222	0.579	2.445
4.160	0.581	2.418
4.096	0.584	2.391
4.033	0.586	2.363
3.969	0.588	2.333
3.904	0.590	2.302
3.839	0.591	2.270
3.774	0.593	2.239
3.706	0.595	2.206
3.640	0.597	2.171
3.571	0.598	2.135
3.504	0.600	2.101
3.438	0.601	2.065
3.368	0.602	2.028
3.300	0.603	1.990
3.234	0.604	1.954
3.165	0.605	1.917
3.094	0.606	1.876
3.025	0.607	1.836
2.955	0.608	1.796
2.885	0.609	1.757
2.817	0.610	1.718
2.746	0.611	1.676
2.675	0.611	1.635
2.608	0.612	1.597

2.537	0.613	1.555
2.469	0.614	1.515
2.400	0.614	1.474
2.328	0.615	1.432
2.259	0.616	1.391
2.190	0.616	1.350
2.117	0.617	1.306
2.048	0.618	1.265
1.975	0.618	1.221
1.903	0.619	1.177
1.833	0.619	1.135
1.761	0.620	1.092
1.689	0.620	1.048
1.619	0.621	1.005
1.547	0.621	0.961
1.474	0.622	0.917
1.404	0.623	0.874
1.331	0.623	0.829
1.258	0.623	0.784
1.187	0.624	0.740
1.114	0.624	0.695
1.040	0.624	0.650
0.970	0.625	0.606
0.897	0.625	0.561
0.826	0.626	0.517
0.755	0.626	0.473
0.682	0.626	0.427
0.611	0.627	0.383
0.540	0.627	0.339
0.466	0.627	0.293
0.396	0.628	0.248
0.323	0.628	0.203
0.249	0.628	0.156
0.178	0.629	0.112
0.105	0.629	0.066
0.032	0.629	0.020

Παρατηρείται ότι η ανηγμένη σε STC συνθήκες μέγιστη ισχύς έχει αλλάξει.

θ (°C)	I (A)	V (V)	P (W)
0	4.678	0.549	2.568

5.4.2 Μετρήσεις στοιχείων με θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 300 βαθμούς κελσίου

Για το κελί που είχε υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 300 βαθμούς κελσίου και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του είχε την μεγαλύτερη τιμή, οι μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες έχουν ως εξής:

Area	125*125
Voc	0.62
Isc	4.99
Vmp	0.53
Imp	4.63
Pmax	2.46

Όπου Vmp και Imp η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στην μέγιστη ισχύ στις πραγματικές συνθήκες Pmax.

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
957.977	0.004	5.003	29.541	0.020
956.055	0.013	4.991	29.541	0.065
955.574	0.025	4.991	29.541	0.127
953.651	0.203	4.990	29.785	1.011
954.613	0.036	4.986	29.541	0.179
952.690	0.187	4.985	29.541	0.934
953.171	0.214	4.985	29.541	1.068
952.690	0.148	4.984	29.541	0.737
952.690	0.174	4.984	29.541	0.867
952.690	0.227	4.984	29.785	1.132
953.171	0.267	4.984	29.541	1.331
952.690	0.109	4.983	29.785	0.542
952.690	0.161	4.983	29.785	0.801
952.209	0.134	4.982	29.541	0.670
953.171	0.047	4.982	29.541	0.233
952.209	0.083	4.981	29.541	0.414
952.690	0.293	4.981	29.785	1.458
953.171	0.320	4.981	29.785	1.595
952.209	0.058	4.980	29.785	0.291
951.729	0.095	4.980	29.541	0.474
951.729	0.121	4.980	29.541	0.601
952.209	0.239	4.980	29.541	1.192
952.209	0.253	4.980	29.541	1.258

952.209	0.279	4.979	29.785	1.388
952.209	0.305	4.979	29.541	1.520
951.248	0.069	4.976	29.541	0.344
952.209	0.332	4.973	29.541	1.650
951.248	0.346	4.971	29.541	1.719
951.248	0.360	4.967	29.541	1.787
951.248	0.374	4.964	29.541	1.855
952.209	0.389	4.964	29.541	1.930
952.209	0.402	4.958	29.541	1.992
953.171	0.417	4.955	29.785	2.065
952.209	0.429	4.943	29.785	2.121
953.651	0.443	4.937	29.541	2.186
953.171	0.452	4.918	29.785	2.225
953.171	0.465	4.903	29.541	2.278
953.651	0.474	4.879	29.541	2.312
953.171	0.485	4.856	29.541	2.354
954.613	0.494	4.831	29.541	2.389
954.132	0.503	4.802	29.541	2.413
954.613	0.511	4.772	29.541	2.437
953.651	0.516	4.735	29.785	2.442
953.651	0.522	4.704	29.541	2.457
953.651	0.527	4.667	29.541	2.457
953.651	0.531	4.634	29.541	2.460
954.132	0.534	4.598	29.785	2.455
954.132	0.537	4.563	29.541	2.452
955.093	0.541	4.531	29.541	2.449
953.651	0.543	4.496	29.785	2.440
953.651	0.545	4.464	29.541	2.434
953.651	0.547	4.432	29.541	2.425
952.690	0.549	4.402	29.541	2.418
953.651	0.551	4.372	29.541	2.409
953.171	0.553	4.341	29.785	2.399
953.651	0.554	4.311	29.785	2.390
954.132	0.556	4.281	29.541	2.380
954.613	0.558	4.250	29.541	2.370
953.651	0.559	4.216	29.785	2.356
953.651	0.560	4.181	29.541	2.342
953.171	0.561	4.145	29.785	2.327
953.171	0.563	4.107	29.541	2.311
954.613	0.564	4.065	29.541	2.294
954.132	0.566	4.020	29.541	2.275

954.613	0.567	3.976	29.541	2.256
953.171	0.569	3.931	29.541	2.235
954.132	0.570	3.886	29.785	2.216
954.132	0.571	3.838	29.541	2.194
953.651	0.573	3.792	29.541	2.172
953.171	0.574	3.744	29.541	2.149
952.690	0.575	3.698	29.541	2.127
954.132	0.577	3.649	29.541	2.104
954.132	0.578	3.599	29.785	2.079
954.132	0.579	3.551	29.785	2.055
953.171	0.580	3.502	29.541	2.031
953.171	0.581	3.455	29.541	2.007
954.132	0.582	3.411	29.541	1.984
953.651	0.583	3.368	29.785	1.962
954.613	0.583	3.328	29.541	1.941
954.613	0.584	3.288	29.541	1.921
955.574	0.585	3.248	29.541	1.899
954.132	0.585	3.209	29.785	1.878
954.132	0.586	3.170	29.785	1.858
953.171	0.586	3.132	29.541	1.837
953.651	0.587	3.094	29.785	1.817
954.132	0.588	3.057	29.541	1.797
953.171	0.588	3.018	29.541	1.776
953.651	0.589	2.982	29.541	1.756
953.171	0.590	2.944	29.541	1.736
953.651	0.590	2.906	29.541	1.715
953.651	0.591	2.867	29.541	1.694
953.171	0.591	2.828	29.541	1.672
953.171	0.592	2.788	29.541	1.650
953.171	0.592	2.748	29.541	1.628
953.651	0.593	2.706	29.541	1.604
953.651	0.593	2.663	29.785	1.580
955.093	0.594	2.620	29.541	1.557
953.171	0.595	2.575	29.541	1.531
953.651	0.595	2.531	29.541	1.507
953.171	0.596	2.487	29.785	1.481
952.690	0.596	2.441	29.785	1.456
954.132	0.597	2.397	29.785	1.431
953.651	0.597	2.354	29.541	1.406
954.132	0.598	2.310	29.541	1.381
954.613	0.598	2.266	29.541	1.356

955.093	0.599	2.223	29.541	1.331
954.132	0.599	2.178	29.785	1.306
954.132	0.600	2.134	29.785	1.280
954.132	0.600	2.089	29.541	1.254
954.132	0.601	2.044	29.541	1.228
955.093	0.601	1.999	29.541	1.201
954.132	0.602	1.953	29.541	1.175
954.613	0.602	1.907	29.541	1.148
953.171	0.602	1.862	29.541	1.121
953.171	0.603	1.816	29.541	1.095
952.690	0.603	1.770	29.785	1.068
952.690	0.604	1.724	29.541	1.041
953.171	0.604	1.678	29.785	1.014
953.171	0.605	1.632	29.541	0.987
953.651	0.605	1.586	29.541	0.960
954.132	0.605	1.540	29.541	0.932
954.613	0.606	1.495	29.541	0.905
953.651	0.606	1.449	29.541	0.878
952.690	0.606	1.402	29.541	0.850
952.209	0.607	1.356	29.785	0.823
951.248	0.607	1.307	29.541	0.794
952.690	0.608	1.261	29.541	0.766
952.209	0.608	1.213	29.541	0.738
952.690	0.608	1.167	29.541	0.710
951.729	0.609	1.119	29.541	0.681
952.209	0.609	1.073	29.541	0.653
952.209	0.609	1.024	29.541	0.624
952.209	0.610	0.977	29.785	0.596
951.729	0.610	0.930	29.541	0.567
951.729	0.610	0.882	29.541	0.538
952.690	0.611	0.834	29.541	0.509
952.690	0.611	0.786	29.541	0.480
953.171	0.611	0.739	29.541	0.452
952.690	0.612	0.691	29.785	0.423
952.209	0.612	0.643	29.541	0.394
952.690	0.612	0.595	29.541	0.364
951.729	0.613	0.548	29.785	0.335
952.690	0.613	0.500	29.541	0.307
952.209	0.613	0.453	29.541	0.278
952.209	0.614	0.405	29.541	0.248
950.287	0.614	0.357	29.541	0.219

950.287	0.614	0.309	29.541	0.190
950.287	0.614	0.261	29.785	0.160
949.806	0.614	0.213	29.785	0.131
950.287	0.615	0.165	29.785	0.101
949.325	0.615	0.114	29.785	0.070
950.287	0.615	0.067	29.541	0.041
950.287	0.616	0.019	29.785	0.012

Όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για την αλλαγή θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές για ακτινοβολία και θερμοκρασία.

Οι τιμές αυτές είναι $G_{\text{MEDIAN}} = G_1 = 953.164 \text{ Watt/m}^2$ και για την θερμοκρασία $T_{\text{MEDIAN}} = T_1 = 29.608 \text{ }^\circ\text{C}$

Για το κελί που είχε υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 300 βαθμούς κελσίου και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του είχε την μικρότερη τιμή, οι μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες έχουν ως εξής:

Area	125*125
Voc	0.60
Isc	3.77
Vmp	0.51
Imp	3.29
Pmax	1.69

Όπου Vmp και Imp η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στην μέγιστη ισχύ στις πραγματικές συνθήκες Pmax.

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
667.171	0.008	3.775	31.250	0.030
665.729	0.019	3.766	31.006	0.072
666.691	0.032	3.763	31.006	0.122
666.691	0.045	3.758	31.006	0.168
666.210	0.055	3.747	31.006	0.206
665.249	0.066	3.738	31.006	0.248
666.210	0.078	3.732	30.762	0.292

666.210	0.091	3.728	30.762	0.339
667.171	0.102	3.719	30.762	0.381
668.613	0.116	3.717	30.762	0.431
669.575	0.127	3.707	30.762	0.471
670.055	0.140	3.704	30.762	0.520
669.575	0.150	3.692	30.518	0.555
670.536	0.164	3.689	30.518	0.604
671.017	0.175	3.680	30.518	0.645
672.459	0.189	3.679	30.518	0.695
673.420	0.202	3.674	30.518	0.741
674.381	0.215	3.672	30.273	0.789
675.343	0.228	3.668	30.273	0.835
676.304	0.240	3.663	30.273	0.881
675.343	0.250	3.650	30.273	0.914
674.862	0.261	3.639	30.273	0.950
673.420	0.270	3.623	30.273	0.980
675.343	0.284	3.621	30.273	1.028
673.420	0.293	3.605	30.029	1.057
676.785	0.310	3.610	30.029	1.119
676.785	0.322	3.602	30.029	1.159
679.188	0.337	3.604	30.029	1.214
679.188	0.349	3.595	29.785	1.254
679.188	0.361	3.588	29.785	1.294
678.707	0.372	3.577	30.029	1.330
678.707	0.383	3.566	29.785	1.365
678.707	0.394	3.556	29.785	1.402
679.188	0.404	3.542	29.541	1.432
680.149	0.417	3.535	29.785	1.473
680.149	0.426	3.519	29.541	1.500
682.553	0.439	3.513	29.541	1.543
681.111	0.447	3.492	29.541	1.562
682.553	0.460	3.484	29.541	1.603
682.072	0.467	3.460	29.541	1.616
681.591	0.476	3.443	29.541	1.639
681.591	0.483	3.419	29.297	1.653
682.072	0.491	3.397	29.297	1.668
681.111	0.498	3.372	29.297	1.679
682.553	0.504	3.347	29.297	1.689
681.591	0.509	3.318	29.297	1.690
683.033	0.515	3.289	29.297	1.694
682.553	0.520	3.258	29.297	1.693

684.476	0.525	3.228	29.053	1.694
684.476	0.528	3.196	29.053	1.689
686.879	0.533	3.164	29.297	1.687
687.360	0.536	3.130	29.053	1.679
689.282	0.540	3.097	29.053	1.674
688.321	0.543	3.060	29.053	1.660
688.321	0.546	3.024	29.053	1.650
687.840	0.548	2.985	29.053	1.635
686.879	0.550	2.946	29.053	1.620
688.802	0.552	2.908	29.053	1.605
686.879	0.554	2.867	28.809	1.587
688.321	0.556	2.830	28.809	1.572
688.321	0.557	2.790	29.053	1.554
690.244	0.559	2.752	28.809	1.539
690.724	0.561	2.712	28.809	1.521
691.205	0.563	2.674	28.809	1.504
689.282	0.564	2.633	28.809	1.485
690.244	0.565	2.594	28.809	1.467
690.724	0.567	2.554	28.809	1.448
689.763	0.568	2.513	28.809	1.428
690.724	0.569	2.472	28.809	1.408
688.802	0.571	2.431	28.809	1.387
689.763	0.572	2.390	28.564	1.366
691.205	0.573	2.349	28.564	1.346
690.244	0.574	2.307	28.564	1.323
691.686	0.575	2.266	28.564	1.302
693.608	0.576	2.225	28.564	1.281
693.608	0.577	2.181	28.564	1.258
695.531	0.578	2.139	28.564	1.236
695.531	0.579	2.098	28.564	1.214
695.050	0.579	2.054	28.564	1.190
694.570	0.580	2.012	28.320	1.168
695.531	0.581	1.969	28.320	1.144
692.166	0.582	1.926	28.564	1.120
694.570	0.583	1.883	28.320	1.097
693.128	0.583	1.841	28.320	1.073
695.050	0.584	1.798	28.320	1.050
694.570	0.585	1.755	28.320	1.026
696.973	0.585	1.713	28.320	1.003
696.492	0.586	1.669	28.320	0.978
698.896	0.587	1.626	28.320	0.954

698.896	0.587	1.583	28.320	0.929
699.376	0.588	1.539	28.320	0.905
698.896	0.588	1.495	28.320	0.880
698.896	0.589	1.452	28.320	0.855
698.415	0.589	1.407	28.076	0.830
697.934	0.590	1.363	28.076	0.804
696.973	0.590	1.319	28.076	0.778
697.454	0.591	1.274	28.076	0.753
696.973	0.591	1.229	28.076	0.727
699.376	0.592	1.185	28.076	0.701
697.934	0.592	1.139	28.076	0.674
700.338	0.593	1.092	28.076	0.647
697.454	0.593	1.047	28.076	0.621
699.376	0.594	1.003	28.076	0.595
696.973	0.594	0.957	28.076	0.568
697.934	0.594	0.912	28.076	0.542
698.415	0.595	0.867	27.832	0.516
699.857	0.595	0.823	27.832	0.490
700.338	0.596	0.777	27.832	0.463
701.299	0.596	0.731	27.832	0.436
701.299	0.597	0.685	27.832	0.409
702.260	0.597	0.640	27.832	0.382
702.260	0.597	0.594	27.832	0.355
701.780	0.598	0.548	27.832	0.328
701.299	0.598	0.502	27.832	0.300
700.818	0.598	0.457	27.832	0.273
702.260	0.599	0.411	27.832	0.246
702.260	0.599	0.366	27.832	0.219
702.741	0.599	0.320	27.832	0.192
703.222	0.600	0.274	27.588	0.164
703.222	0.600	0.227	27.832	0.136
704.183	0.600	0.181	27.588	0.108
706.106	0.601	0.135	27.588	0.081
705.144	0.601	0.088	27.588	0.053
707.067	0.601	0.042	27.588	0.025

Οι μέσες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας είναι $G_{\text{MEDIAN}} = G_2 = 687.638 \text{ Watt/m}^2$ και για την θερμοκρασία

$$T_{\text{MEDIAN}} = T_2 = 29.0429 \text{ }^\circ\text{C}$$

Οι τιμές των συντελεστών θερμοκρασίας έντασης και τάσης αντίστοιχα, οι οποίοι δίνονται από τον κατασκευαστή έχουν ως εξής:

$$A = 0.0003 \text{ και } B = -0.0032$$

Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης R_s υπολογίστηκε και βρέθηκε $R_s = 0.0028 \Omega$

Με την μέθοδο που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα προέκυψαν οι παρακάτω διορθωμένες μετρήσεις (ανηγμένες σε συνθήκες STC)

Istc	Vstc	Pstc
5.4871	0.0321	0.1760
5.4781	0.0432	0.2367
5.4751	0.0564	0.3090
5.4698	0.0686	0.3754
5.4585	0.0790	0.4311
5.4503	0.0902	0.4918
5.4435	0.1021	0.5560
5.4397	0.1149	0.6250
5.4315	0.1262	0.6852
5.4292	0.1397	0.7584
5.4194	0.1507	0.8169
5.4164	0.1640	0.8885
5.4036	0.1741	0.9408
5.4006	0.1873	1.0118
5.3924	0.1990	1.0729
5.3909	0.2126	1.1463
5.3863	0.2254	1.2140
5.3841	0.2386	1.2847
5.3796	0.2512	1.3511
5.3751	0.2640	1.4193
5.3615	0.2739	1.4685
5.3510	0.2846	1.5229
5.3352	0.2939	1.5679
5.3329	0.3073	1.6390
5.3171	0.3165	1.6827
5.3217	0.3334	1.7745
5.3141	0.3452	1.8344
5.3156	0.3602	1.9147
5.3074	0.3720	1.9745

5.2998	0.3839	2.0347
5.2893	0.3950	2.0895
5.2780	0.4059	2.1423
5.2682	0.4173	2.1983
5.2540	0.4273	2.2448
5.2472	0.4397	2.3073
5.2314	0.4492	2.3500
5.2254	0.4622	2.4154
5.2043	0.4703	2.4477
5.1960	0.4830	2.5096
5.1720	0.4898	2.5332
5.1547	0.4989	2.5718
5.1314	0.5060	2.5965
5.1088	0.5137	2.6242
5.0840	0.5204	2.6457
5.0591	0.5268	2.6651
5.0298	0.5317	2.6743
5.0012	0.5370	2.6857
4.9704	0.5416	2.6918
4.9403	0.5465	2.6997
4.9080	0.5502	2.7002
4.8764	0.5546	2.7047
4.8418	0.5578	2.7007
4.8094	0.5617	2.7015
4.7718	0.5638	2.6903
4.7357	0.5666	2.6834
4.6974	0.5686	2.6708
4.6582	0.5705	2.6576
4.6199	0.5727	2.6456
4.5793	0.5739	2.6280
4.5417	0.5758	2.6152
4.5018	0.5773	2.5987
4.4642	0.5793	2.5860
4.4243	0.5806	2.5687
4.3860	0.5821	2.5531
4.3453	0.5832	2.5342
4.3062	0.5848	2.5182
4.2656	0.5861	2.5000
4.2250	0.5871	2.4805
4.1844	0.5883	2.4615
4.1430	0.5891	2.4408

4.1016	0.5902	2.4209
4.0610	0.5912	2.4008
4.0189	0.5918	2.3783
3.9783	0.5927	2.3578
3.9369	0.5935	2.3367
3.8933	0.5944	2.3142
3.8512	0.5951	2.2920
3.8098	0.5960	2.2705
3.7662	0.5965	2.2467
3.7240	0.5974	2.2246
3.6812	0.5979	2.2011
3.6375	0.5983	2.1764
3.5954	0.5990	2.1536
3.5526	0.5994	2.1296
3.5097	0.6001	2.1062
3.4668	0.6004	2.0816
3.4247	0.6011	2.0586
3.3811	0.6015	2.0339
3.3382	0.6021	2.0101
3.2946	0.6025	1.9850
3.2509	0.6029	1.9600
3.2073	0.6032	1.9347
3.1637	0.6036	1.9096
3.1193	0.6039	1.8838
3.0749	0.6041	1.8577
3.0306	0.6045	1.8318
2.9862	0.6048	1.8061
2.9410	0.6051	1.7795
2.8967	0.6055	1.7540
2.8508	0.6057	1.7267
2.8041	0.6060	1.6995
2.7590	0.6061	1.6724
2.7146	0.6065	1.6463
2.6688	0.6065	1.6185
2.6244	0.6069	1.5926
2.5793	0.6071	1.5658
2.5349	0.6074	1.5397
2.4890	0.6077	1.5126
2.4431	0.6079	1.4853
2.3972	0.6082	1.4579
2.3521	0.6084	1.4310

2.3062	0.6086	1.4035
2.2603	0.6087	1.3758
2.2144	0.6088	1.3482
2.1686	0.6089	1.3203
2.1234	0.6092	1.2935
2.0776	0.6093	1.2659
2.0317	0.6095	1.2383
1.9858	0.6096	1.2106
1.9392	0.6098	1.1825
1.8925	0.6100	1.1544
1.8466	0.6103	1.1269
1.8000	0.6103	1.0985
1.7541	0.6105	1.0708

Παρατηρείται ότι η ανηγμένη σε STC συνθήκες μέγιστη ισχύς έχει αλλάξει.

θ (°c)	I (A)	V (V)	P (W)
300	4.876	0.555	2.705

5.4.3 Μετρήσεις στοιχείων με θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 450 βαθμούς κελσίου

Για το κελί που είχε υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 450 βαθμούς κελσίου και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του είχε την μεγαλύτερη τιμή, οι μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες έχουν ως εξής:

Area	125*125
Voc	0.60
Isc	5.59
Vmp	0.48
Imp	4.94
Pmax	2.39

Όπου Vmp και Imp η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στην μέγιστη ισχυρή στις πραγματικές συνθήκες Pmax.

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
1065.648	0.009	5.600	30.762	0.053
1066.128	0.025	5.601	30.762	0.139
1064.686	0.039	5.598	30.762	0.217
1064.686	0.053	5.594	30.762	0.296
1062.764	0.066	5.587	30.762	0.367
1062.764	0.080	5.583	30.762	0.444
1064.686	0.096	5.584	30.762	0.537
1064.206	0.110	5.578	30.762	0.612
1064.686	0.126	5.578	30.762	0.701
1064.686	0.140	5.574	30.762	0.782
1064.686	0.156	5.573	30.762	0.870
1063.725	0.169	5.562	30.518	0.941
1063.244	0.184	5.557	30.518	1.021
1062.283	0.197	5.549	30.518	1.095
1062.283	0.212	5.544	30.518	1.175
1066.609	0.232	5.554	30.518	1.287
1065.648	0.244	5.543	30.518	1.355
1068.051	0.262	5.546	30.518	1.451
1064.206	0.272	5.526	30.518	1.501
1065.648	0.288	5.526	30.518	1.592
1064.686	0.300	5.513	30.273	1.655
1064.686	0.313	5.504	30.273	1.723
1065.167	0.326	5.492	30.273	1.789
1065.167	0.339	5.480	30.273	1.857
1066.128	0.353	5.471	30.273	1.929
1068.051	0.366	5.460	30.273	1.998
1068.532	0.378	5.445	30.273	2.056
1066.609	0.385	5.419	30.273	2.088
1068.051	0.397	5.403	30.029	2.145
1064.206	0.402	5.369	30.029	2.156
1066.609	0.412	5.352	30.029	2.207
1065.167	0.418	5.321	30.029	2.224
1068.051	0.428	5.301	30.029	2.267
1067.570	0.434	5.270	30.029	2.290
1069.493	0.442	5.241	30.029	2.315
1067.570	0.448	5.207	30.029	2.330
1069.974	0.454	5.173	30.029	2.347
1068.532	0.459	5.137	30.029	2.357
1071.896	0.465	5.101	30.029	2.371
1070.935	0.469	5.060	30.029	2.374

1073.819	0.475	5.023	30.029	2.384
1073.338	0.478	4.979	29.785	2.382
1077.664	0.484	4.940	29.785	2.389
1075.261	0.487	4.895	29.785	2.382
1076.703	0.490	4.852	29.785	2.380
1075.742	0.493	4.806	29.785	2.371
1074.780	0.496	4.760	29.785	2.362
1076.222	0.499	4.716	29.785	2.355
1075.261	0.502	4.670	29.785	2.345
1073.338	0.505	4.623	29.785	2.332
1072.858	0.507	4.575	29.785	2.319
1071.416	0.509	4.527	29.785	2.306
1070.935	0.512	4.478	29.785	2.291
1070.935	0.514	4.430	29.785	2.277
1069.974	0.516	4.378	29.541	2.260
1069.012	0.519	4.324	29.541	2.242
1072.858	0.521	4.272	29.541	2.227
1072.377	0.524	4.217	29.541	2.207
1075.261	0.526	4.162	29.541	2.190
1073.338	0.528	4.106	29.541	2.168
1073.819	0.530	4.053	29.541	2.148
1072.858	0.532	3.999	29.541	2.126
1074.300	0.533	3.950	29.541	2.107
1069.974	0.535	3.901	29.541	2.085
1071.896	0.536	3.853	29.541	2.066
1068.532	0.537	3.803	29.541	2.044
1071.416	0.539	3.756	29.541	2.024
1067.570	0.540	3.707	29.541	2.002
1070.935	0.542	3.659	29.541	1.982
1068.051	0.543	3.610	29.541	1.959
1074.300	0.545	3.562	29.297	1.939
1071.896	0.546	3.510	29.541	1.915
1077.184	0.547	3.459	29.541	1.893
1075.261	0.548	3.407	29.297	1.869
1080.548	0.550	3.357	29.297	1.847
1076.703	0.551	3.304	29.297	1.821
1079.587	0.553	3.252	29.297	1.797
1076.703	0.554	3.200	29.297	1.771
1078.626	0.555	3.150	29.297	1.748
1077.664	0.556	3.100	29.297	1.724
1078.626	0.557	3.051	29.297	1.700

1079.106	0.558	3.000	29.297	1.675
1079.587	0.559	2.951	29.297	1.650
1080.068	0.560	2.901	29.053	1.626
1080.548	0.561	2.851	29.297	1.601
1079.106	0.562	2.802	29.297	1.575
1081.029	0.563	2.753	29.297	1.551
1081.029	0.564	2.703	29.297	1.525
1082.952	0.565	2.653	29.297	1.500
1083.913	0.566	2.603	29.053	1.474
1083.432	0.567	2.554	29.053	1.449
1084.874	0.568	2.505	29.053	1.423
1085.836	0.569	2.457	29.053	1.398
1086.797	0.570	2.408	29.053	1.372
1086.316	0.571	2.360	29.053	1.347
1086.316	0.571	2.313	29.053	1.322
1086.316	0.572	2.266	29.053	1.296
1087.758	0.573	2.217	29.053	1.271
1085.836	0.574	2.169	29.053	1.245
1084.874	0.575	2.121	29.053	1.219
1084.394	0.575	2.071	29.053	1.192
1081.510	0.576	2.022	29.053	1.165
1083.432	0.577	1.973	29.053	1.138
1079.106	0.577	1.920	29.053	1.109
1080.068	0.578	1.869	28.809	1.081
1075.742	0.579	1.816	28.809	1.051
1078.145	0.580	1.763	28.809	1.022
1072.858	0.580	1.711	28.809	0.993
1075.742	0.581	1.659	28.809	0.964
1072.858	0.582	1.607	28.809	0.935
1077.184	0.582	1.558	28.809	0.907
1074.780	0.583	1.507	28.809	0.879
1079.106	0.584	1.458	28.809	0.851
1076.222	0.584	1.408	28.809	0.823
1080.068	0.585	1.358	28.809	0.794
1078.145	0.586	1.307	28.809	0.766
1081.029	0.586	1.258	28.809	0.738
1077.664	0.587	1.206	28.809	0.708
1082.471	0.588	1.157	28.809	0.680
1079.587	0.588	1.104	28.809	0.650
1083.913	0.589	1.052	28.809	0.620
1082.952	0.590	1.000	28.809	0.590

1084.874	0.590	0.948	28.809	0.560
1083.913	0.591	0.896	28.809	0.529
1085.355	0.592	0.844	28.564	0.499
1085.836	0.592	0.791	28.564	0.469
1086.316	0.593	0.742	28.564	0.440
1088.239	0.593	0.691	28.809	0.410
1087.758	0.594	0.641	28.564	0.381
1090.162	0.594	0.591	28.564	0.351
1087.758	0.595	0.541	28.564	0.322
1089.200	0.595	0.491	28.564	0.292
1087.278	0.596	0.442	28.564	0.263
1088.720	0.597	0.392	28.564	0.234
1088.239	0.597	0.342	28.564	0.204
1088.720	0.598	0.293	28.564	0.175
1088.239	0.598	0.240	28.564	0.144
1089.200	0.599	0.188	28.564	0.113
1088.239	0.599	0.135	28.564	0.081
1088.239	0.600	0.083	28.564	0.050
1087.758	0.600	0.032	28.564	0.019

Όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για την αλλαγή θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές για ακτινοβολία και θερμοκρασία.

Οι τιμές αυτές είναι $G_{\text{MEDIAN}} = G_1 = 1075.551 \text{ Watt/m}^2$ και για την θερμοκρασία $T_{\text{MEDIAN}} = T_1 = 29.505 \text{ }^\circ\text{C}$

Για το κελί που είχε υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 300 βαθμούς κελσίου και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του είχε την μικρότερη τιμή, οι μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες έχουν ως εξής:

Area	125*125
Voc	0.61
Isc	5.48
Vmp	0.47
Imp	4.94
Pmax	2.34

Όπου Vmp και Imp η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στην μέγιστη ισχύ στις πραγματικές συνθήκες Pmax.

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
1069.012	0.010	5.478	29.785	0.057
1067.090	0.021	5.472	29.785	0.118
1067.090	0.039	5.472	29.785	0.212
1065.167	0.049	5.461	29.785	0.269
1067.090	0.068	5.471	29.785	0.374
1066.128	0.089	5.462	29.541	0.485
1067.570	0.105	5.468	29.785	0.574
1067.570	0.122	5.464	29.785	0.667
1068.532	0.140	5.468	29.785	0.765
1069.974	0.157	5.471	29.785	0.861
1069.974	0.172	5.475	29.541	0.943
1072.858	0.189	5.486	29.785	1.037
1070.935	0.197	5.479	29.785	1.079
1072.858	0.209	5.489	29.785	1.146
1069.012	0.211	5.471	29.785	1.152
1071.416	0.225	5.482	29.785	1.234
1069.493	0.230	5.470	29.785	1.260
1070.935	0.244	5.473	29.785	1.337
1069.974	0.254	5.464	29.785	1.390
1070.935	0.268	5.464	29.785	1.466
1071.896	0.283	5.464	29.785	1.545
1071.416	0.297	5.460	29.785	1.619
1071.416	0.309	5.454	29.785	1.687
1069.493	0.320	5.442	29.785	1.741
1069.012	0.332	5.437	29.785	1.808
1069.012	0.342	5.430	29.785	1.857
1068.051	0.350	5.422	29.785	1.897
1069.012	0.359	5.416	29.785	1.943
1068.051	0.366	5.406	29.785	1.977
1069.012	0.375	5.403	29.785	2.028
1067.570	0.379	5.386	29.541	2.043
1068.051	0.387	5.379	29.785	2.083
1067.090	0.392	5.358	29.785	2.099
1067.570	0.402	5.346	29.541	2.147
1068.051	0.408	5.322	29.785	2.169
1067.570	0.416	5.301	29.785	2.204
1069.012	0.423	5.277	29.785	2.233
1069.012	0.431	5.253	29.785	2.262
1070.454	0.438	5.228	29.541	2.292

1068.051	0.442	5.192	29.541	2.297
1068.051	0.448	5.162	29.785	2.315
1066.128	0.451	5.128	29.785	2.314
1066.609	0.456	5.098	29.541	2.327
1066.609	0.459	5.067	29.541	2.328
1066.609	0.463	5.041	29.785	2.332
1067.570	0.466	5.008	29.541	2.336
1066.609	0.470	4.976	29.785	2.337
1066.128	0.473	4.943	29.541	2.339
1065.648	0.476	4.909	29.541	2.338
1065.648	0.479	4.874	29.785	2.337
1066.609	0.483	4.836	29.785	2.334
1065.648	0.486	4.795	29.541	2.329
1066.128	0.489	4.761	29.541	2.326
1065.648	0.491	4.727	29.785	2.320
1068.532	0.494	4.694	29.541	2.318
1066.609	0.496	4.660	29.541	2.310
1066.609	0.498	4.628	29.785	2.304
1064.686	0.500	4.594	29.541	2.295
1064.686	0.502	4.562	29.785	2.288
1064.686	0.503	4.529	29.785	2.279
1065.648	0.505	4.496	29.785	2.271
1064.206	0.507	4.460	29.541	2.260
1065.648	0.509	4.427	29.541	2.252
1067.090	0.510	4.394	29.785	2.243
1067.570	0.512	4.361	29.541	2.234
1069.012	0.514	4.326	29.785	2.224
1069.012	0.516	4.290	29.785	2.213
1069.493	0.518	4.254	29.785	2.202
1068.532	0.519	4.217	29.785	2.189
1068.051	0.521	4.180	29.785	2.177
1066.609	0.522	4.141	29.785	2.162
1065.167	0.524	4.102	29.541	2.148
1063.244	0.525	4.065	29.541	2.133
1063.725	0.526	4.029	29.785	2.120
1061.802	0.527	3.992	29.785	2.105
1065.167	0.529	3.957	29.785	2.094
1064.206	0.530	3.920	29.785	2.079
1065.167	0.532	3.884	29.785	2.066
1064.686	0.533	3.847	29.541	2.051
1067.570	0.535	3.812	29.785	2.038

1067.090	0.536	3.775	29.785	2.023
1068.532	0.537	3.742	29.785	2.010
1068.532	0.538	3.706	29.785	1.995
1068.532	0.539	3.671	29.785	1.980
1069.493	0.541	3.636	29.541	1.966
1070.454	0.542	3.601	29.785	1.951
1066.609	0.542	3.565	29.541	1.933
1068.051	0.543	3.529	29.785	1.918
1064.686	0.544	3.489	29.541	1.899
1065.648	0.545	3.452	29.541	1.883
1065.648	0.546	3.414	29.785	1.866
1067.570	0.548	3.376	29.785	1.849
1067.570	0.549	3.339	29.541	1.832
1069.974	0.550	3.301	29.785	1.816
1067.570	0.551	3.262	29.785	1.797
1068.051	0.552	3.224	29.541	1.780
1068.051	0.553	3.185	29.785	1.762
1066.128	0.554	3.146	29.541	1.743
1066.128	0.555	3.106	29.541	1.724
1063.725	0.556	3.064	29.785	1.703
1066.128	0.557	3.024	29.785	1.684
1064.686	0.558	2.982	29.785	1.664
1067.090	0.559	2.942	29.785	1.644
1063.244	0.560	2.900	29.785	1.623
1064.206	0.561	2.859	29.541	1.603
1063.244	0.562	2.819	29.785	1.583
1065.167	0.563	2.779	29.785	1.564
1064.686	0.564	2.739	29.541	1.544
1065.167	0.564	2.700	29.785	1.524
1066.128	0.565	2.660	29.541	1.504
1067.570	0.566	2.619	29.785	1.483
1067.090	0.567	2.578	29.785	1.463
1067.090	0.568	2.538	29.785	1.442
1064.206	0.569	2.497	29.785	1.420
1065.648	0.570	2.454	29.785	1.398
1066.128	0.571	2.411	29.541	1.376
1068.532	0.572	2.369	29.785	1.354
1069.974	0.572	2.327	29.541	1.332
1071.896	0.573	2.284	29.785	1.310
1071.896	0.574	2.241	29.541	1.287
1071.896	0.575	2.197	29.785	1.264

1072.377	0.576	2.156	29.785	1.242
1068.051	0.577	2.114	29.541	1.219
1069.012	0.577	2.071	29.785	1.196
1064.686	0.578	2.029	29.541	1.172
1066.609	0.579	1.987	29.785	1.150
1065.167	0.580	1.944	29.541	1.127
1066.609	0.580	1.903	29.541	1.105
1064.206	0.581	1.859	29.785	1.081
1067.090	0.582	1.817	29.785	1.058
1066.609	0.583	1.773	29.541	1.033
1067.090	0.584	1.728	29.785	1.009
1068.051	0.584	1.683	29.785	0.984
1066.128	0.585	1.638	29.541	0.959
1068.051	0.586	1.593	29.541	0.934
1065.648	0.587	1.548	29.541	0.908
1066.128	0.587	1.504	29.785	0.883
1065.648	0.588	1.459	29.541	0.858
1067.090	0.589	1.416	29.541	0.834
1067.090	0.590	1.372	29.541	0.809
1068.532	0.590	1.329	29.785	0.785
1067.570	0.591	1.286	29.785	0.760
1069.974	0.592	1.243	29.541	0.735
1069.493	0.592	1.198	29.541	0.710
1069.012	0.593	1.155	29.541	0.685
1066.609	0.594	1.111	29.785	0.660
1067.570	0.595	1.065	29.785	0.633
1066.609	0.595	1.018	29.785	0.606
1070.454	0.596	0.972	29.785	0.579
1067.570	0.597	0.925	29.785	0.552
1069.493	0.597	0.879	29.785	0.525
1066.128	0.598	0.833	29.541	0.498
1068.051	0.599	0.787	29.541	0.471
1067.570	0.599	0.742	29.785	0.445
1067.570	0.600	0.698	29.541	0.419
1068.532	0.601	0.654	29.785	0.393
1068.532	0.601	0.609	29.541	0.366
1069.974	0.602	0.563	29.785	0.339
1069.974	0.603	0.518	29.785	0.312
1070.935	0.603	0.473	29.541	0.285
1068.051	0.604	0.427	29.785	0.258
1068.532	0.605	0.382	29.541	0.231

1065.167	0.605	0.337	29.785	0.204
1066.609	0.606	0.290	29.541	0.176
1064.206	0.606	0.244	29.541	0.148
1066.128	0.607	0.196	29.785	0.119
1064.686	0.608	0.149	29.541	0.091
1066.128	0.608	0.102	29.541	0.062
1064.686	0.609	0.054	29.785	0.033
1066.128	0.610	0.007	29.785	0.004

Οι μέσες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας είναι $G_{\text{MEDIAN}} = G_2 = 1067.418 \text{ Watt/m}^2$ και για την θερμοκρασία

$$T_{\text{MEDIAN}} = T_2 = 29.699 \text{ }^\circ\text{C}$$

Οι τιμές των συντελεστών θερμοκρασίας έντασης και τάσης αντίστοιχα, οι οποίοι δίνονται από τον κατασκευαστή έχουν ως εξής:

$$A = 0.0003 \text{ και } B = -0.0032$$

Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης R_s υπολογίστηκε και βρέθηκε $R_s = -0.05 \Omega$

Η αρνητική τιμή της εσωτερικής αντίστασης είναι ένα υπολογιστικό σφάλμα το οποίο εξαλείφεται μέσω τις ίδιες της μεθοδολογίας και δεν επηρεάζει την ορθότητα των αποτελεσμάτων

Με την μέθοδο που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα προέκυψαν οι παρακάτω διορθωμένες μετρήσεις (ανηγμένες σε συνθήκες STC)

Istc	Vstc	Pstc
5.1306	0.0321	0.1646
5.1246	0.0432	0.2215
5.1246	0.0604	0.3098
5.1133	0.0709	0.3627
5.1231	0.0901	0.4615
5.1148	0.1105	0.5651
5.1201	0.1268	0.6490
5.1171	0.1438	0.7360
5.1201	0.1616	0.8273
5.1238	0.1791	0.9177
5.1276	0.1939	0.9943
5.1381	0.2108	1.0833
5.1314	0.2187	1.1221
5.1411	0.2307	1.1858

5.1238	0.2323	1.1904
5.1344	0.2469	1.2676
5.1223	0.2521	1.2915
5.1253	0.2659	1.3631
5.1163	0.2760	1.4122
5.1171	0.2900	1.4838
5.1171	0.3045	1.5581
5.1126	0.3182	1.6268
5.1065	0.3309	1.6900
5.0945	0.3416	1.7401
5.0900	0.3540	1.8020
5.0825	0.3635	1.8473
5.0749	0.3714	1.8848
5.0689	0.3802	1.9273
5.0584	0.3872	1.9587
5.0554	0.3968	2.0061
5.0381	0.4007	2.0185
5.0313	0.4086	2.0557
5.0110	0.4130	2.0696
4.9990	0.4227	2.1132
4.9742	0.4286	2.1319
4.9539	0.4367	2.1635
4.9298	0.4440	2.1886
4.9057	0.4514	2.2143
4.8801	0.4590	2.2399
4.8448	0.4628	2.2422
4.8147	0.4687	2.2568
4.7801	0.4715	2.2538
4.7508	0.4764	2.2632
4.7199	0.4792	2.2620
4.6936	0.4824	2.2642
4.6605	0.4859	2.2647
4.6282	0.4891	2.2638
4.5958	0.4925	2.2633
4.5620	0.4954	2.2599
4.5266	0.4983	2.2558
4.4890	0.5014	2.2507
4.4476	0.5043	2.2431
4.4138	0.5070	2.2376
4.3792	0.5092	2.2297
4.3469	0.5119	2.2250

4.3123	0.5137	2.2150
4.2807	0.5156	2.2071
4.2468	0.5171	2.1961
4.2145	0.5190	2.1873
4.1814	0.5204	2.1762
4.1483	0.5224	2.1670
4.1129	0.5237	2.1538
4.0798	0.5255	2.1439
4.0467	0.5271	2.1332
4.0136	0.5288	2.1224
3.9783	0.5306	2.1108
3.9422	0.5322	2.0978
3.9061	0.5337	2.0845
3.8692	0.5350	2.0701
3.8324	0.5365	2.0561
3.7933	0.5377	2.0398
3.7549	0.5388	2.0232
3.7173	0.5398	2.0066
3.6812	0.5411	1.9919
3.6443	0.5421	1.9757
3.6097	0.5437	1.9626
3.5729	0.5447	1.9462
3.5368	0.5461	1.9314
3.4999	0.5472	1.9153
3.4646	0.5487	1.9009
3.4277	0.5497	1.8842
3.3946	0.5508	1.8697
3.3585	0.5517	1.8528
3.3232	0.5527	1.8366
3.2886	0.5537	1.8209
3.2532	0.5547	1.8044
3.2171	0.5551	1.7859
3.1817	0.5561	1.7692
3.1419	0.5567	1.7491
3.1050	0.5577	1.7317
3.0667	0.5585	1.7128
3.0291	0.5596	1.6951
2.9914	0.5605	1.6766
2.9538	0.5616	1.6589
2.9147	0.5623	1.6389
2.8764	0.5632	1.6200

2.8380	0.5640	1.6006
2.7989	0.5648	1.5808
2.7583	0.5656	1.5600
2.7169	0.5662	1.5384
2.6763	0.5672	1.5179
2.6349	0.5679	1.4963
2.5943	0.5689	1.4758
2.5522	0.5694	1.4533
2.5116	0.5701	1.4320
2.4717	0.5709	1.4110
2.4318	0.5717	1.3902
2.3920	0.5724	1.3693
2.3521	0.5732	1.3481
2.3122	0.5739	1.3269
2.2716	0.5747	1.3054
2.2310	0.5754	1.2837
2.1904	0.5760	1.2616
2.1498	0.5765	1.2394
2.1069	0.5772	1.2162
2.0640	0.5779	1.1929
2.0219	0.5788	1.1703
1.9798	0.5794	1.1472
1.9369	0.5802	1.1238
1.8940	0.5809	1.1003
1.8497	0.5815	1.0757
1.8090	0.5821	1.0531
1.7662	0.5825	1.0289
1.7240	0.5831	1.0053
1.6812	0.5835	0.9810
1.6398	0.5843	0.9581
1.5969	0.5847	0.9338
1.5556	0.5854	0.9106
1.5119	0.5859	0.8858
1.4698	0.5866	0.8622
1.4254	0.5872	0.8370
1.3811	0.5878	0.8118
1.3359	0.5883	0.7860
1.2908	0.5888	0.7600
1.2457	0.5895	0.7343
1.2005	0.5899	0.7082
1.1562	0.5905	0.6827

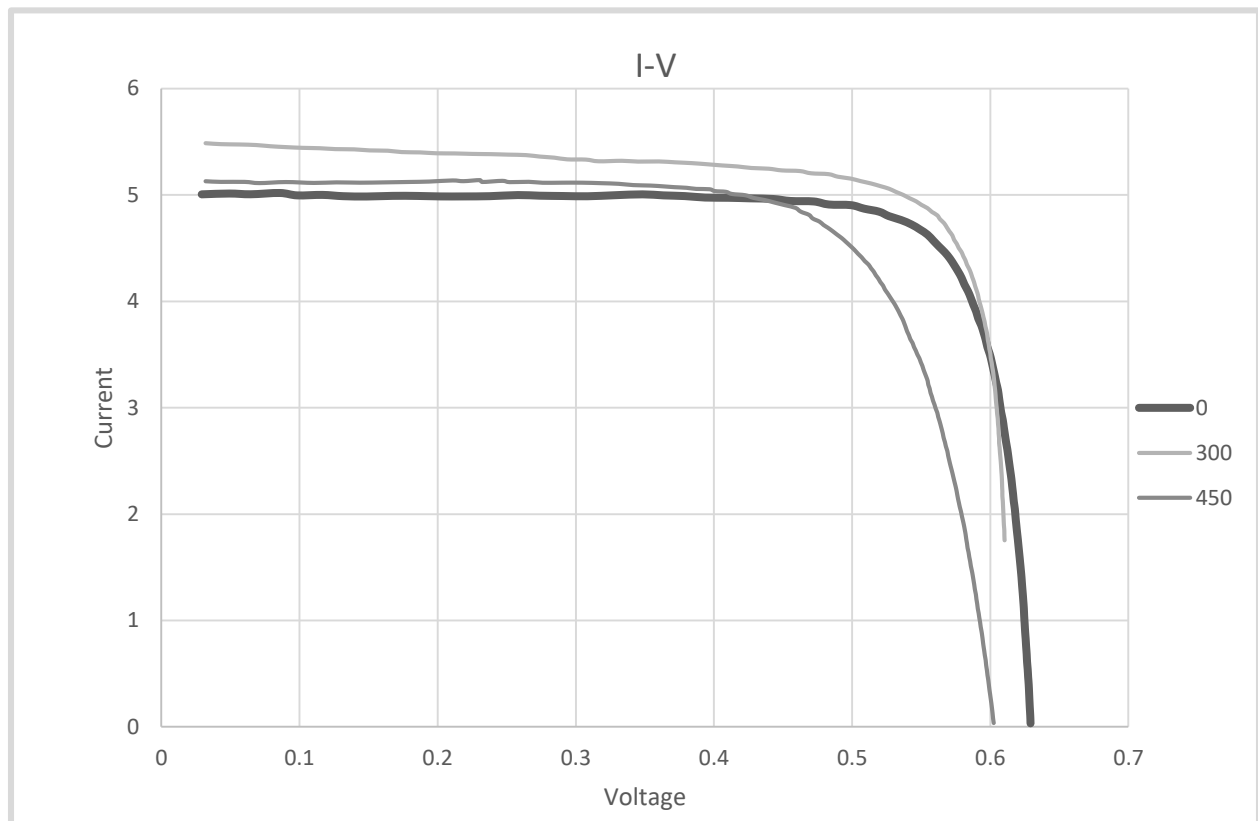
1.1118	0.5909	0.6570
1.0682	0.5915	0.6319
1.0245	0.5920	0.6066
0.9817	0.5926	0.5817
0.9388	0.5930	0.5567
0.8952	0.5937	0.5314
0.8508	0.5941	0.5055
0.8079	0.5946	0.4804
0.7635	0.5950	0.4543
0.7176	0.5955	0.4274
0.6710	0.5960	0.3999
0.6244	0.5966	0.3725
0.5777	0.5970	0.3449
0.5319	0.5975	0.3178
0.4852	0.5979	0.2901
0.4393	0.5985	0.2629
0.3950	0.5989	0.2365
0.3506	0.5993	0.2101
0.3062	0.5998	0.1837
0.2611	0.6003	0.1567
0.2160	0.6008	0.1297
0.1708	0.6012	0.1027
0.1257	0.6016	0.0756
0.0798	0.6020	0.0480
0.0347	0.6024	0.0209

Παρατηρείται ότι η ανηγμένη σε STC συνθήκες μέγιστη ισχύς έχει αλλάξει.

Θ (°C)	I (A)	V (V)	P (W)
450	4.661	0.486	2.265

5.5 Παρουσίαση συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων και σχολιασμός

Από τα αποτελέσματα της μετατροπής σε συνθήκες STC και οι εξ'αυτών παραγόμενες καμπύλες I-V παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο παρακάτω διάγραμμα



Σχήμα 5.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπυλών I-V για τα στοιχεία με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης καταπονημένα στους 300 και 450 βαθμούς κελσίου και στοιχείο αναφοράς (χωρίς θερμοκρασιακή καταπόνηση)

Θ (°C)	I_{MP} (A)	V_{MP} (V)	P_{MAX} (W)
0	4.678	0.549	2.568
300	4.876	0.555	2.705
450	4.661	0.486	2.265

Παρατηρούμε ότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που έχουν θερμανθεί στους 300 °C αποδίδουν την μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ P_{max} ενώ τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που έχουν θερμανθεί στους 450 °C αποδίδουν την μικρότερη ηλεκτρική ισχύ P_{max} . Η μεταβολή στην αποδιδόμενη ισχύ συνδέεται πρωτίστως με τις μεταβολές στις τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης και λιγότερο με τις διαφοροποιήσεις των τιμών των τάσεων ανοικτοκύκλωσης (σύγκριση καμπύλης I-V για θερμοκρασίες 0 °C και 300 °C). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η παρατηρούμενη μεταβολή στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ δεν μπορεί να συνδέεται με ενδεχόμενη οξείδωση της επιφάνειας των αγώγιμων διαύλων (κεντρικών ζυγών) του φωτοβολταϊκού στοιχείου καθώς θα αναμέναμε ελάττωση της τιμής του παραγόμενου φωτορρεύματος στα στοιχεία που υπέστησαν τη θερμική κατεργασία έναντι της αρχικής τους κατάσταση. Επομένως, για τα στοιχεία που θερμάνθηκαν στους 300 °C περισσότερα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων ολοκληρώνουν τη μετάβασή τους προς την οπίσθια και εμπρόσθια ωμική επαφή αντίστοιχα, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την λειτουργική απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ο κυριότερος λόγος που μπορεί να επαυξήσει την συλλογή των φορέων πλειονότητας (οπές στην οπίσθια ωμική επαφή και ηλεκτρόνια στην εμπρόσθια ωμική επαφή του cell) είναι η ελάττωση του ρυθμού επανασύνδεσης των ηλεκτρικών φορέων στις επιφάνειες του cell, δηλ. την άνω και κάτω πλευρά του. Αυτό συνδέεται στην πράξη με την αύξηση στην τιμή του R_{SHUNT} στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Συνεπώς η θερμική κατεργασία των 300 °C προσφέρει παθητικοποίηση της επιφάνειας (κυρίως στην άνω όψη που δέχεται τον φωτισμό). Η παθητικοποίηση συνήθως λειτουργεί μέσα από την απώθηση των φορέων μειονότητας από την επιφάνεια, οπότε καθώς υπάρχουν διαθέσιμοι μόνοι οι φορείς πλειονότητας, καταστέλλεται ο ρυθμός επανασύνδεσης λόγω της έλλειψης ζευγών οπών-ηλεκτρονίων.

Συνεπώς, σύμφωνα με τα πειραματικά μας αποτελέσματα η θερμική κατεργασία των 300 °C προσφέρει το βέλτιστο πάχος υμενίου SiO_2 ενώ ταυτόχρονα δεν σχηματίζει ικανό πάχος οξειδίου του μετάλλου επί των αγώγιμων διαύλων οπότε λαμβάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση του cell για συνθήκες STC. Η γνώση αυτή αναμένεται να βοηθήσει στις τεχνικές επικάλυψης των cells με σύνθετα πολυμερή τα οποία θα εμπεριέχουν νανοκρυστάλλους οι οποίοι θα λειτουργήσουν ως συγκεντρωτικά κάτοπτρα. Αυτό ενδεχομένως αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Becquerel A. E., Compt. Rendus de L' Academie des Sciences, τόμος 9, 1839, σελ. 561.
2. Shockley W., Bell Syst. Tech. Journ., Τόμος 28, 1949, σελ. 435.
3. Bardeen J και Brattain W.H., Phys. Rev., Τόμος 74, 1948, σελ. 230.
4. Chapin D. M., Fuller C. S. και Pearson G. L., J. Appl. Phys., Τόμος 25, 1954, σελ. 676
5. Chapter1.3 pg.4-5-6-11-13_Chapter .1.1 pg.18-21_Τεχνικό Σεμινάριο πιστοποιημένο από την TÜV Nord με τίτλο: Ολιστική Προσέγγιση Εγκατάστασης Φ/Β Σταθμού στην πράξη σε Κατοικίες –Βιομηχανίες και Φ/Β Πάρκα, Εισηγητής: Γ. Κραββαρίτης υπό την αιγίδα της TÜV Nord και του ΙΕΚ Intergraphiks , 2012
6. www.ucsusa.org/clean_energy/technology_and_impacts/energy_technologies/how_solar_energy_works.html, 2013
7. «Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες», Αθηνά Γαγλία, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 2009, σελ 6,7
8. www.greenpeace.org/greece/el/news/2011/3/odikos_energeiakos_xartis_2050/, 2012, σελ. 2
9. Ιωάννης Ε. Φραγκιαδάκης, «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Εκδόσεις Ζήτη, Δεύτερη έκδοση 2006
10. European Commission, "GREEN PAPER- A 2030 Framework for Climate and Energy Policies".
11. O. Mah, National Solar Power Research Institute, Inc., (1998), <http://userwww.sfsu.edu/ciotola/solar/pv.pdf>
12. Goetzberger, C. Hebling, H.-W. Schock, Materials Science and Engineering R40 (2003) 1-46
13. M.Boutchich, J.Alvarez, D.Diouf, P.Ri.Cabarrocas, M.Liao, I.Masataka, et al., Journal of Non-Crystalline Solids 2012 Article in Press
14. L.El Chaar, L.A. Iamont, N.El Zein, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 2165-2175
15. http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php
16. Καραγκάκης Κ. «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1992
17. Κ.Θ. Δέρβος, Π. Βασιλείου, "Εισαγωγή στα υλικά", Σημειώσεις 2^{ου} Εξαμήνου Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα, 2012.
18. Γ. Τρακάκης, "Μηχανικές Ιδιότητες Νανοσύνθετων Υλικών", Μεταπτυχιακή εργασία ειδίκευσης, Πάτρα, 2010.
19. M. L. Minus, S. Kumar, "Carbon Fibers , Kirk- Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology", John Wiley & Sons, Inc, Abstract Published Online: 5 JAN 2007.
20. K. K. Chawla, "Composite Materials, Science Engineering, Second Edition", USA 1998.

21. Ι. Χρ. Σιμιτζής, “Πολυμερή και Σύνθετα Υλικά”, Σημειώσεις Κατεύθυνσης 8^{ου} Εξαμήνου Χημικών Μηχανικών – ΜΕΡΟΣ Α, Αθήνα, 2010.
22. Ν.Γ. Τσούβαλης, “Μηχανική Συνθέτων Υλικών”, Σημειώσεις Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών», Αθήνα 1998, σελ. 1-28, 45-50, 68-69.
23. Ü.Özgür, Ya.I.Alivon, C.Liu, A.Teke, M.A.Reshchikov, S.Doğan, V.Avrutin,S.-J.Cho, H.Morkos, Journal of Applied Physics 98, 041301 (2005)
24. L.L.Hench, D.R Ulrich., “Ultrastructure Processing of Ceramics, Glasses and Composites”, John Wiley & Sons, New York, 1984.
25. M.Boutchich, J.Alvarez, D.Diouf, P.Ri.Cabarrocas, M.Liao, I.Masataka, et al., Journal of Non-Crystalline Solids 2012 Article in Press
26. Y. W. Guozhong Cao, Nanostructures and Nanomaterials, 2011.
27. W. Luther, Industrial application of nanomaterials - chances and risks, Dusseldorf: Future Technologies Division, 2004.
28. L. F. a. Duncan, Nanotechnologies: Principles, Applications and Hands-on Activities, Sutherland: European Commission, 2013.
29. Ν. Κονοφάος, Εισαγωγή στην Μικρο και Νανο Ηλεκτρονική: Εφαρμογές στα Υπολογιστικά.
30. O. V. K. U. O.-M. Boris I. Kharisov, Handbook of Less-Common Nanostructures, 2012.
31. G. X. G. P. C. G. a. T. G. A. C. T. Dervos, «The energetically confined traps on a semiconductor surface as a potent energy harvester: Case study for the ZnO nano-flowers,» IOP Publishing Materials Research Express, 2015.
32. IEC 60891 – 2009 Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics
33. Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions Andreas Wagner, 2009.